

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МІЦНОСТІ МЕБЛЕВИХ ЩИТІВ ІЗ СКЛЕСНИХ РЕЙОК ДЕРЕВИНИ БУКА

Обґрунтовано та запропоновано на підставі системного аналізу використовувати у технологічних процесах деревообробки короткомірні та розмірно-придатні залишки в масивному вигляді для виробництва МЩ. Виготовлено МЩ із деревини бука, які випробовувались на межу міцності під час статичного згину. Меблеві щити виготовлялись із твердолистяних порід (бука звичайного (*Fagus sylvatica* L.) згідно розробленої методичної сітки експерименту. За отриманими результатами побудовано математичну (регресійну) модель залежності межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$. Отримана модель є адекватною, а отже може бути використана для опису об'єкта дослідження. Визначено, що збільшення витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ в конструкції меблевого щита із деревини бука не призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 0,69 до 3,75 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ на зменшення межі міцності під час статичного згину σ_u є більш суттєвою (від 3,41 до 6,69 %). (рис. 3). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків меблевих щитів із деревини бука, задовольняють нормативні вимоги (15 МПа). За результатами експерименту здійснено оптимізацію межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 21,53$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1) = 280$ г/м² та ширини рейок з деревини бука $S(x_2) = 38,43$ мм. Встановлено, що отримані результати щодо міцності МЩ при статичному згині були зумовлені дотриманням наступних режимів (розроблених практичних рекомендацій): початкова вологість рейок – 8 ± 2 %; тиск – 80-110 бар, час витримки – 5-6 хв, температура – 88-92 °С, витрати клею – 170-190 г/м². Крім того, виконані випробування засвідчили, що одержані щитові клеєні одношарові конструкції за величиною межі міцності відповідають вимогам стандарту ДСТУ EN 13353:2009 «Щити дерев'яні. Вимоги».

Ключові слова: меблевий щит, ламель, бук звичайний (*Fagus sylvatica* L.), технологія, склеювання, моделювання, властивості деревини, математична модель, полівінілацетатні клеї, клейове з'єднання деревини, циркулярна економіка, вживана деревина, заготовки, перероблення, міцність, вологість, температура.

Вступ. Застосування твердих листяних порід для виготовлення меблевих щитів має високу *актуальність* через кілька ключових переваг: тверді листяні породи, такі як дуб, ясен, бук, мають високу щільність та міцність [1, 2, 13, 31, 33, 50, 51], що забезпечує стійкість і довгий термін служби меблів; ці породи дерева мають гарну текстуру та природний колір, що робить меблі з них візуально привабливими; використання натуральних матеріалів сприяє зменшенню впливу на довкілля порівняно з синтетичними матеріалами; меблі з твердих листяних порід легко піддаються ремонту, що дозволяє продовжити їх використання; тверді листяні породи менше схильні до вм'ятин, подряпин і інших пошкоджень, що робить їх ідеальними для щоденного використання; завдяки високій щільності, ці породи деревини менше піддаються впливу вологи та температурних змін, що мінімізує ризик деформацій меблевих щитів (МЩ). Попри всі переваги, вартість таких ма-

¹ Подібка Тарас Іванович, аспірант, кафедра технологій меблів та виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-238-45-04, +38-098-415-23-94. Email: t.podibka@nltu.edu.ua; ORCID <https://orcid.org/0009-0008-2335-9223>

теріалів є вищою порівняно з м'якими породами або штучними матеріалами, що може впливати на кінцеву ціну виробів. Але за рахунок своїх властивостей, МЩ з твердих листяних порід залишаються популярними у виробництві високоякісних меблів [1, 7, 10, 14, 19, 43, 44, 45, 46, 48, 51].

