

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МІЦНОСТІ ЗРОЩЕНИХ ЗАГОТОВОК ІЗ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯЛИЦІ

Обґрунтовано доцільність використання розмірно-придатних брусків елементів вживаної деревини для отримання зрощених заготовок для виготовлення виробів з деревини. Підготовлено зрощені заготовки із вживаної деревини ялиці шляхом реалізації В-плану другого порядку, де змінними були ширина розмірно-придатних брусків та довжина зубчастих шипів в брусках. Визначено експериментальним шляхом межу міцності під час статичного згину для зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці та побудовано адекватну математичну (регресійну) модель залежно від ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B(x_1)$ та довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$. Визначено, що ширина рейки з ялиці $B(x_1)$ в конструкції зрощених заготовок призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 16,17 до 19,40 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$ на збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u є менш суттєвою (від 10,58 до 14,03 %). Виявлено, що збільшення довжини зубчастого шипа від 10 до 20 мм приводить до зростання межі міцності при статичному згині на 5,78 %, а від 10 до 30 мм – на 10,58 %. Встановлено, що отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці не залежно від їх конструкції, задовольняють нормативні вимоги для первинної деревини ялиці (84,5 МПа). Встановлено за результатами експериментальних досліджень, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 72,2478$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B = 56$ мм та довжини зубчастих шипів в брусках $D = 30$ мм. З практичного досвіду рекомендовано використовувати вживану деревину для виробництва зрощених заготовок з перерізом розмірно-придатних брусків у відношенні товщина-ширина не більшим 1:3 з довжиною зубчастого шипа для заготовок ґратчастих меблів – 30 мм, а для меблевого щита та столярної плити – 10 мм.

Ключові слова: вживана деревина, зрощені заготовки, математична модель, технологія, міцність, склеювання, перероблення, ялиця біла (*Abies alba* Mill), циркулярна економіка.

Вступ. Потенційним ресурсом і невикористаною базою деревної сировини, запаси якої збільшуються в міру розвитку промисловості і господарства країни в цілому є запаси деревинних відходів (залишків) та вживаної деревини у вигляді брусків елементів [9-13, 35, 36, 37, 49, 50, 55, 57]. Залучення відповідної кількості короткомірних брусків шляхом зрощування у виробничий процес стане додатковим резервом деревинних сировинних ресурсів. Комплексне використання деревинних ресурсів є актуальною проблемою сьогодення, бо сприяє економії первинної деревини та, відповідно, зменшенні викидів вуглекислого газу та навантаження на довкілля. Проблема – відсутність нормативних документів, що визна-

¹ Лесів Лев Едуардович – 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, +38-097-127-42-26. E-mail: levlesiv123@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3959-5447>

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

³ Салапак Любов Василівна – старший викладач, кафедра прикладної механіки і технології матеріалів. Тел.: +38-098-432-16-06. E-mail: lyubov.salapak@nltu.edu.ua

чають фізико-механічні властивості зубчастих з'єднань за різною довжиною шипа при різній ширині брусків підготовлених із вживаної деревини, зокрема.

Загальна мета – порівняльний аналіз міцності шипових з'єднань, одержаних на зубчастий шип різної довжини при різній ширині брусків, що характерно як для виготовлення елементів ґратчастих меблевих виробів так і при виготовленні щитових конструкцій меблевих щитів та столярних плит різної якості та асортименту. Конкретна мета дослідження – експериментально виготовити зрощені заготовки із вживаної деревини (ЗЗ із ВЖД), що мають різну довжину шипа при різній ширині брусків, перевірити їх на міцність на статичний згин впоперек рейок та провести порівняльний аналіз фізико-механічних параметрів монолітних та зрощених елементів. Об'єкт дослідження – шипові з'єднання в зрощених брусках, що використовуються у виробництві виробів з деревини. Предмет дослідження – порівняльний аналіз механічних властивостей зрощених брусків елементів, що зроблені на різні типорозміри зубчастого шипа при різній ширині брусків.

Суть роботи:

- дослідити можливість залучення короткомірних відрізків для зрощування, як конструктивних елементів для виробів з деревини;
- дослідити та порівняти міцнісні характеристики брусків елементів, що зроблені на різні типорозміри зубчастого шипа при різній ширині брусків.
- вивчити питання міцності з'єднань, зокрема зубчастих, як найменш досліджених у порівнянні з шиповими;
- обґрунтувати доцільність використання певних типорозмірів зубчастих з'єднань для конкретних складових елементів майбутнього виробу.

Очікувані результати. Маючи певні напрацювання з даної проблеми досліджень та, після проведення експериментів, розробити практичні рекомендації стосовно матеріального використання короткомірних брусків з деревообробної та меблевої галузі та розмірно-придатних із підготовленої вживаної деревини.

