



П. А. Бехта, Р. І. Рябишев

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

## МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГКИХ СТРУЖКОВИХ ПЛИТ ІЗ ВМІСТОМ КОСТРИЦІ КОНОПЛІ

Розглянуто можливості використання костриці конопель як альтернативної сировини у виробництві легких стружкових плит (СП). Встановлено, що застосування костриці конопелі у виробництві легких стружкових плит забезпечує скорочення споживання деревинної сировини, сприяє збереженню лісових ресурсів, підвищує ресурсну ефективність виробництва та розширює сировинну базу плитної продукції за рахунок відновлюваних ресурсів. У лабораторних умовах виготовлено тришарові легкі СП зі щільністю 350, 450 і 550 кг/м<sup>3</sup> зі застосуванням карбамідоформальдегідного (КФ) клею, у яких у внутрішньому шарі деревинні частинки частково або повністю замінювали кострицею конопель у різних пропорціях (100:0, 75:25, 50:50, 25:75, 0:100 %), тоді як зовнішні шари формувалися винятково з деревинної стружки. Випробування зразків виконано відповідно до вимог стандартів ДСТУ: EN 310, EN 319 та EN 320. Досліджено механічні властивості плит, зокрема – міцність на згин і модуль пружності, міцність на розтяг перпендикулярно до площини плити, а також питомий опір витягування шурупів із площини та торця плити. Виявлено, що часткова заміна деревинних частинок кострицею конопель у внутрішньому шарі позитивно впливає на механічні характеристики легких СП. Встановлено, що для плит з поєднанням деревинних частинок у зовнішніх шарах і 100 % костриці конопель у внутрішньому шарі характерні дещо вищі значення міцності на згин і модуль пружності порівняно з контрольними плитами зі 100 % деревинної сировини за однакової щільності, водночас як міцність на розтяг перпендикулярно до площини плити залишалася дещо нижчою, але відповідала вимогам чинного стандарту. З'ясовано, що для плит щільністю 550 кг/м<sup>3</sup> із 100 % вмістом костриці конопель у внутрішньому шарі показники міцності на згин і модуль пружності перевищували контрольні значення, тоді як зниження міцності на розтяг перпендикулярно до площини плити було помірним і нормативно допустимим. Оцінено вплив щільності плит на здатність утримувати шурупи та встановлено, що заміна деревинної стружки кострицею конопель зумовлює зниження питомого опору витягування шурупів, однак зі зростанням щільності плит негативний ефект істотно зменшується. Охарактеризовано закономірності відповідності механічних показників легких СП плит різної щільності вимогам стандарту ДСТУ CEN/TS 16368:2022, що підтверджує доцільність використання костриці конопель як альтернативної сировини та визначає перспективність подальшої оптимізації складу й структури плит.

**Ключові слова:** агровідходи; низька щільність плит; альтернативна сировина; міцність на згин; модуль пружності; міцність плити при розтягу перпендикулярно до її площини; питомий опір витягування шурупів.

### Вступ / Introduction

Динаміка глобального ринку деревинних композитів свідчить про сталу тенденцію до зростання обсягів виробництва, де домінуючий сегмент належить стружковим плитам (СП). Згідно зі статистичними даними Європейської федерації виробників деревних плит (EPF) [7], станом на 2023 р. частка СП у загальній структурі галузевого випуску становила 53 %. Проте інтенсифікація лісокористування призвела до істотного дефіциту якісної деревинної сировини, що спричинило посилення конкуренції між галузями та невпинне зростання вартості ресурсу [17]. Сучасному стану лісових екосис-

тем характерний критичний дисбаланс: у країнах, що розвиваються, темпи знеліснення у десять разів перевищують інтенсивність заліснення [16]. Це провокує катастрофічні екологічні наслідки, зокрема – порушення вуглецевого циклу, акумуляцію парникових газів у атмосфері та підвищення кислотності Світового океану.

У відповідь на ці виклики наукова спільнота та виробничники зосереджують увагу на пошуку альтернативної відновлюваної сировини для часткового або повного заміщення традиційної деревини [5, 21, 26]. Пріоритетним напрямом є розроблення та впровадження легких СП. Відповідно до стандарту ДСТУ CEN/TS 16368:2022, до категорії легких відносять плити, щільність яких

© Copyright 2026 by the author(s)

**Бехта Павло Антонович**, д-р техн. наук, професор, кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Email: [bekhta@ukr.net](mailto:bekhta@ukr.net); <https://orcid.org/0000-0002-4320-5247>

**Рябишев Роман Ілліч**, аспірант, кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу.

Email: [riabyshev.roman@nltu.lviv.ua](mailto:riabyshev.roman@nltu.lviv.ua); <https://orcid.org/0009-0002-6391-008X>

**Цитування за ДСТУ:** Бехта П. А., Рябишев Р. І. Механічні властивості легких стружкових плит із вмістом костриці конопелі. Науковий вісник НЛТУ України. 2026, т. 36, № 1. С. 80–87.

**Citation APA:** Bekhta, P. A., & Riabyshev, R. I. (2026). Mechanical properties of lightweight particle boards containing hemp shives. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(1), 80–87. <https://doi.org/10.36930/40360109>

не перевищує  $600 \text{ кг/м}^3$ , тоді як для стандартних виробів цей показник змінюється в межах  $600\text{--}750 \text{ кг/м}^3$ .

Перехід до використання легких СП відкриває нові перспективи для меблевого дизайну та промислового сектору. Зменшена вага дає змогу інтегрувати в інтер'єри масивні конструктивні елементи без виготовлення надмірного навантаження на фурнітуру та перекриття [4]. Зниження щільності матеріалу безпосередньо корелює зі зменшенням енерговитрат на транспортування та полегшенням процесів оброблення [18]. Вага меблевих виробів є третім за значущістю фактором впливу на рішення про купівлю, поступаючись тільки естетичному оформленню та ціні [12]. Проте технологія виготовлення легких композитів потребує вирішення проблеми збереження їхніх експлуатаційних властивостей. Зниження щільності зазвичай супроводжується погіршенням механічної міцності та жорсткості через утворення пористої структури з численними пустотами, що ускладнює подальше фрезерування та облицювання крайок.

Рациональним вирішенням цієї суперечності є залучення до виробничого циклу фітомаси однорічних та багаторічних рослин [2], а також виготовлення гібридних плит, що поєднують деревинні волокна з аграрними відходами [6, 19]. Використання побічних продуктів сільськогосподарського виробництва не тільки сприяє збереженню лісових масивів, а й вирішує нагальні соціально-економічні питання, оскільки такі залишки часто стають джерелом забруднення за спалювання на полях [22, 27]. Отже, агросировина як поновлюваний ресурс володіє потужним потенціалом для трансформації галузі в напрямі циркулярної економіки та сталого розвитку.