Використання вживаної деревини (ВЖД) [12, 13, 18, 25, 36, 39, 40, 52] для створення клеєних щитових конструкцій має низку особливостей та перспектив, які роблять цей підхід привабливим як з економічної, так і з екологічної точки зору [13, 15, 16, 17, 26, 27, 49]: використання ВЖД зменшує потребу у вирубці нових дерев, сприяючи збереженню лісових ресурсів і скороченню кількості відходів; вживана деревина має неповторний характер завдяки своїй історії — патина, тріщини, текстура, що робить кожен конструкцію унікальною і додає вінтажного стилю або ефекту старовини; ВЖД часто вже пройшла через процеси усадки і зміни вологості, тому менш схильна до деформацій, що покращує якість клеєних щитових конструкцій; вживана деревина може містити цвяхи, болти, залишки фарби або лаку, які потрібно ретельно видалити перед використанням. це може збільшити час і вартість обробки; не вся ВЖД підходить для повторного використання через можливі пошкодження, гниття або наявність шкідників. Потрібно ретельно оцінювати стан деревини перед використанням. Вся не кондиційна для енергетичного застосування [4, 6, 49, 52].

Перспективи застосування вживаної деревини для виготовлення меблевих щитів: у зв'язку з посиленням екологічної свідомості серед споживачів та виробників, попит на меблі та конструкції з переробленої деревини постійно зростає; у багатьох країнах існують програми підтримки використання відновлюваних матеріалів, що включає гранти, податкові пільги та інші стимули для компаній, які використовують вживану деревину; з розвитком технологій обробки деревини стає можливим більш ефективно очищення, сортування і обробка ВЖД що полегшує її застосування у виробництві [3, 5, 8, 18, 19, 20, 22, 30, 32, 41, 42]; використання вживаної деревини може бути економічно вигідним, особливо якщо вдається знайти якісний матеріал за низькою ціною. це може зменшити витрати на закупівлю нової деревини; вироби з ВЖД мають особливий шарм і привабливість, що відповідає сучасним тенденціям у дизайні інтер'єрів, де цінується автентичність і історія матеріалу. Таким чином, використання ВЖД для створення клеєних щитових конструкцій, зокрема столярних плит [1, 11, 13, 21, 23, 29, 37, 51] має значний потенціал у майбутньому, особливо в контексті сталого розвитку та зростаючого інтересу до екологічно безпечних та естетично привабливих матеріалів.

Застосування первинної та вживаної деревини бука для створення МЩ має свої проблеми та виклики, які варто враховувати при виробництві. Обидва типи деревини піддаються впливу ринку, що може впливати на їхню доступність і ціну. Незалежно від походження, деревина потребує ретельного контролю якості для запобігання використанню дефектних матеріалів у виробництві меблів.

Проблеми при застосуванні первинної деревини бука: бук — це деревина з високою щільністю, яка піддається значній усадці при зміні вологості. це може призводити до деформацій, тріщин або викривлень готових щитів; бук є досить гігроскопічною породою, що робить його чутливим до змін вологості в навколишньому середовищі. це може впливати на стабільність меблевих щитів; деревина бука має високу щільність і твердість, що ускладнює її механічну обробку,

зокрема пиляння, свердління і фрезерування. це потребує якісного інструменту і ретельної підготовки; первинна деревина бука може бути досить дорогою через обмежену доступність і високу якість сировини, що збільшує загальну вартість виробництва меблевих щитів; для збереження естетичних і фізичних властивостей бука часто необхідне додаткове покриття, наприклад, лаком або маслом, щоб захистити від вологи та механічних пошкоджень.

Проблеми при застосуванні вживаної деревини бука: вживана деревина бука може мати нерівномірну якість через попереднє використання, можливі механічні пошкодження, наявність тріщин, гниття або шкідників; ВЖД часто потребує додаткового очищення від старих фарб, лаків, цвяхів чи інших кріплень, що збільшує трудомісткість і час підготовки матеріалу; часто ВЖД може мати різну структуру, колір і властивості через різні умови експлуатації, що ускладнює створення однорідних меблевих щитів; старі поверхні можуть бути менш сприйнятливими до клеїв, що зменшує якість склеювання та може призводити до розшарування щитів з часом; існує ризик, що у ВЖД можуть залишитись шкідники, які згодом можуть пошкодити готові вироби. Необхідна додаткова обробка для знищення потенційних шкідників.