Дослідження і аналіз комплексного використання деревинних ресурсів є актуальним завданням, рішення якого забезпечить виготовлення якісних виробів з деревини з максимальним урахуванням особливостей фізико-механічних властивостей матеріалів додаткового використання, зокрема вживаної деревини.

Аналіз джерел літератури. Аналіз джерел літератури стосовно актуальності використання вживаної деревини стосується екологічних, економічних, технічних, і соціальних аспектів, що полягають у наступному:

- Збереженні природних лісів та біорізноманіття [10, 49, 50, 55, 57].
- Економії енергії під час перероблення вживаної деревини, ніж під час оброблення первинної деревини, знижуючи вуглецеві викиди.
- Уникнення потрапляння ВЖД на сміттєзвалища, зменшуючи навантаження на екосистему.
- Собівартість ВЖД значно нижча, ніж нова, особливо якщо вона суха та вже якісно оброблена [29, 36, 37, 49, 50, 51, 55, 56].
- Використання вживаної деревини може підтримувати місцеві бізнеси, що займаються рециклінгом та переробкою матеріалів [31, 33, 46].
- Вживана деревина може мати унікальні властивості та естетику, яка відсутня у нових матеріалів.

Аналіз джерел літератури щодо проблемності використання вживаної деревини базуються на тому, що:

- Вживана деревина може містити залишки фарб, лаків, консервантів або інших хімічних речовин, які можуть бути шкідливими для здоров'я або навколишнього середовища [49, 50].
- Обробка або переробка старої деревини може призводити до викидів в атмосферу шкідливих речовин.
- Очищення, обробка та підготовка вживаної деревини до повторного використання можуть вимагати значних витрат, а також залучення робототехніки для операцій сканування та сортування [2, 5, 6, 10].
- Фізичні та механічні властивості деревини можуть погіршуватися з часом, що ускладнює її повторне використання. Вживана деревина може бути непридатною для деяких застосувань через свою структуру або стан, але придатною як додаток для стружкових плит [17].
- Будівельні кодекси та стандарти можуть обмежувати використання вживаної деревини в певних типах конструкцій або регіонах.

У зв'язку з цим, проблемні виклики потребують додаткових досліджень та інновацій, а також зміни у законодавстві та ринкових практиках для подолання бар'єрів на шляху більш широкого використання вживаної деревини у деревообробній та меблевій галузі.

У контексті циркулярної економіки, вживана деревина виступає як ключовий ресурс для зменшення відходів, ефективного використання матеріалів і зменшення екологічного впливу [1, 26, 29, 51, 54, 56]. Наукові праці тут фокусуються на кількох основних напрямках:

- Аналіз впливу використання вживаної деревини з погляду екологічних та енергетичних показників на всіх етапах життєвого циклу продукту (Life Cycle Assessment, LCA). Ці дослідження допомагають оцінити потенційні екологічні заощадження та визначити оптимальні шляхи зменшення вуглецевого сліду через повторне використання матеріалів.
- Аналіз методів та розроблення технологій, що дозволяють ефективно збирати, обробляти та повторно використовувати вживану деревину.

Аналіз статей науковців з перероблення вживаної деревини для виготовлення виробів з деревини та конструкційних матеріалів зазвичай охоплює дослідження, що включають технічні можливості, екологічні переваги, економічну ефективність та інноваційні підходи:

- Використання механічних, хімічних та біологічних методів для видалення забруднень та обробки матеріалу.
- Розробка ефективних технологій для виготовлення високоякісних виробів з вживаної деревини [12, 16, 17, 19, 32, 40, 42, 43, 44, 45, 47, 52].
- Вивчення фізичних та механічних властивостей переробленої деревини для забезпечення її використання в конструкціях [7, 9, 30, 39, 46].
- Аналіз переваги щодо зменшення потреби у вирубці нових дерев для виробництва конструкційних матеріалів : столярних плит [16, 17, 19, 21, 23-24, 27, 28, 30, 33, 38, 48], меблевих щитів [18, 21, 25, 41, 44, 53].
- Аналіз переваги щодо використання вже існуючих матеріалів допомагає знизити вуглецевий слід виробництва.

- Аналіз мінімізації відходів шляхом використання старих матеріалів.
- Порівняльний аналіз витрат на виготовлення виробів з вживаної деревини порівняно з новими матеріалами.
- Розроблення нових композитних матеріалів, які використовують вживану деревину у поєднанні з іншими матеріалами.

