



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

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.36930/412617>
Article received 2025.12.03
Article revised 2026.03.30
Article accepted 2026.04.16
Article published 2026.05.22

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Pavlo Bekhta
bekhta@ukr.net
103 General Chuprynka St.,
Lviv, 79057, Ukraine

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



УДК 674-419.32

Механічні властивості стружкових плит із частковою та повною заміною деревини жомом цукрових буряків

В.В. Гаманчук¹, П.А. Бехта², В.О. Маєвський³, Т. Піпішка⁴, Й. Рагель⁵, Я. Гофман⁶

Зростання попиту на деревину та підвищення її вартості загострює конкуренцію за сировину, що ускладнює сталий розвиток деревообробної промисловості. Ситуація, що склалася, стимулює пошук альтернативних джерел сировини для часткової або повної заміни деревини у виробництві деревинних композиційних матеріалів. Використання агровідходів дає змогу зменшити залежність від деревини, скоротити виробничі витрати та знизити негативний вплив на довкілля, одночасно створюючи додаткову економічну цінність із відходів сільськогосподарського виробництва. Мета роботи полягає у з'ясуванні впливу часткової чи повної заміни деревної стружки жомом цукрових буряків (ЖЦБ) на механічні властивості стружкових плит. Виготовляли одношарові плити з номінальною щільністю 600 та 750 кг/м³ з різними об'ємними співвідношеннями деревини та ЖЦБ: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 та 0:100%. Для склеювання частинок застосовували полімерний дифеніл-метандіізоціанатний (pMDI) клей. Досліджували профіль щільності, міцність під час вигину (MOR), модуль пружності (MOE) та міцність під час розтягу перпендикулярно до площини плити (міцність склеювання) (IB).

¹ Гаманчук Володимир Вікторович – аспірант кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: 24hamanchuk.v@nltu.lviv.ua ORCID <http://orcid.org/0009-0004-9413-9990>

² Бехта Павло Антонович – академік Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: bekhta@ukr.net ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4320-5247>

³ Маєвський Володимир Олександрович – доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту деревообробних технологій і дизайну, професор кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: volodymyr_mayevskyy@nltu.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5820-9454>

⁴ Томаш Піпішка – доктор філософії, науковий працівник кафедри науки про деревину і деревообробних технологій. Університет Менделя в Брно, Zemědělská 1, Брно, 613 00, Чехія. E-mail: tomas.pipiska@mendelu.cz ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8096-4376>

⁵ Йозеф Рагель – доктор природничих наук, доцент кафедри науки про деревину і деревообробних технологій. Університет Менделя в Брно, Zemědělská 1, Брно, 613 00, Чехія. E-mail: jozef.rahel@mendelu.cz ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2850-8039>

⁶ Якуб Гофман – інженер кафедри науки про деревину і деревообробних технологій. Університет Менделя в Брно, Zemědělská 1, Брно, 613 00, Чехія. E-mail: jakub.hofman@centrum.cz

Одношарові плити характеризуються рівномірним профілем щільності без підвищення у поверхневих шарах, що, ймовірно, зумовлено меншою часткою та розміром частинок ЖЦБ. Зі збільшенням вмісту ЖЦБ спостережено зниження показників MOR і MOE. Водночас плити зі 100% ЖЦБ демонструють високу міцність склеювання, що пояснюється доброю адгезією між частинками деревини і ЖЦБ, зокрема завдяки використанню клею рMDI та наявності пектинів і цукрів у ЖЦБ. Показники міцності склеювання (IB) для плит із вмістом ЖЦБ 25–100% відповідають вимогам стандарту EN 312 для типів P1–P5.

За результатами дослідження, часткова або повна заміна деревини на ЖЦБ є ефективним способом підвищення екологічної сталості виробництва стружкових плит, зменшення використання лісових ресурсів та збереження або покращення основних механічних властивостей матеріалу.

Ключові слова: альтернативна сировина; деревинні композиційні матеріали; агровідходи; міцність під час вигину; модуль пружності; міцність склеювання; рMDI клей.

Вступ (Introduction).

Серед деревинних композиційних матеріалів стружкова плита (СП) залишається однією із найпоширеніших у світі та широко застосовується у меблевій, будівельній, транспортній і пакувальній промисловості. За даними FAO, світове виробництво СП у 2024 р. становило 116,6 млн м³, або 29,9% від загального обсягу деревинних композитів (FAOSTAT, 2024a), з переважною часткою в Азії (50,9%), далі – в Європі (37,7%), Америці (9,4%), Африці (1,0%) та Океанії (1,0%). В Україні виробництво СП перевищило 2,6 млн м³, що становить 2,2% світового та 5,9% європейського обсягу.

Основними компонентами стружкових плит є деревинна стружка і клей. Близько 95% використовуваних клеїв містять формальдегід (Dunku, 2003). Найпоширенішими є карбамідоформальдегідні (UF), меламіноформальдегідні (MF) та фенол-формальдегідні (PF) смоли (Dunku, 2003). UF смоли, річне світове споживання яких оцінюється приблизно у 11 млн т, домінують (≈ 85%) завдяки хімічній універсальності, високій реакційній здатності, водорозчинності, низькій температурі та короткому часу пресування, безбарвному шву та відносно низькій вартості.