*Об'єкт дослідження* – встановлення механічних властивостей легких стружкових плит із вмістом костриці конопль.

*Предмет дослідження* – методи і засоби визначення механічних властивостей легких стружкових плит із вмістом костриці конопль, що дасть змогу оцінити доцільність і перспективність використання цієї технології для їх виготовлення.

*Мета роботи* – з'ясувати вплив додавання стружки костриці конопль до деревинної стружки на механічні властивості легких стружкових плит, що забезпечить зменшення використання деревини, підвищить екологічні показники та знизить собівартість їх виготовлення.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- виготовити зразки легких СП із вмістом костриці конопль, що дасть змогу оцінити їх механічні властивості з використанням стандартизованих методик;
- встановити вплив заміщення деревинної стружки різною кількістю костриці конопль на механічні властивості легких СП, що дасть змогу встановити відповідність цих плит чинним стандартам;
- встановити вплив зміни щільності на механічні властивості легких СП, що дасть можливість оцінити доцільність і перспективність використання цієї технології для їх виготовлення;
- встановити експериментально механічні властивості легких стружкових плит, виготовлених з комбінуванням стружки з деревини та костриці конопль, що дасть змогу отримати новий композиційний матеріал з покращеними та унікальними механічними властивостями.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Одним із ефективних шляхів скорочення споживання деревинної сировини у виробництві СП є залучення сільськогосподарських відходів та однорічних рослин. Упро-

довж останніх десятиліть наукові дослідження були зосереджені на вивченні можливостей використання широкого спектра альтернативних лігноцелюлозних матеріалів, серед яких пшенична та ріпакова солома [3, 6], рисова солома [10], стебла бавовнику [9], костриця конопель і льону [1, 24, 25, 30], чайне листя [28], стебла очерету [14], обрізки виноградної лози [29], гілки фінікової пальми [8], сіно [23] та стебла соняшника [13].

Розроблення композитів на основі конопель є цікавою альтернативою для захисту лісів і проблем, пов'язаних із дефіцитом деревної сировини – це універсальна рослина, яку досить просто та екологічно безпечно вирощувати [20]. Вирощування одного акра конопель дає стільки ж целюлозного волокна, як чотири акри дерев. Окрім цього, коноплі дозрівають до придатного для використання стану за 100 днів, та є щорічно відновлювальною сировиною, тоді як для дерев потрібен значно довший період часу, який охоплює від 50 до 100 років. Після первинної переробки конопель отримують 30 % волокон і 70 %. З технологічного погляду, використання костриці дає змогу знизити витрати на виробництво СП унаслідок змін у технологічному процесі. Під час підготовки сировини костриця не вимагає додаткового подрібнення, оскільки розміри частинок відповідають вимогам для виробництва СП.

Використання конопль у виробництві СП було предметом кількох досліджень [1, 11, 24, 25, 30], якими встановлено, що такі відходи є технічно придатними для виготовлення плит.

У роботі [1] виявлено, що СП зі щільністю  $650 \text{ кг/м}^3$ , які містили конопляну стружку, мали меншу щільність порівняно зі звичайними плитами. Частки конопляної стружки на рівнях 10 та 25 % мають незначний вплив на міцність на згин (MOR) та модуль пружності (MOE), міцність на розтяг перпендикулярно до площини плити (IB) не показала статистично значущих відмінностей між звичайними СП та плитами з часткою конопляної стружки. Для СП з 25 % конопляної стружки спостерігали зменшення набрякання порівняно зі СП, виготовлених повністю із промислових деревних частинок. Автори [24] вивчали вплив додавання стружки з костриці конопль до внутрішнього шару СП на властивості плит. Результати показали, що значення фізичних та механічних властивостей експериментально виготовленої конопляної плити такі ж самі, як і у звичайної СП, зі збереженням технологічних параметрів. Було досягнуто міцності на вигин понад 11 МПа та міцності на розтяг перпендикулярно до площини плити понад 0,35 МПа за щільності плити  $650 \text{ кг/м}^3$ . В іншій роботі [25] виготовляли СП щільністю  $620 \text{ кг/м}^3$  із залишків лляної костриці та конопляної стружки. Встановлено, що висока поглинальна здатність лляної костри та конопляної стружки призвела до вищих властивостей набрякання за товщиною та водопоглинання, ніж у плитах, виготовлених з деревинної стружки. У роботі [30] використовували конопляну стружку різного розміру для виготовлення СП низької щільності ( $300^{\pm 30} \text{ кг/м}^3$ ) для будівельної промисловості. Результати продемонстрували, що плити можна використовувати як не несні конструкції, а також, як альтернативу скловолоконним та пінопластовим ізоляційним матеріалам. Також, було помічено, що розмір частинок має незначний вплив на теплопровідність плит. Автор [11] досліджував вплив однорічних конопель (*Cannabis sativa* L.) на механічні та фізичні

властивості СП щільністю 580 кг/м<sup>3</sup>. Задля цього у внутрішній шар плити додавали різну частку коноплі: 10, 20 і 30 %. Встановлено, що додавання коноплі позитивно впливає на механічні властивості СП, при цьому вміст вільного формальдегіду зменшився на 24,6 %.

Унаслідок аналізу останніх досліджень та публікацій було з'ясовано, що одним із сучасних напрямів у виробництві СП є використання комбінованої сировини – деревини та відходів сільського господарства, що дає змогу виготовляти плити зі зниженою щільністю та зменшеним споживанням деревини [24, 30]. Проте наукові дослідження здебільшого зосереджені на плитах, щільність яких перевищує 500 кг/м<sup>3</sup>. Натомість інформація про технології виготовлення плит малої щільності із застосуванням костриці коноплі залишається обмеженою. З огляду на це, потрібно проаналізувати технологічну можливість виготовлення легких СП із використанням карбамідоформальдегідного (КФ) клею в діапазоні щільності 350-550 кг/м<sup>3</sup> із залученням костриці коноплі як частини сировинного складу, а також здійснити аналіз отриманих механічних властивостей. Отримані результати потрібно порівнювати з чинними стандартами для легких плит та даними інших авторів.