Як показав **аналіз наукових статей щодо зрощування** дерев'яних бруско-вих елементів на зубчастий шип для отримання якісних та міцних заготовок, то тут розглядаються зазвичай такі ключові аспекти:

- Визначення параметрів для забезпечення максимальної міцності з'єднання.
- Вивчення впливу різних клеїв на міцність і тривалість з'єднання.
- Методи підготовки поверхонь для поліпшення адгезії і якості з'єднання.
- Аналіз результатів випробувань на показник міцності при статичному згині.
- Оцінка стійкості з'єднань до впливу зовнішніх чинників, таких як волога, температура та механічні навантаження.
- Дослідження процесів адгезії між дерев'яними елементами та клеєм для забезпечення максимальної міцності з'єднання.
- Розробка математичних моделей для опису процесу зрощування та прогнозування його властивостей [13, 18, 23, 32, 34, 50].

Аналіз наукових праць підтвердив актуальність цих питань, оскільки вирішення буде сприяти розвитку ефективних та сталих методів перероблення ВЖД на високоякісні заготовки та вироби. Але відсутність перевірених показників, в тому числі на міцність при статичному згині для зрощених елементів, вимагають експериментальних досліджень. Тому, безперечно, розроблення практичних рекомендацій є основою для швидкого впровадження ВЖД в технологічні процеси.

Методика досліджень. Загальна методика досліджень включає: заготівлю; очищення та сортування; технологічні операції з виготовлення розмірно-придатних брусків із ВЖД ялиці, зрощених елементів; випробування для визначення показників міцності при статичному згині.

Матеріали для проведення досліджень – це заготовки ВЖД породи ялина, клей ПВА компанії Jowat. Рейки виготовлялись поперечним розміром 22×28, 22×42, 22×56 мм. Після склеювання одержували калібровані зрощені елементи товщиною 20 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 $N=2^2+2 \cdot 2=8$. Оскільки на основі пошукового експерименту визначено, що в кожному досліді було проведено п'ять спостережень, тобто кількість спостережень в експерименті дорівнює $8 \times 5=40$.

У результаті досліджень явища з літературних джерел, практичного досвіду і теоретичного аналізу досліджень було вибрано область експерименту (табл. 1). Змінними факторами для зрощених елементів із ВЖД були ширини брусків 28, 42, 56 мм (В) та довжина зубчастих шипів в брусках 10, 20, 30 мм (D_H).

Вихідним параметром було значення межі міцності при статичному згині зрощених елементів із ВЖД ялиці.

Таблиця 1. Матриця В-плану для двох змінних факторів

№ досліду	Значення вхідних факторів у досліді			
	У натуральному позначенні		У кодованому позначенні	
	B	D	x ₁	x ₂
ПФП 2 ^k	28	10	-1	-1
	56	10	1	-1
	28	30	-1	1
	56	30	1	1
Зіркові точки	28	20	-1	0
	56	20	1	0
	42	10	0	-1
	42	30	0	1

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

Результати (Results). Згідно методики досліджень було виготовлено експериментальні зрізані елементи із ВЖД ялиці (рис. 1) для подальшого дослідження та порівняльного аналізу шляхом випробування на межу міцності при статичному згині.

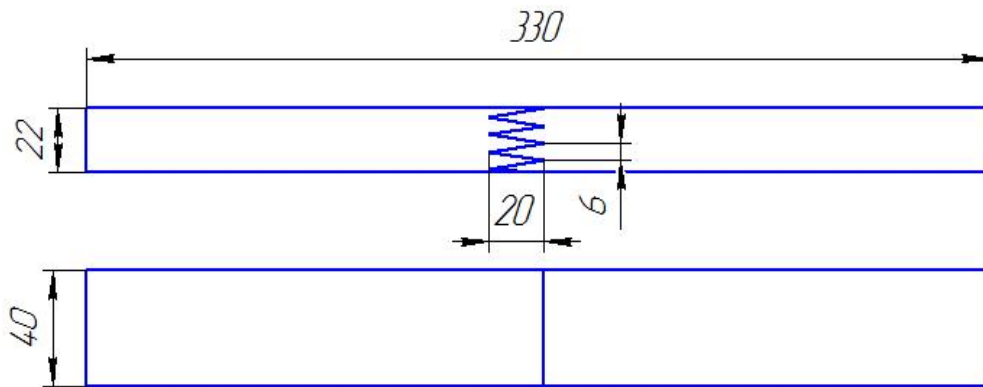


Рис. 1. Конструкція зрізаної заготовки із ВЖД товщиною 22 мм

Результати експериментальних випробувань на впливу ширин брусків та довжини зубчастих з'єднань на показники міцності при статичному згині зрізаних елементів із ВЖД ялиці представлено у табл. 2.