Вміст деревини у СП становить близько 90%, тому властивості плит значною мірою залежать від типу сировини, що впливає на експлуатаційні характеристики, технологічний процес та собівартість продукції. Матеріальні витрати (клей і стружка) складають основну частку виробничих витрат – 40-60%, в яких вміст клею становить 15-30, стружки – 30-40% (Solt et al., 2019). Серед інших витрат – енергія (15-20%), заробітна плата (5-20%) та операційні витрати (25-30%). Деревинна стружка є другим за вартістю компонентом після клею, її частка у загальних витратах становить близько 20% (Klimek & Wimmer, 2017). При цьому вартість сільськогосподарської біомаси приблизно на 50% нижча ніж деревинної тріски (Klimek & Wimmer, 2017), що

робить її перспективним ресурсом для зниження виробничих витрат.

Серед різноманітних видів агросировини в Україні важливе місце посідає цукровий буряк. У 2023 р. світове виробництво цукрових буряків становило близько 282 млн т, з яких Європа забезпечила 188,5 млн т (≈ 67%), а Україна – 13,1 млн т (≈ 4,7% світового та ≈ 7% європейського виробництва) (FAOSTAT, 2024b). Під час переробки буряка отримують цукор, мелясу, буряковий жом та фільтраційний осад. Буряковий жом (ЖЦБ), який становить 80-83% від маси переробленої сировини, є основним побічним продуктом і створює виробничі та екологічні проблеми, але водночас володіє потенціалом як недеревинна сировина для виробництва стружкових плит.

ЖЦБ багатий на клітковину, його широко використовують у виробництві паперу, синтезі карбоксиметилцелюлози, для отримання целюлозних мікрофібрил та як волокнистий компонент у біорозкладних композитах (Dinand et al., 1999; Finkenstadt et al., 2007; Fišerová et al., 2007; Leitner et al., 2007; Li et al., 2012; Marzo-Gago et al., 2023; Schirp et al., 2024). За результатами досліджень, включення ЖЦБ до полімолочної кислоти (PLA) підвищує механічні властивості та прискорює біодеградацію композитів (Li et al., 2012; Schirp et al., 2024). Використання ЖЦБ для виробництва СП досліджено обмежено: лише в декількох роботах оцінено можливість його застосування (Auriga et al., 2023; Borysiuk et al., 2019; Pinkl et al., 2020; Гаманчук та ін., 2025). У дослідженнях (Auriga et al., 2023; Borysiuk et al., 2019; Pinkl et al., 2020) застосовували UF-смоли, а додавання ЖЦБ підвищувало водопоглинання та набрякання плит. На відміну від попередніх досліджень, у нашому дослідженні (Гаманчук та ін., 2025) для склеювання частинок ЖЦБ з деревинними застосовано полімерний метилендіізоціанатний (рMDI) клей, що дало змогу, навіть за високого вмісту ЖЦБ, значно знизити набрякання плит.

Мета роботи полягає у з'ясуванні впливу часткової або повної заміни деревинної стружки жомом цукрових буряків на механічні властивості стружкових плит з використанням pMDI клею.

Матеріали і методи дослідження (Materials and methods).

Об'єкт дослідження – процес виготовлення стружкових плит із використанням жому цукрових буряків (ЖЦБ). *Предмет дослідження* – механічні властивості стружкових плит, виготовлених із застосуванням ЖЦБ.

Для виготовлення одношарових плит використовували буряковий жом (ЖЦБ) з вологістю $3,11 \pm 0,26\%$ та промислові деревинні частинки (ялина) з вологістю $3,64 \pm 0,13\%$. У дослідках застосо-

ували полімерну дифеніл-метандіізоціанатну (pMDI) смолу (ONGRONAT® WO 2750; Borsod Chem Zrt., Угорщина) з вмістом твердих речовин 100% та в'язкістю 170-230 мПа·с, а також водну емульсію парафінового воску (SVH-60) з вмістом твердих речовин $60 \pm 2\%$ та в'язкістю ~ 24 мПа·с.

Виготовляли одношарові плити розміром $600 \times 600 \times 12$ мм із середньою щільністю 600 та 750 кг/м³. Сировину змішували у співвідношеннях ЖЦБ / деревина: 100:0, 50:50, 0:100, 25:75 та 75:25, усього виготовлено шість варіантів плит – по три плити кожного варіанту (табл. 1). Зразки Е та F складені цілком із ЖЦБ різної щільності (600 та 750 кг/м³), а зразок А – лише з деревини (контрольний).

Таблиця 1. Варіанти виготовлених плит
Table 1. Variants of manufactured boards

Варіант	Щільність плит (кг/м ³)	Співвідношення ЖЦБ : деревина
А	600	0 : 100
В	600	25 : 75
С	600	50 : 50
Д	600	75 : 25
Е	600	100 : 0
F	750	100 : 0

Змішування і нанесення клею виконували в лабораторному барабанному змішувачі з подачею смоли та емульсії парафінового воску через розпилювальні сопла. Килим із частинок формували у лабораторній формі з ламінованої стружкової плити, пресування здійснювали на пресі Strozatech HL 400 Mendel під тиском 3,5 МПа і температурою 180°C (30 с – закривання, 240 с – у робочій позиції, 80 с – для випуску повітря з поступовим зниженням тиску). Після пресування плити витримували у контрольованому середовищі (20°C за відносної вологості 65%) впродовж 14 днів для затвердіння клею та вирівнювання вологості з навколишнім середовищем.

Профілі щільності вимірювали на трьох зразках із кожної панелі ($50 \times 50 \times 12$ мм). Профілі отримували з інтервалом 0,01 мм за товщиною за допомогою рентгенівського аналізатора DPX300-LTE (IMAL, Італія), після чого розраховували середній профіль щільності.