Наукові праці вчених присвячених характеристикам міцності меблевих щитів отриманих із заготовок вживаної деревини та рейок із первинної деревини породи бук. Серед основних напрямів наукових досліджень вчених необхідно зазначити наступні:

- Дослідження, що порівнюють механічні властивості меблевих щитів, виготовлених з вживаної деревини та первинної деревини бука, включаючи тести на згинання, стискання, розтягування і зсув [9, 21, 24, 34, 35].
- Вивчення адгезії клеїв до вживаної та первинної деревини бука, що впливає на загальну міцність щитів [10, 14, 19, 43, 45, 46].
- Дослідження методів очищення, сушіння і підготовки вживаної деревини, а також їх вплив на механічні властивості меблевих щитів [18, 19, 20, 22, 32].
- Аналіз впливу факторів довкілля (вологість, температура) на меблеві щити з різних типів деревини [15-17, 26, 27, 49].
- Дослідження, що безпосередньо порівнюють міцність, стабільність та інші характеристики щитів, виготовлених з первинної та вживаної деревини бука.

Особливості досліджень щодо побудови математичної моделі міцності меблевих щитів із деревини бука залежно від впливу клею та ширини рейок. Основні особливості досліджень та побудови математичних моделей:

- Моделювання впливу клею: Оцінюється міцність з'єднань між рейками, враховуючи тип клею, час затвердіння, температуру і вологість при склеюванні.
- Моделювання поведінки клеєвого шва: Враховується розподіл напружень у клеєвому шарі та його вплив на міцність щита. Важливо моделювати адгезію і когезію клею, особливо для різних типів навантажень (згин, зсув, розтяг).
- Вплив ширини рейок: Ширина рейок впливає на розподіл напружень у щиті. Ширші рейки можуть бути менш схильні до деформацій, але збільшують ймовірність внутрішніх дефектів (тріщин) [13, 28, 38, 48].
- Формулювання математичних моделей: Використання як лінійних моделей (наприклад, моделей міцності), так і нелінійних (для врахування пластичних деформацій або руйнування клеєвих з'єднань).

Аналіз наукових праць підтвердив актуальність цих питань, оскільки вирішення буде сприяти одержанню якісних МЩ із деревини бука різного походження. Але відсутність перевірених показників, в тому числі на міцність при статичному згині для конкретних порід, зокрема бука, вимагають експериментальних досліджень. Тому, безперечно, розроблення практичних рекомендацій є основою для швидкого їх залучення у виробничі процеси деревообробки.

Методика досліджень. Методика експериментальних досліджень включає: підбір рейок із деревини бука; технологічні операції чотирибічного фрезерування для отримання необхідного поперечного перерізу розміром 24×24, 24×44, 24×64 мм; нанесення клею на крайки рейок; склеювання у ваймах за шириною клеєм ПВА компанії Jowat; витримка отриманих меблевих щитів (МЩ); калібрування МЩ до товщини 20 мм; випробування взірців МЩ для визначення показників міцності при статичному згині.

Змінними факторами були: витрата клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)=140, 210, 280$ г/м² та ширина рейок з деревини бука $S(x_2)=24, 44, 64$ мм. Вихідним параметром було значення межі міцності під час статичного згину σ_u МЩ, отриманого із рейок деревини бука. Загальна кількість спостережень в експерименті становила 40. Область експерименту подана у табл. 1.

Таблиця 1. Матриця В-плану для двох змінних факторів

№ досліду	Значення вхідних факторів у досліді			
	У натуральному позначенні		У кодованому позначенні	
	Q	S	x ₁	x ₂
ПФП 2 ^k	140	24	-1	-1
	280	24	1	-1
	140	64	-1	1
	280	64	1	1
Зіркові точки	140	44	-1	0
	280	44	1	0
	210	24	0	-1
	210	64	0	1

Параметр на межу міцності під час статичного згину для МЩ із склеєних рейок деревини бука визначали на лабораторній випробувальній машині.