Таблиця 2. Розрахунок середніх значень та дисперсії

№	Результати у _{ij} показника міцності при статичному згині конструкцій 33 із ВЖД ялиці, МПа					Середнє значення в j-ій вибірці	Дисперсія в j-ій вибірці
	у _{1j}	у _{1j}	у _{1j}	у _{1j}	у _{1j}		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	52,125	51,856	52,223	52,023	51,981	52,042	0,0196
2.	62,125	62,224	61,956	61,992	62,234	62,106	0,0165
3.	58,223	58,105	58,118	58,426	58,324	58,239	0,0188
4.	72,325	72,256	72,411	72,199	72,204	72,279	0,0080
5.	55,238	55,401	55,329	55,288	55,196	55,290	0,0063
6.	67,452	67,225	67,288	67,193	67,205	67,273	0,0114
7.	57,899	58,112	57,944	57,875	57,924	57,951	0,0088
8.	66,125	66,129	65,988	65,859	66,009	66,022	0,0125
	Сума					491,200	0,1019

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

Підставивши дані у формулу 1 отримаємо значення дисперсії відтворюваності: $S_y^2 = 0,1019/8=0,01273$. 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 математичної моделі

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	62,101	0,115	знач.	61,99	62,22
b_1	6,014	0,042	знач.	5,97	6,06
b_2	4,074	0,042	знач.	4,03	4,12
b_{11}	-0,820	0,089	знач.	-0,91	-0,73
b_{22}	-0,115	0,089	знач.	-0,20	-0,03
b_{12}	0,994	0,051	знач.	0,94	1,05

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

Таблиця 3. Розрахунок дисперсії адекватності

№ досліду	$\bar{y}_j$	y_j^p	$(\bar{y}_j - y_j^p)^2$
1.	52,04	52,07	0,0009
2.	62,11	62,11	0,0001
3.	58,24	58,23	0,0001
4.	72,28	72,25	0,0009
5.	55,29	55,27	0,0005
6.	67,27	67,30	0,0005
7.	57,95	57,91	0,0014
8.	66,02	66,06	0,0014
Сума			0,0060

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

$$S_{ad}^2 = 5/(8-7) \times 0,0060 = 0,03.$$

$$\text{Розрахункове значення критерію Фішера: } F_{\text{розн.}} = \frac{S_{\text{більша}}^2}{S_{\text{менша}}^2} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \quad (4)$$

Підставивши дані у формулу 4 отримаємо розрахункове значення критерію Фішера $F_{\text{розн.}}$: $F_{\text{розн.}} = 0,03/0,01273=2,341$. Табличне значення критерію Фішера $F_{\text{табл.}}$, яке залежить від рівня значимості $q=5\%$, числа ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ad}=8-7=1$ та числа належних оцінок дисперсії відтворюваності $f_y=8*(5-1)=32$: $F_{\text{табл.}}=252$. Оскільки, $2,341 < 252$ ($F_{\text{розн.}} < F_{\text{табл.}}$), 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 розмірно-придатних брусків з ялиці $B(x_1)$ та довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$.

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

$$y = 62,101 + 6,014x_1 + 4,074x_2 - 0,82x_1^2 - 0,115x_2^2 + 0,994x_1x_2$$

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

$$\sigma_u = 4,18 + 0,556 B + 0,146 D - 0,0032 B^2 - 0,00115 D^2 + 0,0071 B D.$$

Отже, ширина розмірно-придатних брусків та довжини зубчастих шипів в брусках в конструкції ЗЗ із ВЖД ялиці суттєво впливає на межу міцності під час статичного згину σ_u . Обидва змінних фактори впливають прямопропорційно. Найбільше на межі міцності під час статичного згину σ_u ЗЗ із ВЖД ялиці впливає перший фактор B (x_1) – ширина розмірно-придатних брусків. Вплив другого фактору довжини зубчастих шипів в брусках D (x_2) на межі міцності під час статичного згину σ_u у порівнянні з першим є в 1,5 ($6,014/4,074$) рази меншим. Графічна інтерпретація залежностей на рис. 2 та рис. 3.