**Матеріали та методи дослідження.** Частинки деревини хвойних (75 %) та листяних (25 %) порід (походження: Українські Карпати, Івано-Франківська область, Україна) отримано від промислового виробництва на заводі з виробництва СП, початкова вологість частинок становила близько 8 %. Кострицю коноплі було надано підприємством "Calipso" (Чернігівська область, Україна). Частинки деревини та костриці коноплі висушували в лабораторній сушарці до вологості приблизно 3 % за температури 90 °С. Для виготовлення плит використовували карбамідоформальдегідну (КФ) смолу марки А (виробник Swiss Krono Sp. z o.o.), парафінову емульсію, карбамід (43 %-й розчин) та сульфат амонію [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] (33 %-й розчин). Смола КФ мала такі характеристики: густина 1,28 г/см<sup>3</sup>, сухий залишок 66 %, в'язкість по чашці Форда (4 мм, 20 °С) 98 с, рН = 8,05, час гелеутворення 50 с.

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

**Методика виготовлення досліджуваних зразків.** Тришарові СП розміром 290×290×16 мм (довжина×ширина×товщина) з цільовою щільністю 350, 450 і 550 г/м<sup>3</sup> виготовлено в лабораторних умовах. Зовнішній шар на 100 % складався з деревинних частинок. Кострицю коноплі було додано тільки у внутрішній шар плити. Пропорції частинок деревини до костриці коноплі у внутрішньому шарі становили 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 і 0:100 % (табл. 1). Співвідношення між шарами (зовнішній / внутрішній) для всіх зразків плит становило 33:67 %.

Частка КФ-смоли становила 14 і 9 % від маси сухої деревинної стружки для зовнішнього і внутрішнього шарів відповідно. Під час змішування смоли додавали 2,3 і 0,5 % розчину карбаміду та 0,2 і 0,6 % розчину сульфату амонію, виходячи з ваги сухих частинок для зовнішнього і внутрішнього шарів, відповідно. До смоли додавали парафінову емульсію (0,8 %) на основі ваги сухих частинок. Частинки змішували з підготовленим клеєм вручну. Після змішування обсмолені частинки рівномірно розподіляли вручну в прямокутній де-

рев'яній формі, яка була основою для формування килима. Сформований стружковий пакет ущільнювали вручну у формі. Далі попередньо спресований стружковий килим піддавали гарячому пресуванню в автоматично керованому гідравлічному лабораторному пресі за параметрів пресування прийнятих у практиці виготовлення плит: тиску 2,5 МПа, температури 190 °С і часі пресування 0,37 хв/мм. Упродовж останніх 30 с циклу пресування тиск поступово знижували до 0 МПа. Виготовлені плити піддавали кондиціонуванню відповідно до вимог стандарту EN 322 за температури 20<sup>±2</sup> °С і відносної вологості повітря 65<sup>±5</sup> % упродовж тижня.

**Табл. 1.** Експериментальні варіанти плит /  
Experimental boards variants

| Варіант плити | Цільова щільність плити, кг/м <sup>3</sup> | Частка частинок у внутрішньому шарі, % |                  |
|---------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|------------------|
|               |                                            | деревина                               | костриця коноплі |
| A0            | 350                                        | 100                                    | 0                |
| A25           |                                            | 75                                     | 25               |
| A50           |                                            | 50                                     | 50               |
| A75           |                                            | 25                                     | 75               |
| A100          |                                            | 0                                      | 100              |
| B0            | 450                                        | 100                                    | 0                |
| B25           |                                            | 75                                     | 25               |
| B50           |                                            | 50                                     | 50               |
| B75           |                                            | 25                                     | 75               |
| B100          |                                            | 0                                      | 100              |
| C0            | 550                                        | 100                                    | 0                |
| C25           |                                            | 75                                     | 25               |
| C50           |                                            | 50                                     | 50               |
| C75           |                                            | 25                                     | 75               |
| C100          |                                            | 0                                      | 100              |

Примітка: зовнішні шари на 100 % складаються з деревних частинок.

**Випробування дослідних зразків.** Після пресування плити стабілізували на повітрі до досягнення кімнатної температури. Потім плити кондиціонували впродовж одного тижня у приміщенні з кондиціонуванням, де підтримувалася відносна вологість 65<sup>±5</sup> % за температури 20 °С, перш ніж оцінити їхні властивості. Для кожного типу плит було виготовлено по три зразки. Після кондиціонування плити розрізали на взірці потрібних розмірів згідно з відповідними стандартами. Зразки кожної плити випробували відповідно до стандартів: міцність на згин (MOR) – ДСТУ EN 310, модуль пружності (MOE) – ДСТУ EN 310, міцність на розтяг перпендикулярно до площини плити (IB) – ДСТУ EN 319, а також на питомий опір витягування шурупів з площини та торця плити – ДСТУ EN 320. Випробування здійснювали на випробувальній машині Form+Test, після чого було проведено статистичний аналіз отриманих експериментальних результатів.

**Результати випробування.** Результати дисперсійного аналізу підтвердили статистично значущий вплив щільності плит на всі досліджувані їх властивості, тоді як вміст костриці коноплі не був значущим тільки для міцності на розтяг перпендикулярно до площини плити (табл. 2). Нагадаємо, дисперсійний аналіз ANOVA (англ. *Analysis of Variance*) – це статистичний метод, розроблений Р. Фішером для перевірки значущості відмінностей між середніми значеннями трьох або більше груп даних. Він розділяє загальну мінливість даних на складові, зумовлені впливом факторів (систематичні) та випадковими помилками. Метод дає можливість визна-

чити, чи впливає одна або кілька якісних змінних на кількісний результат.

