



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

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.36930/412537>
Article received 2025.04.21
Article revised 2025.10.11
Article accepted 2025.10.23
Article published 2026.03.18

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

Вплив часткового заміщення деревини жомом цукрових буряків на фізичні властивості стружкових плит

В.В. Гаманчук¹, П.А. Бехта², Т. Піпішка³, Й. Рагель⁴ Я. Гофман⁵

Збільшення темпів зрубівання лісів обмежує доступність деревини, підвищує її вартість і загострює конкуренцію за сировину, що ускладнює сталий розвиток деревообробної промисловості. Це 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 полягала у з'ясуванні впливу часткової або повної заміни деревної стружки жомом цукрових буряків (ЖЦБ) на фізичні 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,

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 <https://orcid.org/0009-0004-9413-9990>

² Бехта Павло Антонович – академік Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, 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: <https://orcid.org/0000-0002-4320-5247>

³ 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>

⁴ 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>

⁵ 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

25 : 75 та 0 : 100%. Для склеювання частинок застосовували полімерний дифенілметандіізоціанатний (pMDI) клей. Досліджували фракційний склад і насипну щільність частинок, щільність, набрякання за товщиною і водопоглинання плит.

Ситовий аналіз показав, що частинки ЖЦБ мають менший розмір, пористу та нерівну форму, що призводить до нижчої ефективності ущільнення порівняно з деревиною. Обидва типи частинок добре змочуються водою, забезпечуючи подібне покриття клеєм pMDI та парафіновою емульсією. Зі збільшенням частки ЖЦБ зростали вологість, щільність та набрякання плит, при цьому набрякання демонструвало сильну лінійну кореляцію з вмістом ЖЦБ ($R^2 = 0,93$). Найвищі значення набрякання були зафіксовані для плит з 100% вмістом ЖЦБ (37,3–39,5%), тоді як плити з деревини мали найнижче набрякання (12,6%). Використання клею pMDI дало змогу, навіть за високого вмісту ЖЦБ, значно знизити набрякання плит.

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 фізичних властивостей матеріалу.

Ключові слова: альтернативна сировина; деревинні композиційні матеріали; агровідходи; набрякання за товщиною; водопоглинання; щільність; pMDI.

Вступ (Introduction).

Серед деревинних композиційних матеріалів стружкова плита (СП) залишається одним із найпоширеніших у світі (рис. 1). Ці плити широко застосовують у меблевій, будівельній, транспортній і пакувальній промисловості. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), світове виробництво стружкових плит становило 116,6 млн м³ (FAOSTAT, 2024a),

що відповідає 29,9% загального обсягу виробництва деревинних композитів. Найбільша частка припадає на Азію – 50,9% (59,3 млн м³), менше – на Європу (44,0 млн м³, або 37,7%), Америку (11,0 млн м³, або 9,4%), Африку (1,2 млн м³, або 1,0%) та Океанію (1,1 млн м³, або 1,0%) (рис. 2). У цей же період виробництво стружкових плит в Україні перевищило 2,6 млн м³, що становить 2,2% світового та 5,9% європейського виробництва.

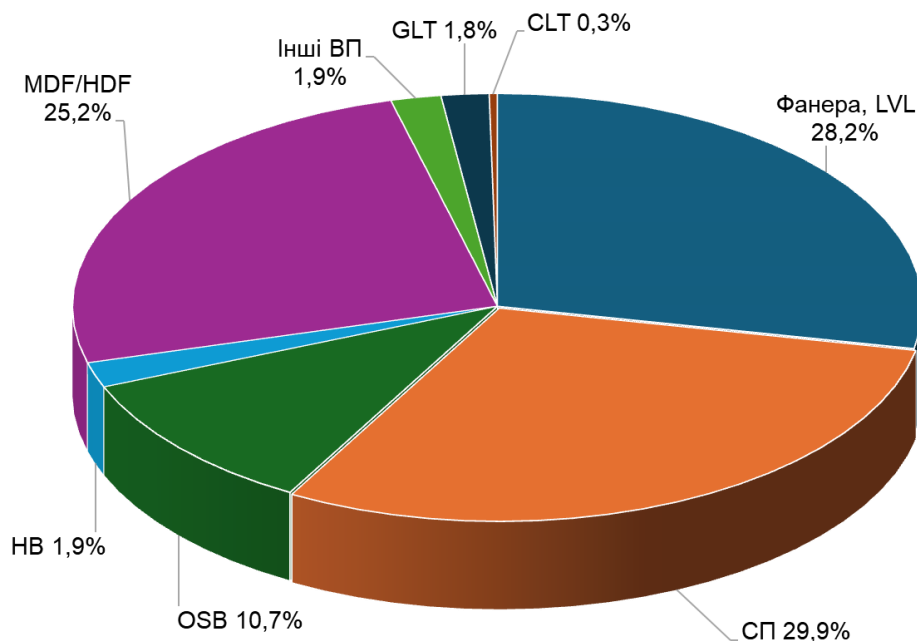


Рис. 1. Світове виробництво деревинних композитів (в %) (за даними FAO станом на 1.04.2025) (* LVL – клеєний брус; СП – стружкова плита; OSB – орієнтовано-стружкова плита; HB – тверда волокниста плита; MDF/HDF – волокниста плита середньої/високої щільності; GLT – клеєна деревина (глулам); CLT – перехресно-клеєна деревина)