Результати (Results). Згідно методики досліджень було виготовлено експериментальні меблеві щити із склеєних рейок деревини бука (рис. 1) для подальшого дослідження та порівняльного аналізу шляхом випробування на межу міцності при статичному згині.



**Рис. 1. Конструкція
меблевого щита із
склеєних рейок дере-
вини бука товщиною
20 мм**

Результати експериментальних випробувань на впливу

ширин брусків та витрати клею на показники міцності при статичному згині меблевих щитів із склеєних рейок деревини бука представлено у табл. 2.

Таблиця 2. Розрахунок середніх значень та дисперсії

№	Результати y_{ij} показника міцності при статичному згині конструкцій МЩ із бука, МПа					Середнє значення в j -ій вибірці	Дисперсія в j -ій вибірці
	y_{1j}	y_{1j}	y_{1j}	y_{1j}	y_{1j}		
1	2	3	4	5	6	7	8
17	20,78	18,82	20,45	20,29	21,27	20,324	0,8488
18	20,78	22,42	22,44	21,44	21,93	21,801	0,4942
19	19,64	17,67	19,80	18,33	19,15	18,916	0,8113
20	21,93	20,78	20,45	19,80	22,09	21,011	0,9586
21	23,07	24,55	21,60	21,67	20,95	22,367	2,0847
22	20,62	20,95	19,96	18,98	20,29	20,160	0,5677
23	21,27	20,78	20,95	20,62	20,95	20,913	0,0589
24	21,93	19,15	19,47	19,80	20,13	20,095	1,1835
						165,59	7,0078

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

Підставивши дані у формулу 1 отримаємо значення дисперсії відтворюваності: $S_y^2 = 7,0078/8 = 0,875975$. 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	21,254	0,955	знач.	20,30	22,21
b_1	0,227	0,349	незнач.	-0,12	0,58
b_2	-0,503	0,349	знач.	-0,85	-0,15
b_{11}	0,009	0,739	незнач.	-0,73	0,75
b_{22}	-0,750	0,739	знач.	-1,49	-0,01
b_{12}	0,154	0,427	незнач.	-0,27	0,58

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

Таблиця 3. Розрахунок дисперсії адекватності

№ досліду	$\bar{y}_j$	y_j^p	$(\bar{y}_j - y_j^p)^2$
17.	20,32	20,94	0,3828
18.	21,80	21,09	0,5072
19.	18,92	19,63	0,5072
20.	21,01	20,39	0,3828
21.	22,37	21,04	1,7712
22.	20,16	21,49	1,7712
23.	20,91	21,01	0,0087
24.	20,09	20,00	0,0087
Сума			5,3397

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

$$S_{ad}^2 = 5/(8-7) \times 5,3397 = 26,7.$$

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

Підставивши дані у формулу 4 отримаємо розрахункове значення критерію Фішера $F_{розр.}$: $F_{розр.} = 26,7 / 0,875975 = 30,48$. 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 $f_y=8*(5-1)=32$: $F_{табл.}=252$. Оскільки, $30,48 < 252$ ($F_{розр.} < F_{табл.}$), тоді регресійна модель адекватна. За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії другого порядку, яке описує залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$.

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

$$y = 21,254 + 0,227x_1 - 0,503x_2 + 0,009x_1^2 - 0,750x_2^2 + 0,154x_1x_2$$

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

$$\sigma_u = 21,85 - 0,002373 Q + 0,11675 S + 0,00000184 Q^2 - 0,001875 S^2 + 0,00011 Q S.$$

Таким чином, два досліджуваних змінних фактори по різному впливають на межу міцності під час статичного згину σ_u , зокрема витрата клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ прямопропорційно, а ширина рейок з деревини бука $S(x_2)$ – оберненопропорційно. Але вплив другого фактору ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ на межу міцності під час статичного згину σ_u у порівнянні з першим $Q(x_1)$ є в 2,2 ($0,503/0,227$) рази більшим.

Графічна інтерпретація залежностей на рис. 2 та рис. 3.