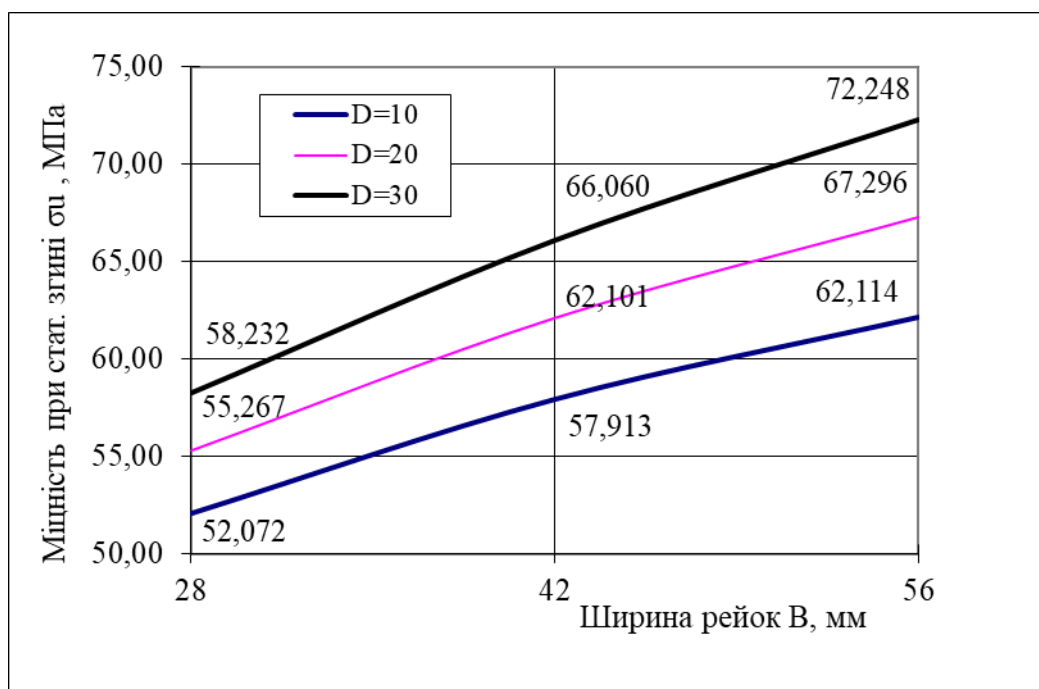


Рис. 3. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини брусків з ялиці $B(x_1)$ в конструкції зрощених заготовок з ялиці

Як видно з рис. 2, збільшення ширини рейки з ялиці $B(x_1)$ в конструкції ЗЗ із ВЖД призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 16,17 до 19,40 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу довжини зубчастих шипів в брусках D (x_2) на збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u є менш суттєвою (від 10,58 до 14,03 %). (рис. 3). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків, задовольняють нормативні вимоги для первинної деревини ялиці (84,5 МПа).

За результатами експерименту здійснено оптимізацію ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B(x_1)$ та довжини зубчастих шипів в брусках D (x_2) за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 72,2478$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B(x_1) = 56$ мм та довжини зубчастих шипів в брусках D (x_2) = 30 мм (рис. 4).

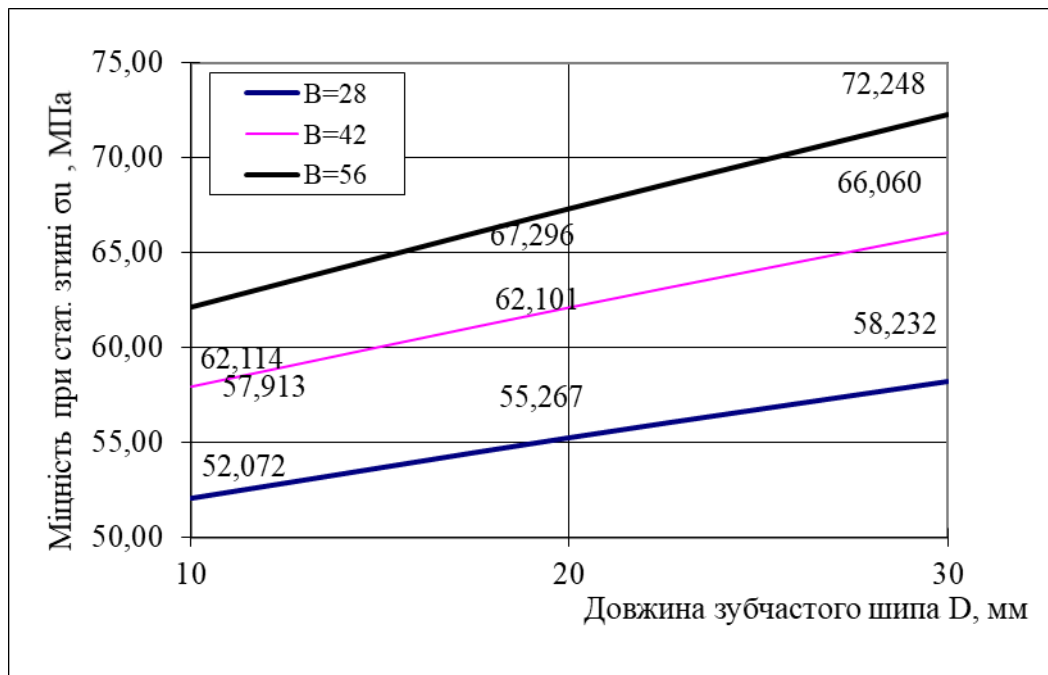


Рис. 3. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від довжини зубчастих шипів в брусах D (x_2) в конструкції зрощених заготовок з ялиці