Global production of wood-based composites (in %) (according to FAO data as of 1 April 2025)

Fig. 1. (LVL – laminated veneer lumber; СП – particleboard; OSB – oriented strand board; HB – hard-board; MDF/HDF – medium/high density fibreboard; GLT – glue-laminated timber (glulam); CLT – cross-laminated timber)

Клейові матеріали та деревинна стружка є двома основними компонентами стружкових плит. Близько 95% клеїв, що застосовують у виробництві деревинних плит, містять формальдегід. Найпоширенішими клейовими системами у виробництві СП є карбамідоформальдегідні (UF), меламіноформальдегідні (MF) та фенолформальдегідні (PF) смоли (Dunky, 2003). Серед них UF

смоли, річне світове споживання яких оцінюється приблизно у 11 млн тонн твердих речовин, є домінуючими. Завдяки хімічній універсальності, високій реакційній здатності, водорозчинності, низькій температурі та короткому часу пресування, безбарвному шву та відносно низькій вартості, частка їхнього використання становить близько 85%.

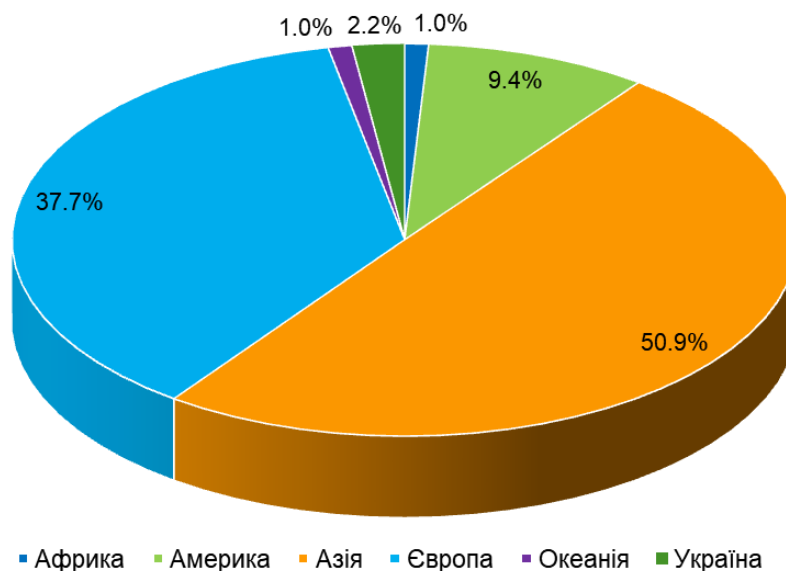


Рис. 2. Світове виробництво деревинних композитів (в %) за континентами (за даними FAO станом на 1.04.2025)

Fig. 2. Global production of wood composites (in %) by continent (according to FAO data as of April 1, 2025)

Вміст деревини в стружкових плитах становить близько 90%, тому їхні властивості істотно залежать від типу деревної сировини, що використовується у виробництві. Тип сировини впливає не лише на експлуатаційні характеристики готової плити, але й на параметри технологічного процесу та кінцеву собівартість продукції. Вартість основних матеріалів, клею та деревинної стружки, становить основну частку витрат на виготовлення стружкових плит. Загальна вартість матеріалів становить 40–60% від собівартості продукції. Повідомлялося, що на клей припадає 30–50% матеріальних витрат у виробництві СП, тоді як частка деревинної стружки становить 50–70% (Solt et al., 2019). Таким чином, частка клею та стружки у загальній структурі витрат оцінюється на рівні 15–30% та 30–40% відповідно. Інші ключові складові витрат, такі як енергія, заробітна плата та операційні витрати становлять приблизно 15–20%, 5–20% та 25–30% відповідно. За даними Klimek & Wimmer (2017), деревинна стружка є другим найдорожчим компонентом після клею, на частку якої припадає близько 20% загальних виробничих витрат. Безсумнівним є те, що матеріальні витрати,

які включають клей і стружку, часто перевищують половину загальної собівартості виробництва. При цьому вартість сільськогосподарської біомаси в середньому на 50% нижча, ніж вартість деревної тріски (Klimek, & Wimmer, 2017). У зв'язку з цим, заміна деревної тріски альтернативною недеревною сировиною може забезпечити суттєве зниження виробничих витрат.