Для плит досліджували модуль пружності (МОЕ), міцність під час вигину (MOR) та міцність на розтяг перпендикулярно до площини плити – внутрішню міцність склеювання (ІВ). МОЕ та MOR визначали відповідно до ДСТУ EN 310 (1993) на п'яти зразках (290×50 мм) із кожної плити. Міцність ІВ визначали згідно з ДСТУ EN 319 (1993) на 15 зразках розміром 50×50 мм. Випробування проводили на універсальній випробувальній машині Zwick® Z050 із програм-

ним забезпеченням testXpert v11.02 та датчиком навантаження 50 кН (Zwick GmbH & Co. KG, Ульм, Німеччина) (рис. 1).

МОЕ (в МПа) кожного випробуваного зразка розраховували за формулою:

$$MOE = \frac{l_1^3 \cdot (F_2 - F_1)}{4b \cdot t^3 \cdot (a_2 - a_1)}, \quad (1)$$

де l_1 – відстань між центрами опор (мм); b – ширина випробуваного зразка (мм); t – товщина випробуваного зразка (мм); $F_2 - F_1$ – приріст навантаження на прямолінійній ділянці кривої навантаження-прогин (N) (F_1 становить приблизно 10%, а F_2 – приблизно 40% від максимального навантаження); та $a_2 - a_1$ – приріст прогину всередині випробуваного зразка (відповідає $F_2 - F_1$).

MOR (в МПа) кожного випробуваного зразка розраховували за формулою:

$$MOR = \frac{3F_{max} \cdot l_1}{2b \cdot t^2}, \quad (2)$$

де F_{max} – максимальне навантаження (Н); l_1 – відстань між центрами опор (мм); b – ширина випробуваного зразка (мм); t – товщина випробуваного зразка (мм).

Міцність на розтяг (в МПа) перпендикулярно до площини плити кожного випробуваного зразка розраховано за формулою:

$$IB = \frac{F_{max}}{a \cdot b}, \quad (3)$$

де F_{max} – розривне навантаження (Н); a та b – довжина і ширина випробуваного зразка (мм).

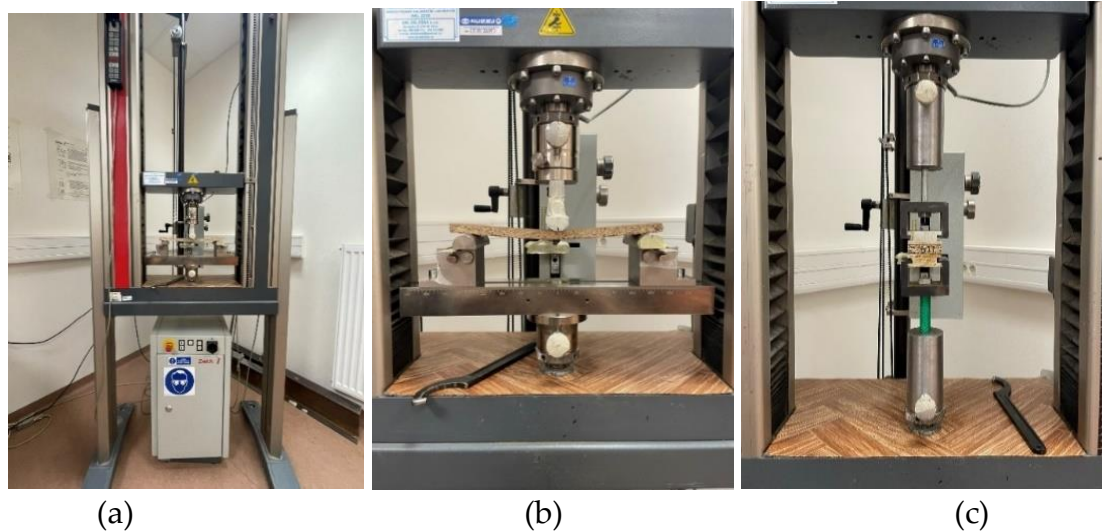


Рис. 1. Випробувальна машина Zwick Z 050 (а), випробування на міцність під час вигину (b) та випробування на міцність склеювання (с)

Fig. 1. Zwick Z 050 testing machine (a), bending strength test (b) and internal bond strength test (c)

Статистичні розрахунки проводили за допомогою MS Excel, а дисперсійний аналіз (ANOVA), доповнений тестом значущості Tukey's (HSD-тест), здійснювали за допомогою програмного забезпечення Statistica 14 (StatSoft Inc., США).

Результати (Results).

Вертикальні профілі щільності продемонстрували надзвичайно рівномірний розподіл щільності по всьому поперечному перерізу для всіх варіантів плит (рис. 2). Одношарові плити характеризувалися плоским профілем щільності з близькими значеннями по всій товщині та без підвищення щільності у поверхневих шарах. Суттєвих коливань щільності за товщиною плит не зафіксовано. Такий рівномірний профіль, ймовірно, зумовлений меншою часткою деревинних частинок і обмеженою варіабельністю розмірів частинок ЖЦБ. Відповідно, відсутня потреба в

концентрації дрібніших частинок у поверхневих шарах, що зазвичай призводить до їх ущільнення та підвищення щільності. Для формування підвищеної щільності у поверхневих шарах дрібні частинки необхідно цілеспрямовано вводити в ці шари на етапі формування килима або додатково подрібнювати ЖЦБ для збільшення варіабельності розмірів частинок. Такі зміни можуть забезпечити формування профілю з ущільненими поверхневими шарами та потенційно покращити механічні властивості плит. Подібні результати наведено у роботі (Borysiuk et al., 2019), де підтверджено, що збільшення вмісту ЖЦБ у внутрішньому шарі впливає на вирівнювання профілю щільності. У нашому дослідженні, за 100% вмісту ЖЦБ щільність внутрішнього шару перевищує щільність поверхневих шарів, особливо за вищої цільової щільності (зразки F).