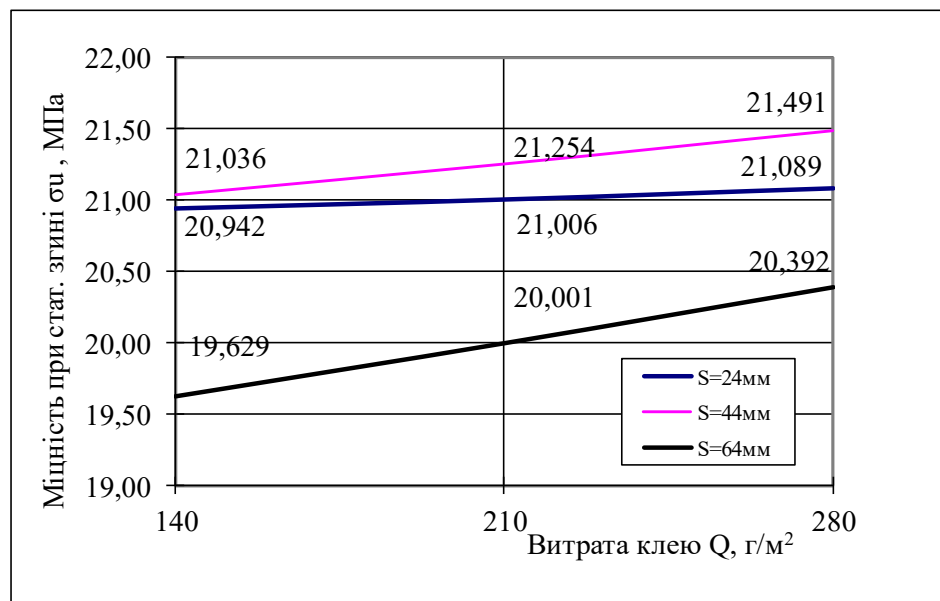


Рис. 2. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ для меблевих щитів із деревини бука

Як видно з рис. 2, збільшення витрати клею при склеюванні рейок на

гладку фугу $Q(x_1)$ в конструкції меблевого щита із деревини бука не призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 0,69 до 3,75 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейок з деревини

бука $S(x_2)$ на зменшення межі міцності під час статичного згину σ_u є більш суттєвою (від 3,41 до 6,69 %). (рис. 3). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків меблевих щитів із деревини бука, задовольняють нормативні вимоги (15 МПа).

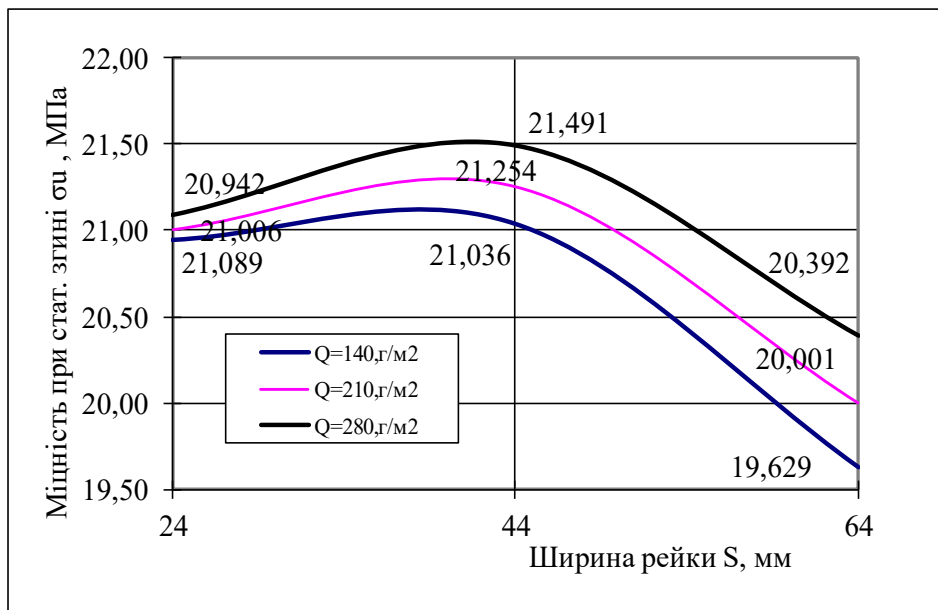


Рис. 3. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини рейок $S(x_2)$ для меблевих щитів із деревини бука

За результатами експерименту здійснено оптимізацію межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склею-

ванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 21,53$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1) = 280$ г/м² та ширини рейок з деревини бука $S(x_2) = 38,43$ мм (рис. 4).