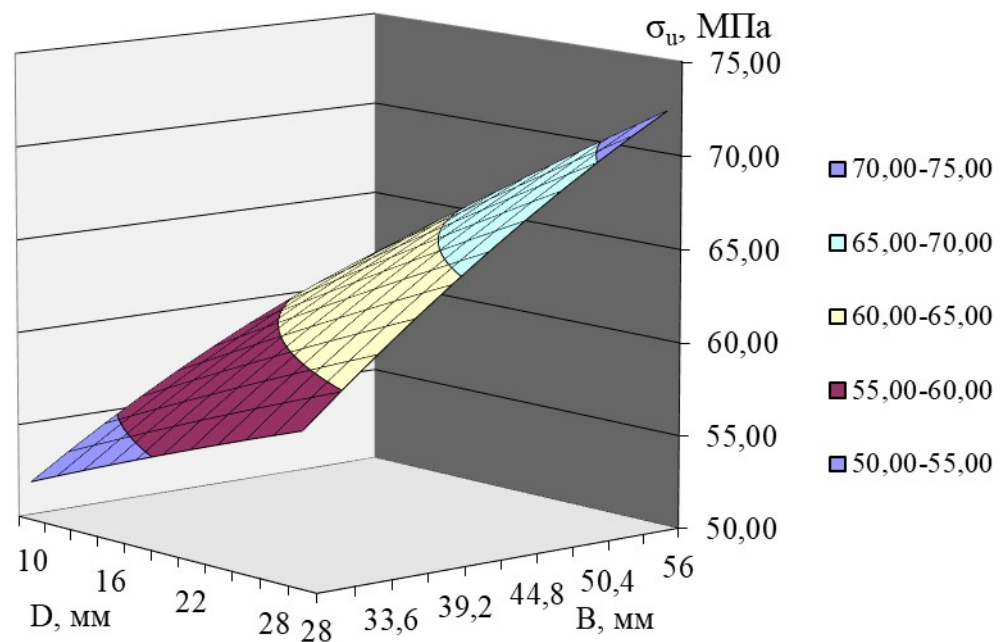


Рис. 4 Графічна залежність $\sigma_u = f(B(x_1), D(x_2))$

Дискусія. Обґрунтовано, що потенційним джерелом деревинної сировини є різні деревинні відходи, зокрема, вживана деревина. Запропоновано використовувати у технологічних процесах деревообробки на підставі системного аналізу очищену ВЖД в масивному вигляді – для виробництва зрощених заготовок.

Визначено експериментальним шляхом межу міцності під час статичного згину для 33 із ВЖД ялиці та побудовано математичну (регресійну) модель залежно від ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B(x_1)$ та довжини зубчастих шипів в брусах D (x_2). Отримана модель є адекватною, а отже може бути використана для опису об'єкта дослідження. Визначено, що ширина рейки з ялиці $B(x_1)$ в конструкції 33 із ВЖД призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 16,17 до 19,40 %). Натомість, тенденція щодо залежності

впливу довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$ на збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u є менш суттєвою (від 10,58 до 14,03 %). (рис. 3). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків, задовольняють нормативні вимоги для первинної деревини ялиці (84,5 МПа).

Визначено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 72,2478$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $V(x_1) = 56$ мм та довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2) = 30$ мм. Крім того, одержані результати міцності ЗЗ із ВЖД на статичний згин були порівняні з результатами досліджень, зазначених інших в наукових працях, присвячених використанню вживаної деревини для створення зрощених заготовок. Встановлено, що підбір довжини зубчастого шипа для зрощування брусків є визначальним для забезпечення відповідної міцності. Виявлено, що збільшення довжини шипа від 10 до 20 мм приводить до зростання межі міцності при статичному згині на 5,78 %, а від 10 до 30 мм – на 10,58 %. З практичного досвіду рекомендовано використовувати вживану деревину для виробництва зрощених заготовок з перерізом розмірно-придатних брусків у відношенні не більшим 1:3. Розроблено практичні рекомендації для виробництва ЗЗ із ВЖД: вологість розмірно-придатних брусків – 8 ± 2 %; для розмірно-придатних брусків: ширина становить 2-3 товщини мм; витрата клею для зрощування – 120-150 г/м²; температура вайми для зрощування – 80-90 °С; час витримки під тиском для щита – 12-30 с; тиск для змикання брусків – 0,6-1,8 МПа. У підсумку можна зазначити, що результати досліджень підтверджують доцільність використання вживаної деревини для виготовлення зрощених заготовок, але для отримання високих показників міцності необхідно дотримуватись запропонованих практичних рекомендацій.

Висновки.