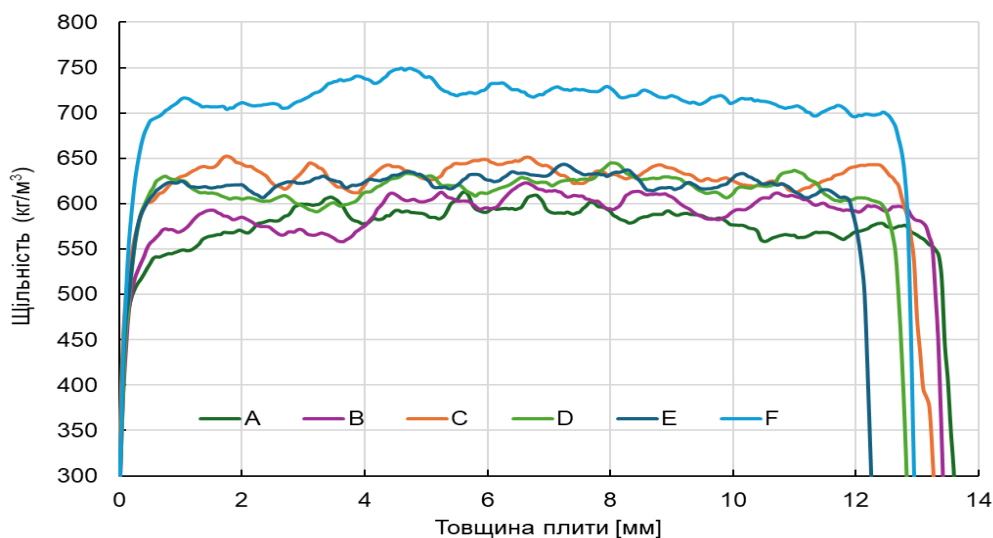


Рис. 2. Профіль щільності протестованих плит

Fig. 2. Density profile of the tested boards

Середні значення механічних властивостей плит наведено в табл. 2. Плити, виготовлені зі 100% ЖЦБ (зразок Е), характеризувалися найнижчими показниками MOR і MOE, тоді як плити, повністю виготовлені з деревинних частинок (зразок А), продемонстрували найвищі значення MOR

і MOE. Різниця між цими плитами була статистично значущою ($p < 0,05$). Зі збільшенням щільності плити з 600 кг/м³ (зразок Е) до 750 кг/м³ (зразок F) спостережено зростання MOR з 1,7 до 2,3 МПа та MOE з 324 до 384 МПа. Однак це зростання не було статистично значущим ($p \geq 0,05$).

Таблиця 2. Механічні властивості випробуваних плит
Table 2. Mechanical properties of tested boards

Варіант	MOR (МПа)	MOE (МПа)	IB (МПа)
A	6,5 ± 0,8 с*	1424 ± 145 с	0,65 ± 0,07 с,d
B	4,9 ± 0,9 b	1039 ± 129 b	0,57 ± 0,05 b
C	4,5 ± 0,9 b	942 ± 143 b	0,76 ± 0,07 e
D	2,1 ± 0,5 a	400 ± 76 a	0,46 ± 0,05 a
E	1,7 ± 0,4 a	324 ± 72 a	0,59 ± 0,08 b,c
F	2,3 ± 0,5 a	384 ± 74 a	0,70 ± 0,10 d,e

*a, b, c, d, e – гомогенні групи згідно з тестом Tukey ($\alpha = 0.05$)

Дискусія (Discussion).

Стружкові плити (плити типу Р1), призначені для загального використання та експлуатації в сухих умовах, повинні мати мінімальне значення MOR 10,5 МПа, тоді як мінімальне значення MOE не регламентується (EN 312:2010). Натомість для плит, призначених для внутрішнього оздоблення (включно з меблями) та використання в сухих умовах (плити типу Р2), мінімальні значення MOR і MOE становлять відповідно 11 МПа та 1800 МПа (EN 312:2010). Наведені на рис. 3 дані підтверджують, що жодна зі стружкових плит з вмістом ЖЦБ не відповідала цим вимогам. Загалом, зі збільшенням частки ЖЦБ спостерігалось зниження показників MOR і MOE, хоча погіршення властивостей відбувалося сту-

пінчасто. Зокрема, не виявлено суттєвих відмінностей у властивостях між плитами В і С, які містили відповідно 25% та 50% ЖЦБ.

Аналогічно, істотних відмінностей не спостережено між плитами D і E, що містили 75% та 100% ЖЦБ. Крім того, плити E і F, які складалися зі 100% бурякового жому, але відрізнялися за щільністю (600 кг/м³ і 700 кг/м³ відповідно), також не показали значущих відмінностей у своїх властивостях. Це дослідження демонструє високої щільності зв'язок ($R^2 = 0,95$) між вмістом бурякового жому та показниками MOR і MOE (рис. 4). Залежність є лінійною, що свідчить про те, що збільшення частки ЖЦБ у стружковій плиті пов'язане зі зміною (зростанням) значень MOR і MOE.