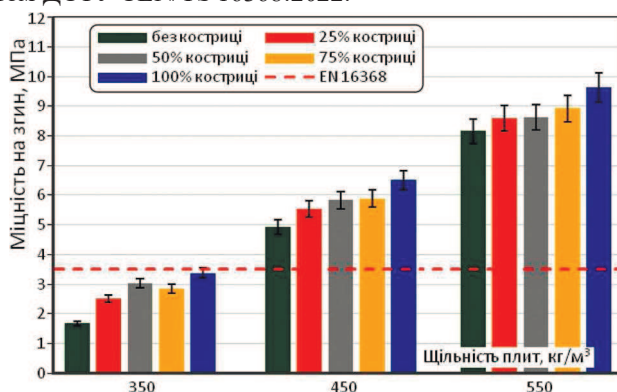
**Табл. 2.** Вплив змінних факторів на механічні властивості плит / The influence of variable factors on the mechanical properties of boards

| № п/п | Залежні змінні                                           | Факторні взаємодії         | Значення F-статистики | Значущість (P) |
|-------|----------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------|
| 1     | Межа міцності на згин (MOR)                              | Щільність                  | 765,15                | 0.000**        |
|       |                                                          | Вміст костриці             | 10,61                 | 0.000**        |
|       |                                                          | Щільність × Вміст костриці | 1,54                  | 0.147          |
| 2     | Модуль пружності (MOE)                                   | Щільність                  | 739,63                | 0.000**        |
|       |                                                          | Вміст костриці             | 23                    | 0.000**        |
|       |                                                          | Щільність × Вміст костриці | 12,11                 | 0.000**        |
| 3     | Міцність на розтяг перпендикулярно до площини плити (IB) | Щільність                  | 258,93                | 0.000**        |
|       |                                                          | Вміст костриці             | 2,28                  | 0.062          |
|       |                                                          | Щільність × Вміст костриці | 4,27                  | 0.000**        |
| 4     | Питомий опір витягування шурупів з площини плити         | Щільність                  | 508,99                | 0,000 **       |
|       |                                                          | Вміст костриці             | 11,87                 | 0,000 **       |
|       |                                                          | Щільність × Вміст костриці | 0,40                  | 0,912          |
| 5     | Питомий опір витягування шурупів з торця плити           | Щільність                  | 399,96                | 0,000 **       |
|       |                                                          | Вміст костриці             | 3,20                  | 0,027 **       |
|       |                                                          | Щільність × Костриця       | 0,73                  | 0,661          |

Примітка: значення  $p < 0,05$  позначено як статистично значущі (\*\*).

Графічну ілюстрацію впливу костриці конопелі на механічні властивості легких СП показано на рис. 1-5.

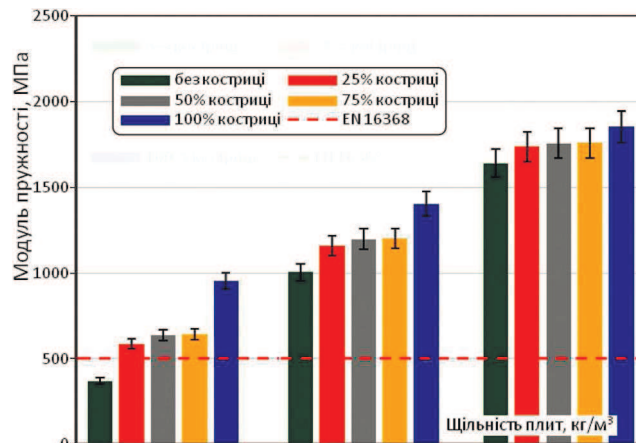
Значення MOR для плит із 100 % часткою костриці конопелі у внутрішньому шарі та щільністю 450 і 550 кг/м<sup>3</sup> збільшилися на 74,6 і 149,18 % відповідно порівняно із значеннями для плит із щільністю 350 кг/м<sup>3</sup>. Це можна пояснити тим, що кількість адгезійних контактів між стружкою збільшується із зростанням щільності плит. Окрім цього, для щільностей 450-550 кг/м<sup>3</sup> значення MOR (рис. 1) були вищими за мінімальне нижнє значення 3,5 МПа, встановлене стандартом ДСТУ CEN/TS 16368:2022.



**Рис. 1.** Міцність легких СП на згин (MOR) залежно від щільності плити та вмісту костриці конопелі / The bending strength limit (MOR) of lightweight particleboards depending on the density of the board and the content of hemp shives

Значення MOR для плит A100, B100 і C100 (3,66, 6,39 і 9,12 МПа), що містять 100 % костриці конопелі у внутрішньому шарі, були вищими за значення MOR для плит A0, B0 і C0 зі 100 % (1,94, 4,79 і 7,65 МПа) деревинної стружки (див. рис. 1). Оскільки костриця конопелі є легша за деревину, їх об'єм у плиті з такою самою щільністю більший, ніж об'єм деревини. Це призводить

до меншої пористості плит із костриці конопелі та більшої кількості клейових контактів між частинками.



**Рис. 2.** Модуль пружності легких СП (MOE) залежно від щільності плити та вмісту костриці конопелі / Modulus of elasticity of lightweight particleboards (MOE) depending on the density of the board and the content of hemp shives

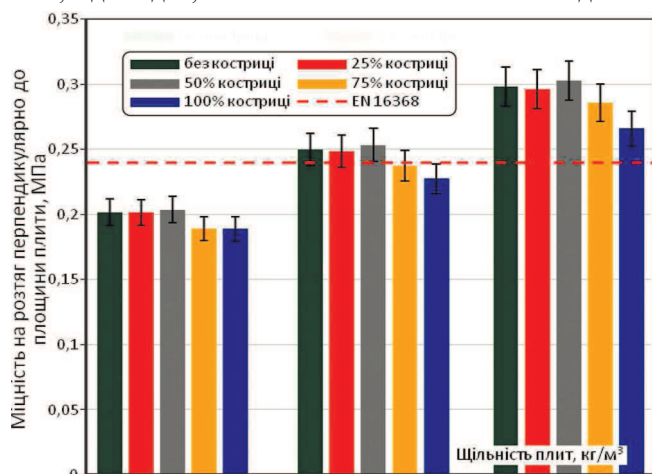
МОЕ СП збільшувався із збільшенням щільності та кількості костриці конопелі у внутрішньому шарі (рис. 2). Значення MOE збільшилися на 26,4 і 52,88 % для плит із 100 % костриці конопелі та щільністю 450 і 550 кг/м<sup>3</sup> відповідно, порівняно з цими значеннями для плит із щільністю 350 кг/м<sup>3</sup>. Подібно до MOR, це можна пояснити тим, що зі збільшенням щільності плити збільшується кількість контактів між частинками. Значення MOE для плит з додаванням костриці конопелі зі щільністю 350 кг/м<sup>3</sup> (A100), 450 і 550 кг/м<sup>3</sup> перевищують стандарт ДСТУ CEN/TS 16368:2022 для СП загального призначення (LP1) 500 МПа.

Значення MOE для плит A100, B100 і C100 (1071,8, 1355,2 і 1638,5 МПа), що містять 100 % костриці конопелі у внутрішньому шарі, були вищими за значення для плит A0, B0 і C0 (459,5, 965,27 і 1471 МПа) із 100 % деревинною стружкою, що не збігається з результатами дослідження інших авторів [24]. Припускаємо, що збільшення MOE плит, як за рахунок збільшення їх щільності, так і за рахунок костриці конопелі у внутрішньому шарі, відбулося за рахунок зменшення пористості плити та збільшення кількості клейових контактів.