Постійно зростаючий попит на стружкові плити, з одного боку, та посилення конкуренції – з іншого, стимулюють пошук додаткових джерел сировини, які могли б частково або повністю замінити деревину у їх виробництві. Одним із перспективних напрямів є використання побічних продуктів сільськогосподарського виробництва та переробки агропродовольчої продукції. Щорічно у світі нагромаджується значний обсяг такої біомаси.

Серед різноманітних видів агросировини важливе місце посідає цукровий буряк. У 2023 р. світове виробництво цукрових буряків становило приблизно 282 млн тонн, з яких Європа забезпечила 188,5 млн тонн (близько 67%), зокрема Україна – 13,1 млн тонн (~4,7% світового та ~7% європейського виробництва) (FAOSTAT, 2024b).

Під час переробки буряка отримують цукор, мелясу, буряковий жом та фільтраційний осад. Жом цукрових буряків (ЖЦБ) є одним із основних побічних продуктів цукробурякового виробництва. З огляду на великі обсяги переробки цукрового буряка та високий вихід сирого жому (80–83% від маси переробленої сировини), його утилізація, зберігання і транспортування становлять значну виробничу та екологічну проблему. Водночас буряковий жом має потенціал для використання як альтернативна недеревинна сировина у виробництві стружкових плит.

ЖЦБ є цінним джерелом клітковини та має широкий спектр застосувань, зокрема у виробництві паперу, синтезі карбоксиметилцелюлози, отриманні целюлозних мікрофібрил та як волокнистий компонент у біорозкладних композитах (Dinand, Chanzy, & Vignon, 1999; Togrul, & Arslan, 2003; Finkenstadt, Liu, & Willett, 2007; Fišerová, Gigac, & Butaš, 2007; Leitner et al., 2007; Li et al., 2012; Marzo-Gago, Díaz, & Blandino, 2023; Schirp et al., 2024). Численні дослідження засвідчили ефективність включення ЖЦБ до полімолочної кислоти (PLA), що забезпечує підвищення механічних властивостей і пришвидшену біодеградацію композитів (Li et al., 2012; Schirp et al., 2024). Волокна ЖЦБ також є перспективними армувальними компонентами для матриць полівінілового спирту (PVA), поліетилену низької (LDPE) і високої (HDPE) щільності та жорстких поліуретанових пін (Shen, Ghasemlou, & Kamdem, 2015; Karakus, Birbilen, & Mengeloglu, 2016; Hietala, Sain, & Oksman, 2017; Akdogan, & Erdem, 2021; Boussetta et al., 2023). Показано, що голоцелюлоза з цукрового буряка придатна для виготовлення високоміцних композитних плівок (Šimkovic et al., 2017), а композити на основі ЖЦБ та крохмалю можуть забезпечувати ефективну тепло- та звукоізоляцію (Karaku et al., 2019).

ЖЦБ також розглядали як сировину для виробництва стружкових плит. На сьогодні лише три дослідження оцінювали можливість використання ЖЦБ у виробництві СП (Borysiuk et

al., 2019; Pinkl et al., 2020; Auriga et al., 2023). У цих роботах застосовували UF-смоли, а додавання ЖЦБ призводило до збільшення водопоглинання та набрякання плит за товщиною.

На відміну від зазначених досліджень, в яких для склеювання частинок ЖЦБ з деревними частинками використовували UF-клеї, у цьому дослідженні застосовано полімерні метилендіізоціанатні (pMDI) клеї, що забезпечують вищу міцність склеювання та підвищену стійкість до дії води і впливу кліматичних умов (Dunky, 2003).

Часткова або повна заміна деревини на ЖЦБ може бути ефективним способом підвищення екологічної сталості виробництва стружкових плит, зменшення використання лісових ресурсів та збереження або навіть покращення основних фізичних властивостей матеріалу. У цьому контексті актуальність дослідження не викликає сумнівів.

Мета роботи – з'ясувати вплив часткової або повної заміни деревинної стружки жомом цукрових буряків на фізичні властивості стружкових плит.

Матеріали і методи дослідження (Materials and methods).

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

Для виготовлення одношарових стружкових плит використовували жом цукрових буряків (рис. 3а) вологістю $3,11 \pm 0,26\%$ та промислові частинки ялинової деревини (рис. 3б) вологістю $3,64 \pm 0,13\%$. У досліді застосовували полімерну дифенілметандіізоціанатну (pMDI) смолу (ONGRONAT® WO 2750; BorsodChem 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 приблизно 24 мПа·с.