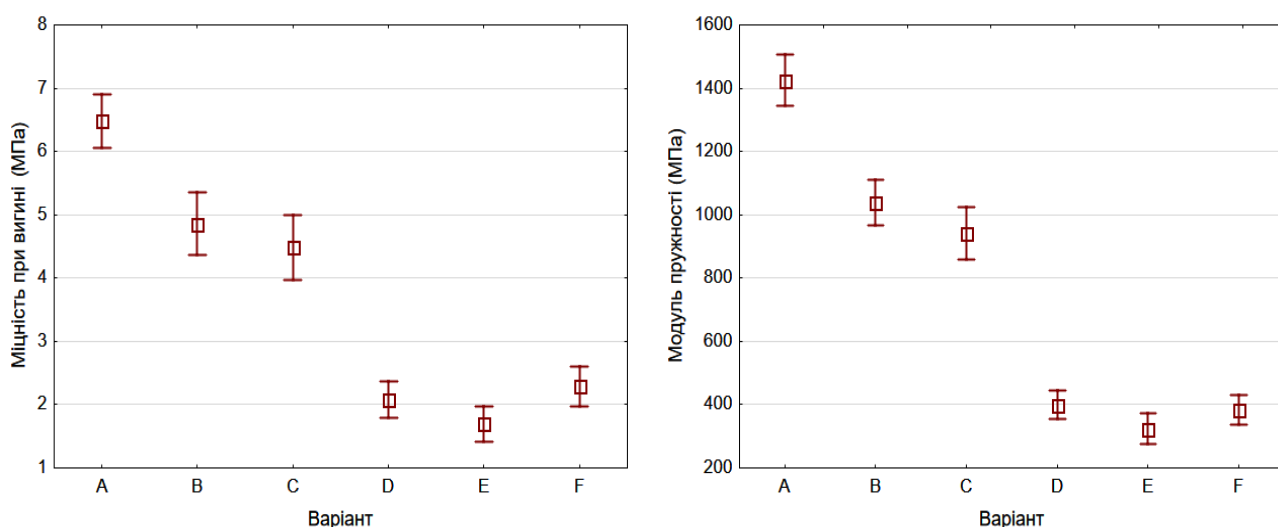


Рис. 3. Міцність під час вигину та модуль пружності випробуваних плит

Fig. 3. Bending strength and modulus of elasticity of the tested boards

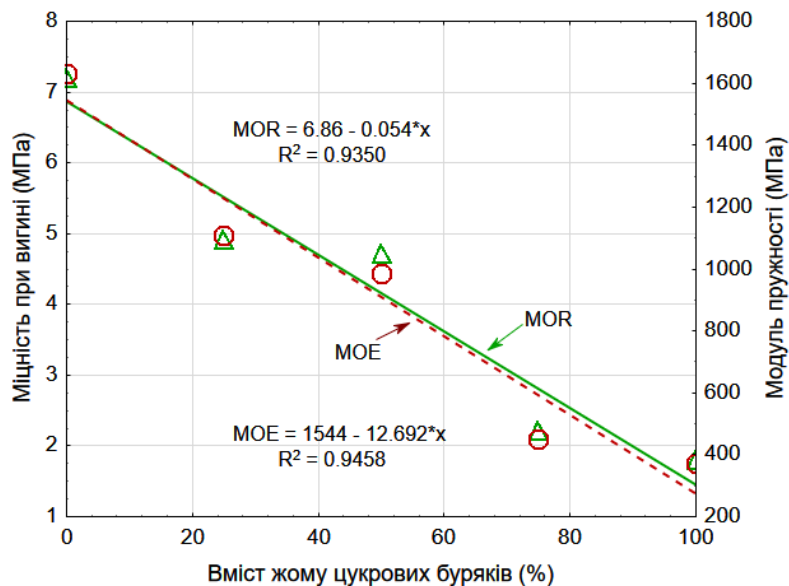


Рис. 4. Кореляція між міцністю плит на вигин, модулем пружності та вмістом жому цукрових буряків
 Fig. 4 Correlation between the bending strength of the boards, the modulus of elasticity, and the content of sugar beet pulp

Найвищі значення MOR та MOE спостережено у плит, які цілком складаються з деревинних частинок. Ситуацію можна пояснити вищою міцністю деревинних частинок порівняно з ЖЦБ, які завдяки своїй витягнутій формі сприяють кращому взаємозв'язку та передачі зусилля. Ця властивість була зменшена у плит з більшою часткою ЖЦБ, оскільки форма волокон целюлози не сприяла ефективній передачі зусилля під навантаженням, що призводило до зниження опору. Крім того, у поперечному перерізі зразків плит з вищим вмістом ЖЦБ було відзначено наявність повітряних проміжків (щілин), що ще більше погіршує їхні механічні властивості.

Отримані результати MOR та MOE є дещо нижчими порівняно з даними, наведеними у роботах інших авторів (Auriga et al., 2023; Borisiuk et al., 2019). Причина може полягати в тому, що в нашому дослідженні виготовляли одношарові плити з меншою щільністю, тоді як інші дослідження (Auriga et al., 2023; Borisiuk et al., 2019) стосувалися тришарових плит з вищою щільністю. Загальновідомо, що щільність є важливим чинником, який визначає властивості деревинних плит. Зазвичай одношарові плити з меншою щільністю демонструють нижчі значення MOR та MOE порівняно з тришаровими плитами з вищою щільністю.

Позитивно сприйнятим результатом стала висока міцність склеювання плит, виготовлених зі 100% ЖЦБ (рис. 5). Високу міцність склеювання плит, що містять ЖЦБ, можна пояснити

міцною адгезією між ЖЦБ та деревинними частинками. Окрім доброї адгезії, яка забезпечується використанням клею pMDI, цей ефект також можна пояснити наявністю пектинів та цукрів у ЖЦБ (Ziemiński et al., 2012), які можуть функціонувати як додаткові адгезійні агенти у складі стружкових плит. Хоча міцність склеювання (ІВ) цих плит (зразок Е) була нижчою (0,59 МПа) порівняно з плитами, виготовленими зі 100% деревинних частинок (зразок А), які мали ІВ 0,65 МПа, ця різниця не була статистично значущою ($p \geq 0,05$). Крім того, збільшення щільності плит, виготовлених зі 100% ЖЦБ (з 600 до 700 кг/м³), призвело до збільшення міцності ІВ на 19% – з 0,59 до 0,70 МПа. Це збільшення виявилось статистично значущим ($p < 0,05$).