Збільшення щільності СП та кількості частинок у внутрішньому шарі досить позитивно впливає на міцність IB (рис. 3). Однак не всі типи плит, що випробовувалися, відповідали вимогам стандарту ДСТУ CEN/TS 16368:2022. Встановлено, що значення міцності IB для плит із B25 %, B50 %, а також для плит із C25 %, C50 %, C75 % і C100 % були вищими за нижню межу 0,24 МПа для плит загального призначення (LP1). Значення міцності IB для усіх досліджуваних плит зі щільністю 350 кг/м<sup>3</sup> не відповідали встановленим вимогам. Можна зробити висновок, що достатньої кількості клейових з'єднань у пористих плитах низької щільності недостатньо для міцного з'єднання частинок деревини.

Значення міцності IB збільшилися на 33,3 і 60,32 % для плит із 100 % часткою костриці конопелі у внутрішньому шарі та щільністю 450 і 550 кг/м<sup>3</sup> відповідно, порівняно зі щільністю 350 кг/м<sup>3</sup>. Зниження міцності IB у плитах із 100 % вмістом костриці конопелі у внутрішньому шарі може бути пов'язане зі структурними особливостями матеріалу. Костриця конопелі характеризується високою насипною щільністю та більш пористою стру-

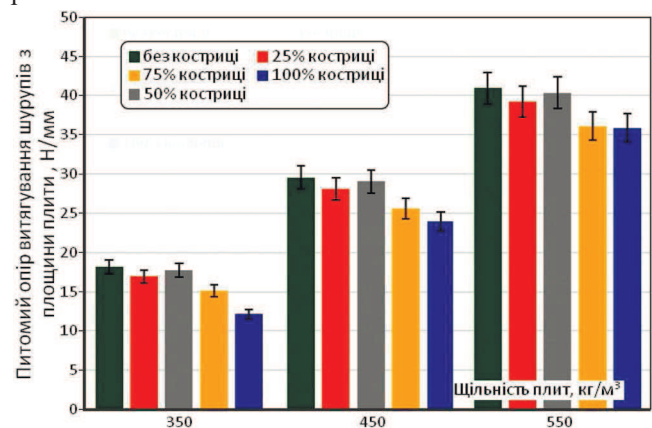
ктурою, що зумовлює інтенсивніше поглинання КФ-смоли й, відповідно, зменшення кількості клейових з'єднань.



**Рис. 3.** Міцність легких СП на розтяг перпендикулярно до площини плити (ІВ) залежно від щільності плити та вмісту костриці конопель / The strength of the internal connection of lightweight particleboards in tension perpendicular to the plane of the board (IB) depending on the density of the board and the content of hemp shives

Питомий опір витягування шурупів із площини СП істотно залежав від щільності плити та вмісту костриці конопель. За однакової щільності збільшення частки костриці конопель у складі плит призводило до зниження значень питомого опору витягування шурупів із площини (рис. 4).

Для зразків плит А100 характерне зменшення питомого опору витягування шурупів із площини на 22,97 % порівняно з контрольними плитами, виготовленими винятково з деревинних частинок. За проміжного вмісту костриці (25-50 %) зниження показника було менш вираженим і становило 3-8 %.



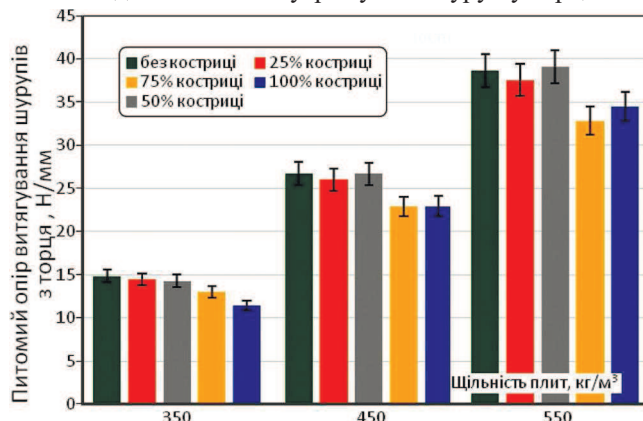
**Рис. 4.** Питомий опір витягування шурупів із площини легких СП залежно від щільності плит і вмісту костриці конопель / Specific resistance to screw extraction from lightweight particleboards panels depending on panel density and hemp shives content

Зі збільшенням щільності плит до 450-550 кг/м³ негативний вплив костриці конопель зменшувався. Зокрема, для плит С100 питомий опір витягування шурупів із площини був нижчим за контрольні значення тільки на 10,7 %, що свідчить про компенсаційний вплив підвищеної щільності на здатність плит утримувати кріпильні елементи.

Питомий опір витягування шурупів з торця плити був нижчим порівняно з витягуванням із площини плити для всіх досліджуваних варіантів, у такий спосіб де-

монстрував аналогічні закономірності впливу щільності та складу плит (рис. 5).

Для плит А100 використання костриці коноплі призводило до зниження питомого опору витягування шурупів з торця приблизно на 20 % порівняно з контрольними плитами без костриці. За вмісту костриці 25-50 % зменшення показника не перевищувало 5-10 %, що свідчить про помірний вплив заміни деревинної сировини на здатність плити утримувати шуруп у торці.



**Рис. 5.** Питомий опір витягування шурупів з торця легких СП залежно від щільності плит і вмісту костриці конопель / Specific resistance to screw extraction from the end face of lightweight particleboards depending on board density and hemp shives content

Плити щільністю 550 кг/м³, зразки зі 100 % вмістом костриці конопель мали питомий опір витягування шурупів з торця нижчий за контрольні значення на 9-11 %, тоді як за меншої частки костриці відмінності були незначними. Це підтверджує, що підвищення щільності плити істотно знижує негативний вплив костриці конопель на опір витягуванню шурупів з торця.

Підсумовуючи зазначене вище, можна стверджувати, що властивості легких СП, частково виготовлених з костриці коноплі у внутрішньому шарі, зазвичай є кращими за властивості стружкових плит, виготовлених повністю з частинок деревини.