1. Обґрунтовано доцільність використання розмірно-придатних брусків елементів вживаної деревини для отримання зрощених заготовок для виготовлення виробів з деревини. Підготовлено зрощені заготовки із вживаної деревини (ЗЗ із ВЖД) ялиці шляхом реалізації В-плану другого порядку, де змінними були ширина розмірно-придатних брусків та довжина зубчастих шипів в брусках. Визначено експериментальним шляхом межю міцності під час статичного згину для ЗЗ із ВЖД ялиці та побудовано адекватну математичну (регресійну) модель залежно від ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $V(x_1)$ та довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$. Визначено, що ширина рейки з ялиці $V(x_1)$ в конструкції ЗЗ із ВЖД призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 16,17 до 19,40 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$ на збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u є менш суттєвою (від 10,58 до 14,03 %).

2. Виявлено, що збільшення довжини зубчастого шипа ЗЗ із ВЖД ялиці від 10 до 20 мм приводить до зростання межі міцності при статичному згині на 5,78 %, а від 10 до 30 мм – на 10,58 %.

3. Встановлено, що отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків ЗЗ із ВЖД ялиці не залежно від їх конструкції, задовольняють нормативні вимоги для первинної деревини ялиці (84,5 МПа). Встановлено за результатами експериментальних досліджень, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 72,2478$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $V = 56$ мм та довжини зубчастих шипів в брусках $D = 30$ мм

4. З практичного досвіду рекомендовано використовувати ВЖД для виробництва зрощених заготовок з перерізом розмірно-придатних брусків у відношенні товщина-ширина не більшим 1:3 з довжиною зубчастого шипа для заготовок ґратчастих меблів – 30 мм, а для меблевого щита та столярної плити – 10 мм.

References

1. **Circular economy** industry platform. <http://www.circulary.eu/project/renault-closed-loop>.
2. **Gayda S.V.** (2017). Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhvyvanoyi derevyyny 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>
3. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / *Materials for the Production of wood Productss*. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
4. **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.
5. **Gayda, S.V.** (2010). A comparative analysis of physical and mechanical parameters of variously designed glued boards made of post-consumer recovered wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 36:81-91.
6. **Gayda S.V.** (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture Production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 33:73-79 (in Ukrainian).
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.** (2013). 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).
9. **Gayda S.V.** (2013). The technological solutions for recycling of post-consumer wood. *Proceedings of I International Interdisciplinary Scientific Conference Formation of stable outlook as the basis of sustainable development (Ukraine, Lviv, 14-16 March 2013)* UNFU: Lviv, 5-11.
10. **Gayda S.V.** (2013). Розроблення технології виробництва паливних гранул на основі енергетичного потенціалу вживаної деревини [Development of technology for the production of fuel pellets based on the energy potential of used wood]. *Scientific Bulletin of UNFU* 23.14:83-93. (in Ukrainian).
11. **Gayda S.V.** (2014). *Teoreticheskoye obosnovaniye podkhoda po prognozirovaniyu prochnosti drevesnostruzhechnykh plit iz vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny* [The theoretical rationale for the approach on the prediction the strength of particleboard from recycled wood]. *Actual problems of forest complex* 38:212-216 (in Russian).
12. **Gayda S.V.** (2016): A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood. *ProLigno* 12(1):22-31.
13. **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>
14. **Gayda S.V.** (2016). A form of stability of blockboards made of post-consumer wood. *Actual problems of forest complex*, 46, 148-153 (in Russian).
15. **Gayda S.V.** (2016). Ecological and technological aspects of recycling post-consumer wood for production compacted materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry bulletin of MSFU* 20(3):15-22, (in Russian).
16. **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.
17. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnolohichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya*

vzhyvanoyi 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).

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.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnolohichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya vzhyvanoyi 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).

20. **Gayda S.V.** (2017). Using fuzzy expert systems for decision support in the process of post-consumer wood sorting. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 43, 5-20. <https://doi.org/10.36930/42174301> (in Ukrainian).

21. **Gayda S.V.** (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 44, 15-25. <https://doi.org/10.36930/42184402> (in Ukrainian).

22. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). Bulletin of KhNTUA 197:3-9, (in Ukrainian).

23. **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>

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

25. **Gayda S.V.** (2020). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 46, 54-64. <https://doi.org/10.36930/42204606> (in Ukrainian).

26. **Gayda S.V.** (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 49, 99-114. <https://doi.org/10.36930/42234908> (in Ukrainian).

27. **Gayda S.V., Bilyy Ya.M.** (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).

28. **Gayda S.V.** (2011): The investigation of physical and mechanical properties of wood particleboards made from post-consumer wood. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 37(2):95-110.

29. **Gayda S.V., Dyak, T.II.** (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).

30. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2013). Технология очистки вторично используемой древесины иглофрезерными станками [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK., September 9-11, 2013 – Kostroma. – P. 36-39.