Аналіз результатів міцності склеювання (ІВ) показує, що плити, виготовлені з вмістом ЖЦБ від 25 до 100%, відповідають мінімальним вимогам стандарту EN 312. Зокрема, плити відповідали вимогам щодо мінімальної міцності склеювання: 0,28 МПа – для плит типу P1; 0,40 МПа – для плит типу P2 та P4; 0,45 МПа – для плит типу P3 та P5 відповідно до вимог цього стандарту (див. рис. 5). Досягнута міцність склеювання плит з вмістом бурякового жому 25 та 50% була вищою (0,57 МПа і 0,76 МПа відповідно) ніж для ІВ, про які повідомляли Auriga et al. (2023) (0,52 МПа і 0,39 МПа) та Borisiuk et al. (2019) (0,54 МПа і 0,51 МПа). Ця різниця підтверджує кращу адгезійну здатність клею pMDI порівняно з клеєм UF.

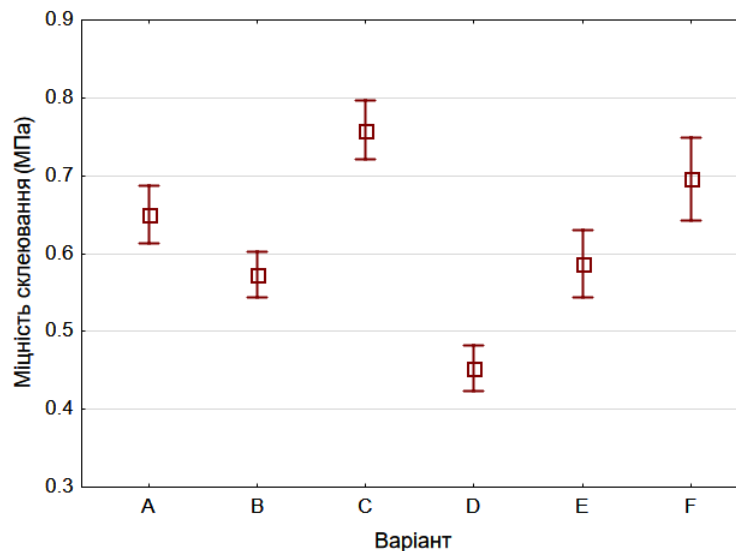


Рис. 5. Міцність склеювання випробуваних плит
Fig. 5. Internal board strength of the tested boards

Хоча додавання жому цукрових буряків покращило міцність склеювання, низька кореляція (рис. 6) між міцністю ІВ та вмістом ЖЦБ свідчить про те, що задовільної міцності ІВ можна досягти з нижчим вмістом ЖЦБ (25% або 50%).

Крім того, цей підхід може призвести до вищих значень MOR та MOE. Нелінійну залежність між кількістю жому цукрових буряків, доданого до плити, та отриманим ІВ було також виявлено Pinkl et al. (2020).

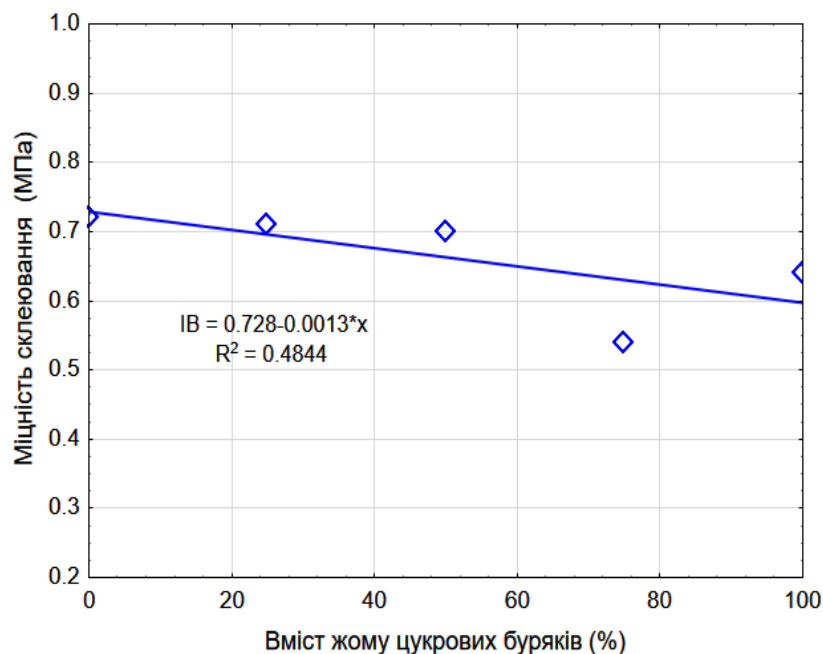


Рис. 6. Кореляція між міцністю склеювання плит і вмістом жому цукрових буряків
Fig. 6. Correlation between the internal bond strength of boards and the content of sugar beet pulp

Висновки (Conclusions).

1. Обґрунтовано доцільність використання ЖЦБ як часткової заміни деревинної сировини у кількості 25–50% під час виробництва стружкових плит, що забезпечує баланс між механічними характеристиками та адгезійними властивостями.
2. Одношарові плити характеризуються рівномірним плоским профілем щільності без вираженого ущільнення поверхневих шарів, що зу-

мовлено особливостями сировинного складу, зокрема меншою часткою деревинних частинок і розмірами частинок ЖЦБ.