Рис. 3. Жом цукрового буряка (а) та деревинні частинки (б), що використовували для виготовлення стружкових плит

Fig. 3. Sugar beet pulp (a) and wood (b) particles used for the manufacture of particleboards

Візуальну та морфологічну характеристику частинок ЖЦБ і деревини здійснювали за допомогою 3D оптичного профілометра KEYENCE VR-6000 з високою роздільною здатністю за збільшення 40× та 120×. Змочуваність поверхні оцінювали методом краплі на поверхні (sessile drop) за допомогою системи SEE Instruments (Чеська Республіка) з використанням 50% розчину K₂CO₃, що володіє більшою поверхневою вільною енергією (97 мДж/м² проти 72,8 мДж/м² для води). Контактний кут визначали через дотичну до точки трьох фаз, і остаточне значення обчислювали на основі 30 вимірювань.

Вміст вологи (МС) частинок значно впливає на фізичні і механічні властивості стружкових плит. Точне визначення МС є необхідним для оптимізації технологічного процесу та забезпечення якості продукції. Перед використанням вміст вологи частинок ЖЦБ і деревини визначали за допомогою аналізатора вологи RADWAG MAC 210 (рис. 4).

Для розрахунку МС (%) використовували таке рівняння:

$$MC = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100, \quad (1)$$

де m_w – маса вологих частинок (г), m_0 – маса сухих частинок (г).



Рис. 4. Вимірювання вмісту вологи за допомогою аналізатора вологості RADWAG MAC 210

Fig. 4. Measurement of moisture content (MC) using the RADWAG MAC 210 moisture analyzer

Фракційний склад частинок визначали методом ситового аналізу з використанням лабораторного вібраційного ситового аналізатора Fritsch Analysette 3 (CHROMSPEC-SLOVAKIA, Словаччина) із ситами розміром 5 мм, 3,15 мм, 2 мм, 1 мм, 500 мкм, 250 мкм та пилом (рис. 5).

Виготовляли одношарові плити розміром 600 × 600 × 12 мм із середньою щільністю 600 та 750 кг/м³. Сировину змішували у таких співвідношеннях (ЖЦБ / деревина): 100 : 0, 50 : 50, 0 : 100, 25 : 75 та

75 : 25. Всього було виготовлено шість варіантів плит (табл. 1). Для кожного варіанта виготовляли по три плити. Зразки Е та F складалися повністю з ЖЦБ із різною щільністю (600 та 750 кг/м³), а зразок А складався лише з деревини та використовувався як контрольний. Змішування та нанесення клею виконували в лабораторному барабанному змішувачі. При цьому смола та емульсія парафінового воску подавали через розпилювальні сопла.



Рис. 5. Аналіз фракцій частинок за допомогою вібраційного сита Fritsch Analysette 3

Fig. 5. Analysis of particle fractions using the Fritsch Analysette 3 vibrating sieve

Килим із частинок формували у лабораторній формі з ламінованої стружкової плити (рис. 6), а пресування здійснювали на пресі Stroztech HL 400 Mendel (рис. 7) за тиску 3,5 МПа і температури 180°C (30 с – закривання, 240 с – у робочій позиції та 80 с – для випуску повітря з

поступовим зниженням тиску). Після пресування плити витримували в контрольованому середовищі при 20°C і відносній вологості 65% впродовж 14 днів для затвердіння клею та вирівнювання вологості плит із навколишнім середовищем.

Таблиця 1. Варіанти виготовлених плит

Table 1. Variants of manufactured boards

Варіант	Щільність плит (кг/м ³)	Співвідношення ЖЦБ : деревина
A	600	0 : 100
B	600	25 : 75
C	600	50 : 50
D	600	75 : 25
E	600	100 : 0
F	750	100 : 0



Рис. 6. Стружковий пакет, приготований до пресування

Fig. 6. Chip mat prepared for pressing



Рис. 7. Прес для пресування плит

Fig. 7. Press used for pressing boards

Фізичні властивості (МС, щільність, профіль щільності та набрякання за товщиною) визначали на зразках розміром 50 × 50 мм. Вологість і щільність зразків визначали на десяти екземплярах розміром 50 × 50 мм відповідно до стандартів EN 322 (1993) та EN 323 (1993). Для визначення вологості використовували сушильну шафу SANYO. Зразки сушили за температури 103

± 2°C. Вологість H (в %) плит обчислювали за формулою, наведеною в EN 322 (1993):

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (2)$$

де m_H – маса зразка до сушіння, m_0 – після сушіння.

Набрякання за товщиною (TS) вимірювали відповідно до EN 317 (1996) на зразках розміром

50 × 50 мм після 24, 48 та 168 год. занурення у воду, використовуючи 12 зразків таких же розмірів. Набрякання за товщиною кожного зразка, виражене у відсотках від початкової товщини, обчислювали за формулою:

$$TS = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \cdot 100 \quad (3)$$

де t_1 та t_2 – товщина зразка до та після занурення.

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).