31. **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)

32. **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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.

33. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2020). 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>.

34. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyivosti vzhyvanoyi 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>

35. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 66(212), 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>.
36. **Gayda S.V., Kiyko O.A., Guz, M.M.** (2022): Research of the structure of stump and root-wood for effective use in the production of wood products. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2022, Vol. 64 (3), 131–142, doi: <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0011>
37. **Gayda S.V.** (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the woodworking and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 4-19 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234901>
38. **Gayda S.V., Lesiv L.E.** (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).
39. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2024). Determination of running time losses in automated processing systems of woodworking, [Оріховський Р.Я., Гайда С.В. Оцінювання ефективності використання робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 41-51 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>
40. **Gayda, S.V., Maksymiv, V.M.** (2007): Analysis, features, problems and experience of the use of additional resources of raw material – wastes and of used wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 33:63-73 [in Ukrainian].
41. **Gayda S.V., Petryshak I.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).
42. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktsiy* [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>
43. **Gayda S.V., Voytovych I.G.** (2017). Durability and stability of elements for beam furniture products made from post-consumer wood are investigated. *Bulletin of KhNTUA*, 189, 62-70 (in Ukrainian).
44. **Gayda, S.V.** (2011). Recycled of post-consumer wood is for the production of particleboard in Ukraine / *Proceedings of the XXI International symposium Adhesives in Woodworking Industry* (Slovakia, Zvolen June 29 – July 01. 2011). TU Zvolen. – P. 108-121.
45. **Gayda, S.V.** (2013). Techniques for utilization of post-consumer wood in the production of fuel pellets and briquettes. *Proceedings of the XXI International symposium Adhesives in Woodworking Industry* (Slovakia, Zvolen June 23-26. 2013). TU Zvolen, 119-130.
46. **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 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204602>
47. **Grytsak S.A., Gayda S.V., Kushpit A.S., Salapak L.V.** (2023): Analysis of the efficiency of structural and technological solutions in the production of component units of lattice furniture products. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 61-72, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234905>
48. **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).
49. **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).
50. **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).

51. 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>.
52. Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V. (2020). The influence of different parameters of stability of production sites on the efficiency of functioning of woodworking production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:49-53 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204605>
53. 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).
54. Project «CircHive. (2022). 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.
55. 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>.
56. Titus, B.D., Brown, K., Helmisaari, HS. et al. (2021). Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energ Sustain Soc* 11, 10. <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.
57. 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>.

UDC 674-419.33:674.8

Post-graduate student L.E. Lesiv;

prof. S.V. Gayda, Doktor of Sciences; senior lecturer L.V. Salapak – UNFU

Development of a mathematical model of the strength of joined preparations from post-consumer fir wood

The expediency of using dimensionally suitable block elements of post-consumer wood for obtaining spliced blanks for the manufacture of wood products is substantiated. Spliced blanks from used fir wood were prepared by implementing the B-plan of the second order, where the variables were the width of dimensionally suitable bars and the length of the toothed spikes in the bars. The limit of strength during static bending for spliced blanks from post-consumer fir wood was determined experimentally and an adequate mathematical (regression) model was built depending on the width of dimensionally suitable fir bars $B(x_1)$ and the length of tooth-shaped spikes in bars $D(x_2)$. It was determined that the width of the fir bar $B(x_1)$ in the construction of the jointed blanks leads to a significant increase in the strength limit during static bending σ_u (from 16.17 to 19.40%). On the other hand, the trend regarding the dependence of the length of toothed spikes in bars $D(x_2)$ on the increase in strength limit during static bending σ_u is less significant (from 10.58 to 14.03%). It was found that an increase in the length of the toothed spike from 10 to 20 mm leads to an increase in the strength limit under static bending by 5.78%, and from 10 to 30 mm – by 10.58%. It was established that the obtained strength limits σ_u for all samples of experimental samples of spliced blanks from post-consumer fir wood, regardless of their design, meet the regulatory requirements for primary fir wood (84.5 MPa). Based on the results of experimental studies, it was established that the maximum value of the strength limit during static bending $\sigma_u = 72.2478$ MPa, taken as an absolute value, can be obtained by fixing the dimensional parameters of the width of dimensionally suitable fir bars $B = 56$ mm and the length of the teeth – those spikes in bars $D = 30$ mm. Based on practical experience, it is recommended to use used wood for the production of jointed blanks with a cross-section of dimensionally suitable bars in the thickness-width ratio of no more than 1:3 with a toothed spike length of 30 mm for lattice furniture blanks, and for furniture panels and joinery boards – 10 mm.

Keywords: post-consumer wood, jointed blanks, mathematical model, technology, strength, gluing, processing, white fir (*Abies alba* Mill), circular economy.