3. Зі збільшенням вмісту жому цукрових буряків спостережено тенденцію до зниження показників міцності під час згину (MOR) та модуля пружності (MOE), що свідчить про обмеження його використання у високих концентраціях для забезпечення механічних властивостей плит. Вод-

ночас плити з високим вмістом ЖЦБ, зокрема 100%, демонструють підвищену міцність склеювання (ІВ), що пояснюється ефективною адгезією між компонентами композиції. Важливу роль у цьому відіграє клей рМДІ, а також природні компоненти ЖЦБ (пектини і цукри), які можуть виконувати функцію додаткових зв'язувальних агентів.

4. Плити з вмістом ЖЦБ у межах 25-100% відповідають вимогам стандарту EN 312 щодо мінімальної міцності склеювання для різних типів плит (P1–P5), що підтверджує можливість їх практичного застосування. Збільшення щільності плит з 600 до 700 кг/м³ сприяє підвищенню міцності склеювання (на 19%), що підтверджує доцільність розширення діапазону щільності та пошуку її оптимальних значень як одного із ключових технологічних параметрів.

5. Перспективним напрямом є виготовлення тришарових плит із використанням деревинних частинок у зовнішніх шарах і ЖЦБ – у внутрішньому шарі (до 50%), що дасть змогу покращити експлуатаційні властивості матеріалу. Використання жому цукрових буряків у виробництві стружкових плит сприяє зменшенню залежності від первинної деревини, підвищенню екологічної та ресурсної ефективності галузі.

Конфлікт інтересів (Conflicts of Interest).

Автори заявляють про відсутність у них відомих конкуруючих фінансових інтересів чи особистих зв'язків, які могли б вплинути на результати, представлені у цій статті.

Список літератури (References)

- Auriga, R., Borysiuk, P., Latos, M., Auriga, A., Kwaśny, Ł., & Walkiewicz, J. (2023). Impact of sugar beet pulp share on selected physical and mechanical properties of particleboards. *Forests*, 14(1), 40. <https://doi.org/10.3390/f14010040>
- Borysiuk, P., Jencyk-Tolloczko, I., Auriga, R., & Kordzikowski, M. (2019). Sugar beet pulp as raw material for particleboard production. *Industrial Crops and Products*, 141, 5. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111829>
- Dinand, E., Chanzy, H., & Vignon, R. M. (1999). Suspensions of cellulose microfibrils from sugar beet pulp. *Food Hydrocolloids*, 13(3), 275–283. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(98\)00084-8](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(98)00084-8)
- Dunky, M. (2003). Adhesives in the wood industry. In A. Pizzi & K. L. Mittal (Eds.), *Handbook of adhesive technology* (2nd ed., pp. 872–941). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1201/9780203912225.ch47>
- European Committee for Standardization. (1993). *Particleboards and fibreboards – Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board* (EN 319).
- European Committee for Standardization. (2010). *Particleboards – Specifications* (EN 312).
- European Committee for Standardization. (1993). *Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength* (EN 310).
- Finkenstadt, V. L., Liu, L., & Willett, J. L. (2007). Evaluation of poly (lactic acid) and sugar beet pulp green composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 15, 1–6. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0038-z>
- Fišerová, M., Gigac, J., & Butaš, R. (2007). Influence of sugar beet pulp on bond strength and structure of paper. *Wood Research*, 52(3), 59–74. <https://www.woodresearch.sk/wr/200703/06.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024a). *FAOSTAT data*. Retrieved November 20, 2025, from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024b). *FAOSTAT data*. Retrieved November 20, 2025, from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Hamanchuk, V., Bekhta, P., Pipiška, T., Ráhel', J., & Hofman, J. (2025). Effect of partial and complete replacement of wood particles with sugar beet pulp on the physical properties of particleboards. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 29, 279–289. <https://doi.org/10.36930/412538> [Гаманчук, В., Бехта, П., Піпішка, Т., Рагель, Й., Гофман, Я. (2025). Вплив часткового заміщення деревини жомом цукрових буряків на фізичні властивості стружкових плит. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 29, 279–289] (in Ukrainian)
- Klimek, P., & Wimmer, R. (2017). Alternative raw materials for bio-based composites. In *Proceedings of the international conference "Wood science and engineering in the third millennium" - ICWSE 2017* (pp. 29–44). Brasov, Romania. https://www.researchgate.net/publication/320909417_Alternative_raw_materials_for_bio-based_composites
- Leitner, J., Hinterstoisser, B., Wastyn, M., Keckes, J., & Gindl, W. (2007). Sugar beet cellulose nanofibril-reinforced composites. *Cellulose*, 14, 419–425. <https://doi.org/10.1007/s10570-007-9131-2>
- Li, W., Coffin, D.R., Jin, T.Z., Latona, N., Liu, Ch.-K., Liu, B., Zhang, J., & Liu, L. (2012). Biodegradable composites from polyester and sugar beet pulp with antimicrobial coating for food packaging. *Journal of Applied Polymer Science*, 126, E361–E372. <https://doi.org/10.1002/app.36885>