Візуальний аналіз показав, що частинки ЖЦБ загалом менші за деревинні частинки і характеризуються пористою структурою та нерівною, шорсткою поверхнею. Через це ЖЦБ демонструє нижчу ефективність ущільнення порівняно з більш правильно сформованими частинками ялини. Зокрема, виміряна абсолютна щільність для ЖЦБ та частинок ялини становила 1183 ± 23 та 540 ± 11 кг/м³ відповідно. Як і очікувалося, ці значення дещо перевищують дані, наведені в літературі за вологості 12%: (912 ± 46) кг/м³ для ЖЦБ (Karaky et al., 2019) та (491 ± 63) кг/м³ для ялини європейської (середнє значення, розраховане за Gryc & Hořáček, 2007). Перевищення становить приблизно 20% для ЖЦБ і 10% для ялини. Виміряна насипна щільність для ЖЦБ і частинок ялини становила 253 ± 22 та 165 ± 19 кг/м³ відповідно.

Обидва матеріали повністю змочуються водою. Така гідрофільна властивість зумовлена, головним чином, великою кількістю полярних гідроксильних (–ОН) груп в обох матеріалах (Li et al., 2014).

Середні кути змочування розчином K₂CO₃ становили $140^\circ \pm 5^\circ$ для деревинних частинок та $135^\circ \pm 10^\circ$ для ЖЦБ. Відносно велике стандартне відхилення кутів змочування зумовлене, головним чином, нерівною поверхнею досліджуваних частинок. Отже, з огляду на подібність загальної змочуваності, можна передбачити, що під час змішування обидва типи частинок повинні отримати подібне покриття поверхні клеєм рMDI та парафіновою емульсією.

Ситовий аналіз (рис. 8) показав відносний розподіл окремих фракцій ЖЦБ та деревинних частинок, що використовують у виробництві стружкових плит. Найбільша частка деревинних частинок припадала на сито з отворами 5 мм і становила 43,23%. На ситах з отворами 1 мм і 2 мм відповідні частки становили 27,35% та 20,03%. Для сит з отворами 3,15 мм та 500 мкм частки становили 3,87% та 3,84% відповідно. Найменші фракції спостережено на ситі 250 мкм та в осаді на дні вібруючого сита, які становили 0,90% та 0,62% відповідно. Під час вимірювань відбувалися втрати матеріалу у вигляді пилу, що залишався в осередках сита, або частинок, що зачіплялися за його структуру, за загальних втрат 0,16%.

Для частинок ЖЦБ ситовий аналіз показав найвищу частку на ситі з отворами 2 мм, яка становила 54,95%. Значні частки також спостерігали на ситах з отворами 3,15 мм та 1 мм – 29,49 та 12,22% відповідно. Менші об'єми припадали на сито 5 мм (2,03%) і сито 500 мкм (1,11%). Найменші частки були зафіксовані на ситі 250 мкм та в осаді на дні сита, що становили 0,10 та 0,11% відповідно. Під час випробувань втрати матеріалу були мінімальними і становили лише 0,01%.

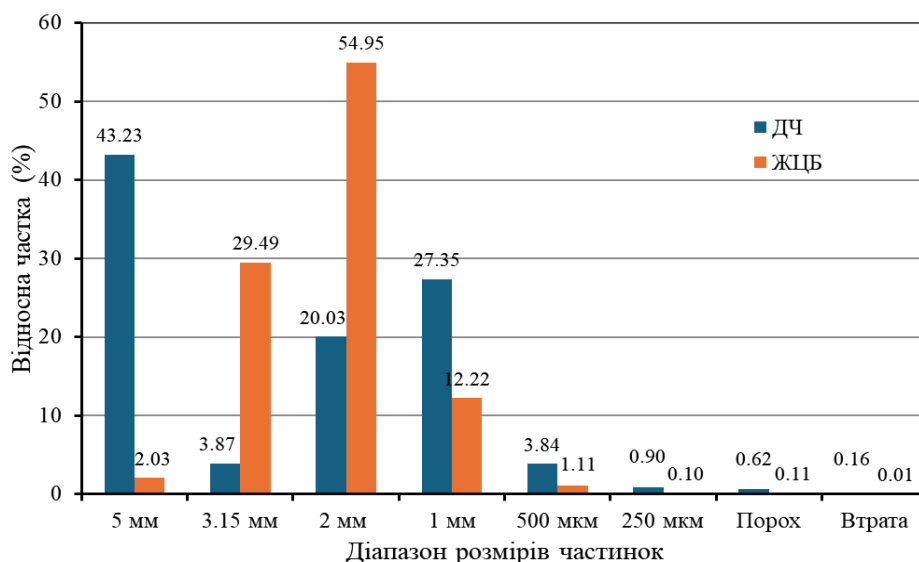


Рис. 8. Ситовий аналіз – відсоткове представлення жому цукрового буряка та деревинних частинок
Fig. 8. Sieve analysis - percentage representation of sugar beet pulp and wood particles

У табл. 2 наведено середні значення і стандартні відхилення вологості (МС), щільності та набрякання за товщиною (TS) плит, що містять різні співвідношення ЖЦБ і деревинних частинок. Вологість плит змінювалася від 8,8 до 10,7%. Зразки А, виготовлені виключно з деревинних

частинок, мали найнижчу вологість, тоді як зразки D та F, що містили 75% та 100% ЖЦБ відповідно, демонстрували найвищу вологість. Це підвищення МС у зразках з високим вмістом ЖЦБ, ймовірно, зумовлене здатністю ЖЦБ зв'язувати воду та наявністю пектину у його клітинних стінках.