**Обговорення результатів дослідження.** Отримані результати підтверджують доцільність використання костриці коноплі як альтернативної сировини для виробництва легких СП, що узгоджується з висновками попередніх досліджень у цій галузі. Встановлено, що щільність плити є домінуючим фактором, який визначає рівень механічних властивостей, що також відзначали інші автори для СП [4, 26]. Зі зростанням щільності від 350 до 550 кг/м³ спостерігалось істотне підвищення показників MOR, MOE та ІВ, що можна пояснити зменшенням пористості матеріалу та збільшенням кількості ефективних клейових контактів між частинками.

Порівняння з результатами [1] показує, що вплив костриці коноплі на MOR і MOE за її часткового вмісту (10-25 %) є незначним для плит щільністю близько 650 кг/м³. Натомість у межах цього дослідження встановлено, що за меншої щільності (450-550 кг/м³) використання костриці коноплі у внутрішньому шарі може не тільки зберігати, а й підвищувати показники MOR і MOE порівняно з контрольними плитами зі 100 % деревини. Зокрема, для плит щільністю 550 кг/м³ зі 100 % костриці у внутрішньому шарі значення MOR і MOE були вищими на 19,22 і 11,38 % відповідно, що свід-

чить про ефективну участь костриці у формуванні несної структури плити.

Отримані результати частково відрізняються від даних, наведених в роботі [24], які зазначали відсутність істотних відмінностей між плитами з деревинною стружкою та з кострицею коноплі за щільності  $650 \text{ кг/м}^3$ , а саме покращення показників MOR та MOE, і зменшення IB зі зростанням частки костриці коноплі у внутрішньому шарі плити, ймовірно, таку різницю можна пояснити нижчим діапазоном щільності у цьому дослідженні та використанням тришарової структури, де костриця локалізована тільки у внутрішньому шарі, що дає змогу ефективніше поєднати її низьку щільність з високою міцністю зовнішніх шарів.

Щодо міцності на розтяг перпендикулярно до площини плити (IB), отримані результати підтверджують загальну тенденцію, описану в літературі, згідно з якою зменшення щільності призводить до зниження IB через недостатню кількість клейових зв'язків у пористій структурі [25]. Водночас, встановлено, що для плит щільністю  $450$  і  $550 \text{ кг/м}^3$  із вмістом костриці до  $50\%$  показники IB відповідали або перевищували мінімальні вимоги ДСТУ CEN/TS 16368:2022 для класу LP1, що свідчить про технологічну прийнятність таких композицій.

Результати дослідження питомого опору витягування шурупів узгоджуються з даними інших авторів, які вказують на зниження утримувальної здатності кріпильних елементів у легких плитах із підвищеним вмістом агроволокон [6, 30]. Зменшення цього показника за використання костриці коноплі пов'язане з нижчою локальною щільністю матеріалу та меншою здатністю частинок чинити опір вириванню шурупа. Проте встановлено, що підвищення щільності плит до  $550 \text{ кг/м}^3$  істотно знижує негативний ефект заміни деревинної сировини: зменшення питомого опору витягування шурупів не перевищувало  $10\text{--}11\%$ , що можна розглядати як прийнятний рівень для меблевих і не несних конструкцій.

На відміну від стужкових плит наднизької щільності ( $300^{\pm 30} \text{ кг/м}^3$ ), досліджених у роботі [30], які рекомендовані переважно для теплоізоляційних застосувань, плити, виготовлені в межах цього дослідження, демонструють поєднання зниженої щільності з достатнім рівнем механічних характеристик, що розширює сферу їх практичного використання.

У роботі [15] наведено результати виготовлення міцного дерев'яного ламінованого композиту як екологічного декоративного будівельного матеріалу. Автори вважають, що делігніфікована деревина (ДД), що зберігає свою мікроструктуру, все частіше використовується як альтернатива синтетичним або натуральним волокнам у виробництві волокнисто-армованих композитів для нових світлопроникних, високоміцних конструкційних матеріалів. У своєму дослідженні деревно-шаровий композит (ДШК) був отриманий шляхом просочення циклоаліфатичною епоксидною смолою (ЦАЕ) та ламінування з використанням ДД як безперервного армуючого волокна. Результати експерименту показали, що ДД ефективно зміцнювала структуру композиту, збільшуючи міцність епоксидної смоли на  $25,44\%$ , тоді як ЦАЕ змінювала непрозорість деревини, досягаючи коефіцієнта пропускання до  $74,83\%$ . Механічні та оптичні властивості ДШК можна ефективно налаштовувати за допомогою різних комбінацій ламінування.

Унаслідок обговорення результатів дослідження з'ясовано, що раціональне поєднання щільності плити та вмісту костриці коноплі у внутрішньому шарі дає змогу отримати легкі СП, які відповідають вимогам ДСТУ CEN/TS 16368:2022 та за окремими показниками перевищують властивості традиційних плит. Це підтверджує перспективність використання костриці коноплі як екологічно доцільної та технологічно ефективної альтернативи деревинній сировині.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – отримала подальший розвиток технологія виготовлення легких СП, яка, на відміну від наявних, передбачає повну та часткову заміну деревинної стружки у внутрішньому шарі тришарових плит стружкою, що уможливило скорочення використання деревини, підвищило екологічність та знизило собівартість їх виготовлення, тобто було отримано новий композиційний матеріал з покращеними та унікальними механічними властивостями.

*Практична значущість результатів дослідження* – виготовлені легкі СП з частковою або повною заміною деревинної стружки кострицею коноплі у внутрішньому шарі та щільністю  $550 \text{ кг/м}^3$  за основними механічними показниками вони відповідають вимогам стандарту ДСТУ CEN/TS 16368:2022 для класів LP1 і LP2, що створює передумови для розширення сировинної бази виробництва за рахунок використання відходів сільськогосподарського походження, скорочення споживання деревинної сировини, зниження собівартості продукції та підвищення екологічної стійкості процесу виготовлення СП.