- Marzo-Gago, C., Díaz, A. B., & Blandino, A. (2023). Sugar beet pulp as raw material for the production of bioplastics. *Fermentation*, 9(7), 655. <https://doi.org/10.3390/fermentation9070655>
- Pinkl, S., Veigel, S., Gindl-Altmutter, W., van Herwijnen, H., & Riegler, M. (2020). Effects of fibrillar cellulosic additives on particleboard production and properties. *Wood Material Science & Engineering*, 17(2), 106–112. <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1786722>
- Schirp, A., Deetz R., Kopitzky, R., & Schirp, C. (2024). Composite sheets based on polylactic acid and sugar beet pulp: A solution to accelerate biological degradation of PLA on soil under outdoor exposure. *Polymer Composites*, 45(16), 15318–15339. <https://doi.org/10.1002/pc.28840>
- Solt, P., Konnerth, J., Gindl-Altmutter, W., Kantner, W., Moser, J., Mitter R., & van Herwijnen, W. G. H. (2019). Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 94, 99–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.04.007>
- Ziemiński, K., Romanowska, I., & Kowalska, M. (2012). Enzymatic pretreatment of lignocellulosic wastes to improve biogas production. *Waste Management*, 32(6), 1131–1137. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.016>

Mechanical properties of particleboards with partial and complete wood particles replacement by sugar beet pulp

V. Hamanchuk¹, P. Bekhta², V. Mayevskyy³, T. Pipiška⁴, J. Ráhel⁵, J. Hofman⁶

The increase in deforestation limits the availability of wood, raises its cost, and intensifies competition for raw materials, which complicates the sustainable development of the wood-based panel industry. This stimulates the search for alternative raw material sources for the partial or complete substitution of wood in the production of wood-based composite materials. The use of agricultural residues makes it possible to reduce dependence on wood, lower production costs, and decrease negative environmental impacts, while simultaneously creating additional economic value from agricultural waste.

The increase in deforestation limits the availability of wood, raises its cost, and intensifies competition for raw materials, which complicates the

sustainable development of the wood-based panel industry. This stimulates the search for alternative raw material sources for the partial or complete substitution of wood in the production of wood-based composite materials. The use of agricultural residues makes it possible to reduce dependence on wood, lower production costs, and decrease negative environmental impacts, while simultaneously creating additional economic value from agricultural waste. Moreover, the wood content in particleboards is approximately 90%; therefore, their properties largely depend on the type of lignocellulosic raw material used in production. The type of raw material affects not only the performance characteristics of the finished board but also the parameters of the manufacturing process and the final

¹ Volodymyr Hamanchuk – PhD Student, Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: 24hamanchuk.v@nltu.lviv.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0004-9413-9990>

² Pavlo Bekhta – Full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Wood-Based Composites, Cellulose and Paper. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: bekhta@ukr.net ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4320-5247>

³ Volodymyr Mayevskyy – Doctor of Sciences, Professor, Director of Educational-Scientific Institute of Woodworking and Design, Professor at the Department of Saw-Milling, Joinery and Wooden Building Products. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: volodymyr_mayevskyy@nltu.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5820-9454>

⁴ Tomáš Pipiška – PhD, Researcher at the Department of Wood Science and Technology, Mendel University in Brno, Zemědělská 1, Brno, 613 00, Czech Republic. E-mail: tomas.pipiska@mendelu.cz ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8096-4376>

⁵ Jozef Ráhel – PhD, Associate Professor at the Department of Wood Science and Technology, Mendel University in Brno, Zemědělská 1, Brno, 613 00, Czech Republic. E-mail: jozef.rahel@mendelu.cz ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2850-8039>

⁶ Jakub Hofman – Engineer of the Department of Wood Science and Technology, Mendel University in Brno, Zemědělská 1, Brno, 613 00, Czech Republic. E-mail: jakub.hofman@centrum.cz

production cost. The cost of primary materials, adhesives and wood particles, constitutes the major share of particleboard manufacturing expenses. The share of wood particles in the overall cost structure is estimated at 30–40%. The cost of agricultural biomass is, on average, about 50% lower than that of wood particles. In this regard, replacing wood particles with alternative non-wood raw materials may result in a significant reduction in production costs.

The aim of this study was to determine the effect of partial or complete replacement of wood particles with sugar beet pulp (SBP) on the mechanical properties of particleboards. Single-layer boards with target densities of 600 and 750 kg/m³ were manufactured using different volumetric ratios of wood and SBP: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100%. Polymeric diphenylmethane diisocyanate (pMDI) adhesive was used to bond the particles. The vertical density profile, bending strength (MOR), modulus of elasticity (MOE), and internal bond (IB) strength of the boards, were investigated.

It has been established that single-layer boards are characterized by a uniform, flat density profile without pronounced densification of the surface layers. This is attributed to the peculiarities of the raw material composition, in particular the lower proportion of wood particles and the particle size of SBP. With an increasing SBP content, a decreasing trend in MOR and MOE is observed, indicating limi-

tations in its use at high concentrations to ensure the mechanical performance of the boards. At the same time, boards with a high SBP content, particularly 100%, demonstrate increased IB strength, which can be explained by effective adhesion between the components of the board. An important role in this is played by pMDI adhesive, as well as the natural constituents of SBP (pectins and sugars), which may act as additional binding agents. Boards containing 25–100% SBP comply with the requirements of EN 312 regarding the minimum IB strength for different board types (P1–P5), confirming their potential for practical application. An increase in board density from 600 to 700 kg/m³ leads to a 19% improvement in internal bond strength, demonstrating the feasibility of optimizing density as a key technological parameter. A promising direction is the production of three-layer boards using wood particles in the outer layers and SBP in the core layer (up to 50%), which would improve the performance properties of the material.

The use of sugar beet pulp in particleboard production contributes to reducing dependence on primary wood resources and enhances the environmental and resource efficiency of the industry.

Key words: alternative raw material; wood composite materials; agricultural residues; bending strength; modulus of elasticity; internal bond strength; pMDI adhesive.