Таблиця 2. Фізичні властивості плит
Table 2. Physical properties of tested boards

Варіант	МС (%)	Щільність (кг/м ³)	TS 24 год (%)	TS 48 год (%)	TS 168 год (%)
A	8,8 ± 0,3 a*	579 ± 18 a	13,0 ± 2,6 a	20,0 ± 3,1 a	25,9 ± 2,7 a
B	9,7 ± 0,1 b	585 ± 23 a	14,0 ± 2,7 a	22,1 ± 3,3 a	34,1 ± 4,3 b
C	9,2 ± 0,7 a	634 ± 20 bc	23,0 ± 4,6 b	32,5 ± 5,0 b	47,8 ± 5,8 c
D	10,7 ± 0,1 d	611 ± 21 b	27,2 ± 4,8 b	37,4 ± 5,0 c	52,2 ± 4,2 d
E	10,1 ± 0,5 c	642 ± 27 c	39,5 ± 8,1 c	45,9 ± 5,9 d	48,4 ± 3,8 cd
F	10,6 ± 0,2 d	732 ± 27 d	37,3 ± 6,6 c	50,1 ± 4,7 d	57,5 ± 2,8 e

*a,b,c,d,e – однорідні групи за тестом Tukey ($\alpha = 0,05$)

Дискусія (Discussion).

Додавання ЖЦБ суттєво впливає на щільність плит. Зі збільшенням частки ЖЦБ від 0% до 100% щільність плит зростає від 579 до 642 кг/м³, причому ця різниця є статистично значущою ($p < 0,05$). Збільшення щільності частково пояснюється вищою абсолютною щільністю ЖЦБ, яка вдвічі перевищує щільність деревинних частинок ялини.

Плити, що містять ЖЦБ, демонструють підвищене набрякання, причому найбільше відносне збільшення спостерігається у плитах, виготовлених виключно з ЖЦБ (див. табл. 2). Очевидно, що саме частинки ЖЦБ найбільше впливають на набрякання плити за товщиною. Найвищі значення TS після 24 год. склали 39,5 та 37,3% для зразків E та F відповідно, які одночасно мали найвищу щільність серед досліджуваних плит. На противагу цьому, найнижче значення TS (12,6%) було зафіксовано для зразка А, який складався

виключно з деревинних частинок. Відносний порядок значень TS між зразками зберігався і після 48 та 168 год. витримання у воді, природно, зі зростанням абсолютних значень TS.

Отримані результати добре узгоджуються з попередніми дослідженнями (Borysiuk et al., 2019; Auriga et al., 2023), які також відзначали збільшення водопоглинання та набрякання стружкових плит за підвищеного вмісту ЖЦБ. Водночас використання клею рMDI у нашому дослідженні забезпечило покращені значення TS впродовж 24 год., які були значно нижчими (14 та 23%) порівняно з даними, наведеними у роботах згаданих вище авторів (48 та 78%, а також 33,4 та 39,9% відповідно).

Сильну кореляцію ($R^2 = 0,93$) спостережено між TS та вмістом ЖЦБ. Ця залежність є лінійною, що свідчить про те, що зі збільшенням частки ЖЦБ у плиті значно зростає і набрякання за товщиною (рис. 9).

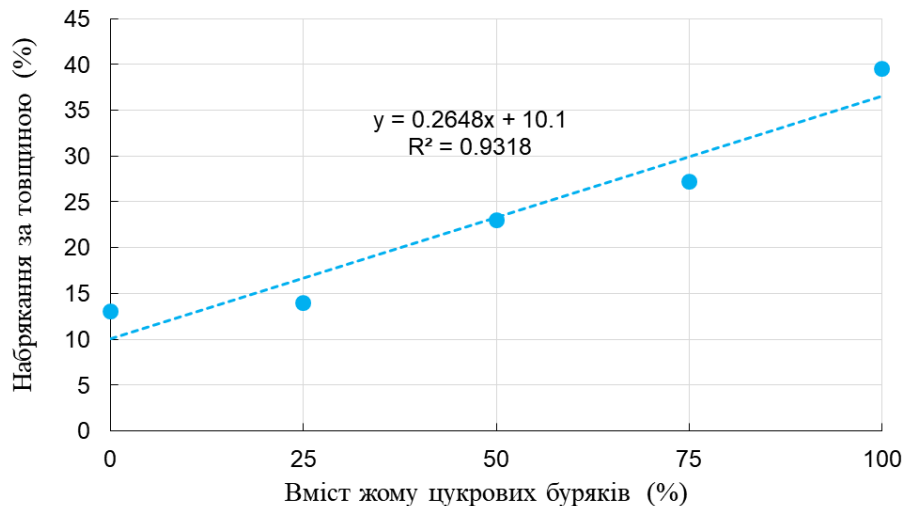


Рис. 9. Кореляція між набряканням за товщиною плит і вмістом ЖЦБ

Fig. 9. Correlation between the thickness swelling and content of the sugar beet pulp (SBP)