## Висновки / Conclusions

Встановлено вплив додавання стружки костриці коноплі до деревинної стружки на механічні властивості легких СП, що забезпечило скорочення використання деревини, підвищило екологічність та знизило собівартість їх виготовлення, тобто було отримано новий композиційний матеріал з покращеними та унікальними механічними властивостями. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Встановлено, що механічні властивості легких СП істотно залежать від щільності та вмісту костриці коноплі у внутрішньому шарі. За даними ANOVA щільність має статистично значущий вплив на MOR, MOE, IB, а також питомий опір витягування шурупів із площини та торця, тоді як вміст костриці є значущим для MOR, MOE і показників утримання шурупів ( $p < 0,05$ ).
2. З'ясовано, що СП із вмістом  $100\%$  деревини у зовнішніх шарах і  $100\%$  костриці коноплі у внутрішньому шарі демонструють вищі MOR і MOE порівняно з контрольними плитами зі  $100\%$  деревини за однакової щільності. Для щільності  $550 \text{ кг/м}^3$  значення MOR і MOE перевищували контрольні на  $19,22$  та  $11,38\%$  відповідно, тоді як IB був меншим на  $8,26\%$ , що відповідає вимогам ДСТУ CEN/TS 16368:2022.
3. Виявлено, що для плит із щільністю  $450 \text{ кг/м}^3$  виконання вимог ДСТУ CEN/TS 16368:2022 щодо MOR забезпечувалося для класу LP1, щодо MOE – для LP1 і LP2, а щодо IB – для варіантів із  $0\text{--}50\%$  костриці. Для плит із щільністю  $550 \text{ кг/м}^3$  із  $50\%$  костриці показники MOR, MOE та IB відповідали вимогам LP1 і LP2, що

підтверджує придатність цих композицій для застосування у меблевому виробництві.

4. З'ясовано, що часткова заміна деревинної стружки кострицею знижує питомий опір витягування шурупів. Для плит щільністю 350 кг/м<sup>3</sup> із 100 % костриці зменшення становило 22,97 % (площина) і 20 % (торець) відносно контрольних плит; при 550 кг/м<sup>3</sup> зменшення зменшувалося до 10,7 % (площина плити) і 9-11 % (торець), що свідчить про компенсаційний ефект підвищеної щільності.
5. Використання костриці коноплі у внутрішньому шарі дає змогу скоротити споживання деревини, зберігаючи або покращуючи жорсткість і міцність при згині та забезпечуючи відповідність ДСТУ CEN/TS 16368:2022 у діапазоні 450–550 кг/м<sup>3</sup>, що робить матеріал технологічно та екологічно доцільним для промислового впровадження.

## References

1. Auriga, R., Pędzik, M., Mrozowski, R., & Rogozinski, T. (2022). Hemp shives AS a raw material for the production of particleboards. *Polymers*, 14(23), article ID 5308. <https://doi.org/10.3390/polym14235308>
2. Balducci, F., Harper, C., Meinschmidt, P., Dix, B., & Sanasi, A. (2008). Development of Innovative Particleboard Panels. *Drvna industrija*, 59(3), 131–136. URL: [https://www.researchgate.net/publication/26568477\\_Development\\_of\\_Innovative\\_Particleboard\\_Panels](https://www.researchgate.net/publication/26568477_Development_of_Innovative_Particleboard_Panels)
3. Bekhta, P., Korkut, S., & Hizirolu, S. (2013). Effect of pretreatment of raw material on properties of particleboard panels made from wheat straw. <https://doi.org/10.15376/biores.8.3.4766-4774>
4. Bekhta, P., Kozak, R., Sedláček, J., Gryc, V., Sebera, V., Bajzová, L., & Iždinský, J. (2022). Selected properties of veneered lightweight particleboards with expanded polystyrene. *Materials*, 15(18), article ID 6474. <https://doi.org/10.3390/ma15186474>
5. Bresnahan, S. (2022). Why Are Trees Important to the Ocean?. URL: <https://www.wellkind.org/blog/ym63d9rbtfq2syoc1gibpl3w4sh9qm>
6. Dziurka, D., & Mirski, R. (2013). Lightweight boards from wood and rape straw particles. *Drewno*, 56(190), 19–31. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.051.02>
7. European Panel Federation. (2026). Wood-Based Panel Industry. Types of WoodBased Panels and their Economic Impact. URL: <https://europanel.org/the-wood-based-panel-industry/types-of-wood-based-panels-economic-impact/>
8. Ghofrani, M., Ashori, A., & Mehrabi, R. (2017). Mechanical and acoustical properties of particleboards made with date palm branches and vermiculite. *Polymer Testing*, 60, 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.03.028>
9. Guler, C., & Ozen, R. (2004). Some properties of particleboards made from cotton stalks (*Gossypium hirsutum* L.). *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62, 40–43. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0439-9>
10. Hussein, Z., Ashour, T., Khalil, M., Bahnasawy, A., Ali, S., Hollands, J., & Korjenic, A. (2019). Rice straw and flax fiber particleboards AS a product of agricultural waste: an evaluation of technical properties. *Applied Sciences*, 9(18), article ID 3878. <https://doi.org/10.3390/app9183878>
11. Kara, M. E. (2025). Mechanical and physical properties of particleboard produced from hemp plant. *BioResources*, 20(3), 5361–5376. <https://doi.org/10.15376/biores.20.3.5361-5376>
12. Khojasteh-Khosro, S., Shalbafan, A., & Thoemen, H. (2020). Preferences of furniture manufacturers for using lightweight wood-based panels AS eco-friendly products. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78, 593–603. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01519-8>
13. Khristova, P., Yossifov, N., & Gabir, S. (1996). Particle board from sunflower stalks: preliminary trials. *Bioresource Technology*, 58(3), 319–321. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(96)00112-5)
14. Kord, B., Roohani, M., & Kord, B. (2015). Characterization and utilization of reed stem AS a lignocellulosic residue for particleboard production. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 17, 517–524. <https://doi.org/10.4067/S0718-221x2015005000046>
15. Li, Z., Qin, Sh., Bai, Z., & Hu, Y. (2024, November). A transparent, strong, moldable wood laminated composite as a sustainable decorative building material. *Industrial Crops and Products*, vol. 219, article ID 119076. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119076>
16. Mantau, U. (2012). Wood flows in Europe (EU27). Project report. Celle 2012, 24 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/291034739\\_Wood\\_flows\\_in\\_Europe\\_EU\\_27](https://www.researchgate.net/publication/291034739_Wood_flows_in_Europe_EU_27)
17. Mantau, U., et al. (2010). EUwood. Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report. Hamburg, Germany, 160 p. URL: [https://www.probos.nl/images/pdf/rapporten/Rap2010\\_Real\\_potential\\_for\\_changes\\_in\\_growth\\_and\\_use\\_of\\_EU\\_forests.pdf](https://www.probos.nl/images/pdf/rapporten/Rap2010_Real_potential_for_changes_in_growth_and_use_of_EU_forests.pdf)
18. Michanicki, A. (2006). Development of a New Light Wood-Based Panel. In *Proceedings of the 5th European wood-based panel symposium*. Hannover, Germany, pp. 4–6. URL: [https://www.researchgate.net/publication/236986401\\_Development\\_of\\_a\\_New\\_Light\\_Wood-Based\\_Panel](https://www.researchgate.net/publication/236986401_Development_of_a_New_Light_Wood-Based_Panel)
19. Mirski, R., Banaszak, A., & Bekhta, P. (2021). Selected properties of formaldehyde-free polymer-straw boards made from different types of thermoplastics and different kinds of straw. *Materials*, 14(5), article ID 1216. <https://doi.org/10.3390/ma14051216>
20. Moulana, R. (2012). Utilization of Hemp (*Cannabis sativa* L.) AS an Alternative Raw Material for the Production of Three-Layered Particleboard. In *Proceedings of the 2nd Annual International Conference Syiah Kuala University*, Banda Aceh, Indonesia, 22–24 November 2012, vol. 2. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Utilization-of-hemp-%28Cannabis-sativa-L.%29-AS-an-raw-Moulana/139e39c40b01b7ecd970690f09d102b28b322a47>
21. Neitzel, N., Hosseinpourpia, R., Walther, T., & Adamopoulos, S. (2022). Alternative Materials, from Agro-Industry for Wood Panel Manufacturing – A Review. *Materials*, 15, article ID 4542. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/13/4542>
22. Papadopoulos, A. N., Kyzas, G. Z., & Mitropoulos, A. C. (2019). Lignocellulosic composites from acetylated sunflower stalks. *Applied Sciences*, 9 (4), article ID 646. <https://doi.org/10.3390/app9040646>
23. Pipiska, T., Paschová, Z., Král, P., Nociar, M., Červenka, J., Meyer, M., & Wimmer, R. (2023). Alternative particleboards based on treated and untreated hay. *BioResources*, 18(1), 357–366. <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.357-366>
24. Reh, R., & Vrtielka, J. (2013). Modification of the core layer of particleboard with hemp shives and its influence on the particleboard properties. *Acta Facultatis Xylogologiae*, 55(1), 51–59. URL: [https://www.researchgate.net/publication/289303750\\_Modification\\_of\\_the\\_core\\_layer\\_of\\_particleboard\\_with\\_hemp\\_shives\\_and\\_its\\_influence\\_on\\_the\\_particleboard\\_properties](https://www.researchgate.net/publication/289303750_Modification_of_the_core_layer_of_particleboard_with_hemp_shives_and_its_influence_on_the_particleboard_properties)
25. Sam-Brew, S., & Smith, G. D. (2017). Flax shive and hemp hurd residues AS alternative raw material for particleboard production. *BioResources*, 12(3), article ID 5715–5735. <https://doi.org/10.15376/biores.12.3.5715-5735>
26. Suchsland, O., & Woodson, G. E. (1987). Fiberboard Manufacturing Practices in the United States. U. S. Department of Agriculture, Forest Service: Wash., DC, USA 1987, 263 p. Agriculture Handbook. URL: [https://books.google.com.ua/books/about/Fiberboard\\_Manufacturing\\_Practices\\_in\\_th.html?id=i\\_4T-8VeYX4C&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/Fiberboard_Manufacturing_Practices_in_th.html?id=i_4T-8VeYX4C&redir_esc=y)
27. Sun, S., Mathias, J. D., Toussaint, E., & Grediac, M. (2013). Hygromechanical characterization of sunflower stems. *Industrial Crops and Products*, 46, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.01.009>
28. Yalinkilic, M. K., Imamura, Y., Takahashi, M., Kalaycioglu, H., Nemli, G., Demirci, Z., & Ozdemir, T. (1998). Biological, physical and mechanical properties of particleboard manufactured from waste tea leaves. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 41(1), 75–84. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(98\)80010-3](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(98)80010-3)
29. Yeniocak, M., Goktas, O., Erdil, Y. Z., Ozen, E., Alma, M. H. (2014). Investigating the use of vine pruning stalks (*Vitis vinifera* L. cv. Sultani) AS raw material for particleboard manufacturing. *Wood Research*, 59(1), 167–176. URL: [https://www.researchgate.net/publication/286566590\\_Investigating\\_the\\_use\\_of\\_vine\\_pruning\\_stalks\\_Vitis\\_vinifera\\_L\\_CV\\_sultani\\_AS\\_raw\\_material\\_for\\_particleboard\\_manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/286566590_Investigating_the_use_of_vine_pruning_stalks_Vitis_vinifera_L_CV_sultani_AS_raw_material_for_particleboard_manufacturing)