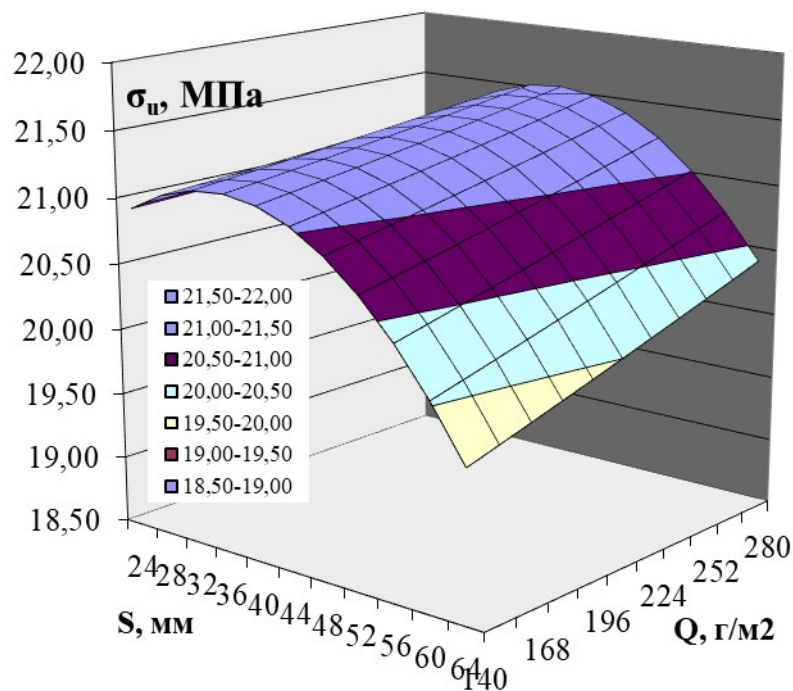


Рис. 4. Графічна залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$

Дискусія. Обґрунтовано та запропоновано використовувати у технологічних процесах деревообробки на підставі системного аналізу короткомірні та розмірно-придатні залишки в масивному вигляді для виробництва МЩ.

Отримані взірці із МЩ випробовувались на межу міцності під час статичного згину. За отриманими результатами побудовано математичну (регресійну) модель залежності межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$. Отримана модель є адекватною, а отже може бути використана для опису об'єкта дослідження. Визначено, що збільшення витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ в конструкції МЩ із деревини бука не призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 0,69 до 3,75 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ на зменшення межі міцності під час статичного згину σ_u є більш суттєвою (від 3,41 до 6,69 %). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків меблевих щитів із деревини бука, задовольняють нормативні вимоги (15 МПа). За результатами експерименту здійснено оптимізацію межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 21,53$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1) = 280$ г/м² та ширини рейок з деревини бука $S(x_2) = 38,43$ мм.

Меблеві щити виготовлялись із твердолистяних порід (бука звичайного (*Fagus sylvatica* L.) згідно розробленої методичної сітки експерименту. Отримані результати щодо міцності МЩ при статичному згині були зумовлені дотриманням таких режимів (розроблених практичних рекомендацій): початкова вологість рейок – 8 ± 2 %; тиск – 80-110 бар, час витримки – 5-6 хв, температура – 88-92 °С, витрати клею – 170-190 г/м². Крім того, виконані випробування засвідчили, що одержані щитові клеєні одношарові конструкції за величиною межі міцності відповідають вимогам стандарту ДСТУ EN 13353:2009 «Щити дерев'яні. Вимоги».

Висновки.