Порівняння отриманих значень із стандартом EN 312 (2010), який визначає мінімальні значення набрякання за товщиною на рівні 17% для стружкових плит типу Р3 (несучі плити для використання в умовах підвищеної вологості) та 16% – для типу Р4 (несучі плити для використання в сухих умовах) показало, що лише плити А та В відповідають цим стандартним вимогам. Решта плит (С, D, Е та F) перевищували зазначені в стандарті значення TS і відповідали лише вимогам до плит типу Р2, призначених для внутрішнього використання (зокрема меблів) у сухих умовах, для яких конкретне значення TS не встановлено.

Для стружкових плит, що містять ЖЦБ, особливо за 100% вмісту, значні зміни розмірів, пов'язані з TS, включали не лише зміни товщини, але й помітні бічні розмірні варіації. Таке виражене набрякання можна пояснити структурними та хімічними властивостями ЖЦБ. Вища пористість ЖЦБ забезпечує кращий доступ води до клітинних стінок. Крім того, підвищена кількість пектинів (Ziemiński, Romanowska, & Kowalska, 2012), відомих своєю здатністю зв'язувати воду, могла додатково сприяти підвищеному водопоглинанню.

Висновки (Conclusions).

Експериментальні дослідження дали змогу оцінити вплив часткової заміни деревинної стружки жомом цукрових буряків на фізичні властивості стружкових плит. Основні висновки полягають у такому.

1. Частинки ЖЦБ менші за деревинні частинки, мають нерегулярну форму та пористу поверхню, що знижує ефективність їх ущільнення у плитах.

2. Зі збільшенням частки ЖЦБ у плитах зростає вологість, щільність та набрякання за товщиною.

3. Використання клею рMDI забезпечує зниження набрякання плит навіть за високого вмісту ЖЦБ.

4. Плити з високим вмістом ЖЦБ перевищують обмеження, встановлені стандартом EN 312 для TS плит типу Р3 та Р4, проте відповідають вимогам типу Р2.

5. На набрякання плит найсуттєвіше впливає вміст ЖЦБ, що підтверджується лінійною кореляцією ($R^2 = 0,93$) між TS і часткою ЖЦБ.

6. Використання ЖЦБ у виробництві стружкових плит є перспективним підходом для часткової заміни деревини, зменшення витрат лісових ресурсів та підвищення екологічної сталості виробів, за збереження або покращення основних фізичних властивостей плит.

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)

- Akdogan, E., & Erdem, M. (2021). Improvement in physico-mechanical and structural properties of rigid polyurethane foam composites by the addition of sugar beet pulp as a reactive filler. *Journal of Polymer Research*, 28, 80. <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02445-w>
- 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>
- Boussetta, A., Benhamou, A. A., Barba, F. J. Grimi, N., Simirgiotis, M. J., & Moubarik, A. (2023). Effect of Cellulose Microfibers from Sugar Beet Pulp By-product on the Reinforcement of HDPE Composites Prepared by Twin-screw Extrusion and Injection Molding. *Journal of Bionic Engineering*, 20, 349–365. <https://doi.org/10.1007/s42235-022-00260-7>
- 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*. Pizzi, A., & Mittal, K. L. (Eds.) Handbook of adhesive technology, 2nd ed. Marcel Dekker Inc., New York, pp. 872–941. <https://doi.org/10.1201/9780203912225.ch47>
- EN 312 (2010). *Particleboards – Specifications*. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- EN 317 (1996). *Particleboards and Fibreboards – Determination of Swelling in Thickness after Immersion in Water*. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- EN 322 (1993). *Wood-Based Panels – Determination of Moisture Content*. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- EN 323 (1993). *Wood-Based Panels – Determination of Density*. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- 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.researchgate.net/publication/290029555_Influence_of_sugar_beet_pulp_on_bond_strength_and_structure_of_paper

- Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 2024a. FAOSTAT Data. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO> (accessed on 20 November 2025).
- Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 2024b. FAOSTAT Data. www.fao.org/faostat/en/#data/QCL (accessed on 20 November 2025)
- Gryc, V., & Horáček, P. (2007). Variability in density of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) wood with the presence of reaction wood. *Journal of Forest Science*, 53(3), 129–137. <https://doi.org/10.17221/2146-jfs>
- Hietala, M., Sain, S., & Oksman, K. (2017). Highly redispersible sugar beet nanofibers as reinforcement in bionanocomposites. *Cellulose*, 24(5), 2177–2189. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1245-6>
- Karakus, K., Birbilen, Y., & Mengeloglu, F. (2016). Assessment of selected properties of LDPE composites reinforced with sugar beet pulp. *Measurement*, 88, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.039>
- Karaky, H., Maalouf, C., Bliard, C., Gacoin, A., Lachi, M., Wakil, N., & Polidori, G. (2019). Characterization of beet-pulp fiber reinforced potato starch biopolymer composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 203, 711–721. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.127>
- Klimek, P., & Wimmer, R. (2017). Alternative raw materials for biobased composites. Alternative raw materials for biobased composites. In: *Proceedings of the international conference “Wood science and engineering in the third millennium”*. ICWSE 2017; 2–4 November 2017. 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, M., Wang, L. J., Li, D., Cheng, Y. L., & Adhikari, B. (2014). Preparation and characterization of cellulose nanofibers from de-pectinated sugar beet pulp. *Carbohydrate Polymers*, 102(1), 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.11.021>
- 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, 361–372. <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*, 1–22. <https://doi.org/10.1002/pc.28840>
- Shen, Z., Ghasemlou, M., & Kamdem, D. P. (2015). Development and compatibility assessment of new composite film based on sugar beet pulp and polyvinyl alcohol intended for packaging applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(4), 1–8. <https://doi.org/10.1002/app.41354>
- Solt, P., Konnerth, J., Gindl-Altmutter, W., Kantner, W., Moser, J., Mitter, R., & van Herwijnen, H. W. G. (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>
- Šimkovic, I., Kelnar, I., Mendichi, R., Bertok, T., & Filip, J. (2017). Composite films prepared from agricultural by-products. *Carbohydrate Polymers*, 156, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.014>
- Togrul, H., & Arslan, N. (2003). Production of carboxymethyl cellulose from sugar beet pulp cellulose and rheological behaviour of carboxymethyl cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 54, 73–82. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00147-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00147-4)
- 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>

Effect of partial and complete replacement of wood particles with sugar beet pulp on the physical properties of particleboards

V. Hamanchuk¹, P. Bekhta², T. Pipiška³, J. Ráhel⁴, J. Hofman⁵

The increase in deforestation limits the availability of wood, raises its cost, and intensifies competition for raw materials, thereby complicating the sustainable development of the wood-based panel industry. This stimulates the search for alternative raw material sources for the partial or complete replacement 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 mitigate 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 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 physical 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 particle size distribution and bulk density of the particles, as well as the density, thickness swelling, and water absorption of the boards, were investigated.

Sieve analysis showed that SBP particles are smaller in size and have a porous and irregular shape, resulting in lower compaction efficiency compared to wood particles. Both types of particles exhibited good wettability with water, ensuring similar coverage with pMDI adhesive and paraffin emulsion. With increasing SBP content, the moisture content, density, and thickness swelling of the boards also increased, with thickness swelling showing a strong linear correlation with SBP content ($R^2 = 0.93$). The highest thickness swelling values were recorded for boards made with 100% SBP (37.3–39.5%), while boards made entirely of wood exhibited the lowest swelling (12.6%). The use of pMDI adhesive made it possible, even at high SBP contents, to significantly reduce board thickness swelling compared to values reported in the literature. Boards with a high SBP content exceed the EN 312 standard limits for thickness swelling of P3 and P4 boards but meet the requirements for P2 boards.

The results of the study indicate that partial or complete replacement of wood with SBP is an effective approach to improving the environmental sustainability of particleboard production, reducing the consumption of forest resources, and maintaining or improving the key physical properties of the material.

Key words: alternative raw material; wood composite materials; agricultural residues; thickness swelling; water absorption; density; pMDI adhesive.

¹ Volodymyr Hamanchuk – Postgraduate Student, Department of Sawmilling, Joinery and Wooden Building Products Technologies. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: 24hamanchuk.v@ntu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9413-9990>

² Pavlo Bekhta – Full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor at 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: <https://orcid.org/0000-0002-4320-5247>

³ Tomáš Pipiška – PhD, Researcher at the Department of Wood Science and Technology, Mendel University in Brno, 1 Zemědělská St., Brno, 613 00, Czech Republic. E-mail: tomas.pipiska@mendelu.cz ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8096-4376>

⁴ Jozef Ráhel – PhD, Associate Professor at the Department of Wood Science and Technology, Mendel University in Brno, 1 Zemědělská St., Brno, 613 00, Czech Republic. E-mail: jozef.rahel@mendelu.cz ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2850-8039>

⁵ Jakub Hofman – Engineer at the Department of Wood Science and Technology, Mendel University in Brno, 1 Zemědělská St., Brno, 613 00, Czech Republic. E-mail: jakub.hofman@centrum.cz