## **MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT PARTICLE BOARDS CONTAINING HEMP SHIVES**

This study investigates the efficiency of producing lightweight particleboards using hemp shives *AS* a partial replacement for wood particles in the core layer. The study tested three-layer particleboards with target densities of 350, 450, and 550 kg/m<sup>3</sup> and five wood – hemp shive ratios in the core layer (100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100), while the face layers consisted exclusively of wood particles bonded with urea – formaldehyde adhesive. Mechanical performance was evaluated in terms of modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), internal bond strength (IB), and screw withdrawal resistance from the face and edge. The results demonstrate that replacing wood particles with hemp shives significantly affects board performance, consequently enabling the optimization of material composition. For example, panels with 100 % hemp shives in the core layer exhibited higher bending properties than the reference boards at equal density, with MOR and MOE at 550 kg/m<sup>3</sup> exceeding those of wood-based controls by 19.22 % and 11.38 %, respectively, whereas IB decreased by 8.26 % but remained within the requirements of DSTU CEN/TS 16368:2022. Moreover, boards with a density of 450 kg/m<sup>3</sup> met the LP1 requirements for bending strength and IB, and LP1-LP2 requirements for stiffness, when the hemp shive content did not exceed 50 %, while boards with 50 % hemp shives at 550 kg/m<sup>3</sup> satisfied all mechanical criteria for both LP1 and LP2 classes. Screw withdrawal resistance decreased with increasing hemp shive content; *AS* a result, boards with 100 % hemp shives at 350 kg/m<sup>3</sup> showed reductions of 22.97 % from the face and about 20 % from the edge compared with reference boards. However, increasing density to 550 kg/m<sup>3</sup> reduced these losses to 10.7 % and 9-11 %, respectively, indicating a compensating effect of densification. The benefits of this study include demonstrating that hemp shives can effectively reduce wood consumption while maintaining or enhancing key mechanical properties, thereby supporting their potential use in sustainable lightweight particleboard production and motivating further optimization of board structure and adhesive systems.

**Keywords:** agricultural waste; low density of slabs; alternative raw materials; bending strength; modulus of elasticity; tensile strength perpendicular to the slab plane; specific resistance to screw extraction.