1. Обґрунтовано та запропоновано на підставі системного аналізу використовувати у технологічних процесах деревообробки короткомірні та розмірно-придатні залишки в масивному вигляді для виробництва МЩ.

2. Виготовлено МЩ із деревини бука, які випробовувались на межу міцності під час статичного згину. Меблеві щити виготовлялись із твердолистяних порід (бука звичайного (*Fagus sylvatica* L.) згідно розробленої методики експерименту.

3. За отриманими результатами побудовано математичну (регресійну) модель залежності межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$. Отримана модель є адекватною, а отже може бути використана для опису об'єкта дослідження. Визначено, що збільшення витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ в конструкції МЩ із деревини бука не призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 0,69 до 3,75 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ на зменшення межі міцності під час статичного згину σ_u є більш суттєвою (від 3,41 до 6,69 %). (рис. 3). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків МЩ із деревини бука, задовольняють нормативні вимоги (15 МПа).

4. За результатами експерименту здійснено оптимізацію межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 21,53$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши витрати клею при склеюванні рейок $Q(x_1) = 280$ г/м² та ширини рейок з деревини бука $S(x_2) = 38,43$ мм.

5. Встановлено, що отримані результати щодо міцності МІЦ при статичному згині були зумовлені дотриманням наступних режимів (розроблених практичних рекомендацій): початкова вологість рейок – 8 ± 2 %; тиск – 80-110 бар, час витримки – 5-6 хв, температура – 88-92 °С, витрати клею – 170-190 г/м². Крім того, виконані випробування засвідчили, що одержані щитові клеєні одношарові конструкції за величиною межі міцності відповідають вимогам стандарту ДСТУ EN 13353:2009 «Щити дерев'яні. Вимоги».

References

1. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Products. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
2. **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>
3. **Gayda S.V.** (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture production // Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry. – Lviv. – 33:73-79. (in Ukrainian.).
4. **Gayda S.V.** (2012). Production techniques and properties of fuel pellets produced from post-consumer wood // Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry. – Lviv: UNFU. – 38: 112-150.
5. **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.
6. **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).
7. **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).
8. **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).
9. **Gayda S.V.** (2017): Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhvyvanoyi 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>
10. **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 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184402>.
11. **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>
12. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). Bulletin of KhNTUA 197:3-9, (in Ukrainian).
13. **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).
14. **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).

15. **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).
16. **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>
17. **Gayda S.V.** (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 4-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245001>
18. **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.
19. **Gayda S.V., Ilkiv M.M.** (2021) : Дослідження технологічних процесів виготовлення меблевих фасадів з масивної деревини // *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya meblevykh fasadiv z masyvnoyi derevyny*. [Research of technological processes of manufacture of meble facades from solid wood]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:22-33, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214703>
20. **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.
21. **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)
22. **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>.
23. **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>.
24. **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>
25. **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>.
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*, 2022, Vol. 64 (3), 131–142, doi: <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0011>
27. **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).
28. **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).
29. **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. doi: <https://doi.org/10.36930/42164206>
30. **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).

31. **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, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214708>
32. **Gayda S.V., Voronovich V.V.** (2011). Investigation of the features of bending of post-consumer wood // *Proceedings of the Conference, Mari State University*. – 190-192 (in Russian).
33. **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>
34. **Gayda, S.V.** (2015). Investigation of physical and mechanical properties of post-consumer wood (PCW). *Actual problems of forest complex* 43:175-179 (in Russian).
35. **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>
36. **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>
37. **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).
38. **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, [Лесів, Л.Е., Гайда, С.В., Салапак, Л.В. Розроблення математичної моделі міцності з'єднаних заготовок із вживаної деревини ялини]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 16-28 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245002>
39. **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).
40. **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).
41. **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>
42. **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>
43. **Podibka T.I.** (2018). Constructions and technological aspects of furniture panels in regulatory documents. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 83-90. <https://doi.org/10.36930/42184411> (in Ukrainian).
44. **Podibka T.I.** (2020). A investigation of form of stability of variously designed furniture board made of pine wood of different constructions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 108-120. <https://doi.org/10.36930/42204613> (in Ukrainian).
45. **Podibka T.I.** (2021). Development of mathematical models for predicting dimensional stability of furniture boards using the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 73-91. <https://doi.org/10.36930/42214809> (in Ukrainian).
46. **Podibka T.I.** (2022). Determination of the regulations of the influence of the characteristics of the rails on the form resistance of furniture panels made of beech wood of different constructions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 40-56. <https://doi.org/10.36930/42214804> (in Ukrainian).

47. **Podibka T.I.** (2022). Mathematical model for calculating the economic efficiency of the process of manufacturing defect-free sections for shape-resistant furniture panels. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 57-68. <https://doi.org/10.36930/42214805> (in Ukrainian).
48. **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).
49. **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.
50. **Vintoniv I.S., Sopushynskyy I.M., Teishinger A.** (2007). *Derevynoznavstvo* [Wood-science]. – Lviv: Apriori. – 312 p., (in Ukrainian).
51. **Voytovych I.G.** (2010). *Osnovi tekhnologii virobiv z derevini* [The basic technology of wood]. – Textbook. – Lviv: Kraine andeljat. – 304 p. (in Ukrainian).
52. **Гайда С.В. Максимів В.М., Кійко О.А., Ференц О.Б.** Залишки деревини та деревина після споживання. Класифікація. Терміни та визначення / Договір № 08.24-11-1 : проект міжнародного стандарту ISO. – Львів: НЛТУ України. – 2013. – 53 с.

UDC 684.41

Assist. T.I. Podibka – UNFU

CONSTRUCTION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE STRENGTH OF FURNITURE PANELS MADE OF GLAMINATED BEECH LAWS

It is substantiated and proposed on the basis of a system analysis to use in the technological processes of woodworking short-sized and dimensionally suitable residues in a massive form for the production of furniture boards. Furniture boards was made from beech wood, which was tested to the limit of strength during static bending. The furniture boards were made of hard-leaved species (common beech (*Fagus sylvatica* L.) according to the developed methodological grid of the experiment. Based on the obtained results, a mathematical (regression) model of the dependence of the strength limit during static bending σ_u on the consumption of glue when gluing the rails to a smooth surface was built of the joint $Q(x_1)$ and the width of the beech wood slats $S(x_2)$. The obtained model is adequate, and therefore can be used to describe the object of the study (x_1) in the design of the furniture board made of beech wood does not lead to a significant increase in the strength limit during static bending σ_u (from 0.69 to 3.75%). Instead, the trend of the influence of the width of the beech wood slats $S(x_2)$ on the reduction of the strength limit during static bending σ_u is more significant (from 3.41 to 6.69%) (Fig. 3). requirements (15 MPa). According to the results of the experiment, the strength limit during static bending σ_u was optimized from the consumption of glue when gluing the rails to a smooth joint $Q(x_1)$ and the width of the beech wood rails $S(x_2)$ using the gradient method, as a result of which it was found that the maximum value of the limit strength during static bending $\sigma_u = 21.53$ MPa, taken as an absolute value, can be obtained by fixing the consumption of glue when gluing the rails to a smooth joint $Q(x_1) = 280$ g/m² and the width of the rails from beech wood $S(x_2) = 38,43$ mm. It was established that the obtained results regarding the strength of the furniture boards during static bending were conditioned by the following regimes (developed practical recommendations): initial humidity of the rails - 8±2%; pressure - 80-110 bar, exposure time - 5-6 min, temperature - 88-92 °C, glue consumption - 170-190 g/m². In addition, the performed tests proved that the obtained panel-glued single-layer structures meet the requirements of the DSTU EN 13353:2009 standard "Wooden panels" in terms of the strength limit. Requirements".

Keywords: furniture panel, lamella, common beech (*Fagus sylvatica* L.), technology, gluing, modeling, wood properties, mathematical model, polyvinyl acetate adhesives, wood adhesive joint, circular economy, post-consumer wood, blanks, processing, strength, humidity, temperature.