

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій і дизайну

Кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів,  
целюлози та паперу

УДК 674.093.26

## Пояснювальна записка

до дипломної роботи магістра на тему:

### “Можливості використання маловживаних порід деревини у виробництві стружкових плит”

**Виконав:** студент групи ТДКМ(м)-61 спеціальності 161 “Хімічні технології та інженерія”

 Капінус І.І.  
(підпис)

**Керівник:** проф. каф. ТДКМ, д.т.н.

 Бехта П.А.  
(підпис)

**Рецензент:** доцент каф. ТЗЧСДБНД

 (підпис)  Соколовський І.А.  
(прізвище та ініціали)

Львів – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій і дизайну  
Кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу  
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія  
Спеціалізація Технології деревинних композиційних матеріалів і модифікування деревини

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри 

д.т.н., проф. Бехта П.А.

“ 17 ” зрудня 2024 року

З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ МАГІСТРА СТУДЕНТУ

Капінусу Ігореві Івановичу

1. Тема роботи Можливості використання маловживаних порід деревини у виробництві стружкових плит

керівник роботи проф. кафедри ТДКМ Бехта Павло Антонович, д.т.н.,  
затверджені наказом університету від “ 24 ” липня 2024 року № С-477.

2. Термін подання студентом роботи 16 зрудня 2024.

3. Вихідні дані до роботи Проаналізувати сучасний стан використання маловживаних порід деревини у виробництві стружкових плит з орієнтованою стружкою. Визначити характеристики стружки, отриманої з кожної породи деревини окремо. Дослідити кореляційний аналіз між характеристиками стружки і відповідними характеристиками плит. Порівняти фізико-механічні властивості плит, виготовлених із різних маловживаних порід деревини.

4. Зміст пояснювальної записки (розділи, які потрібно розробити)

1. Стан питання та завдання дослідження
2. Методика експериментальних досліджень
3. Результати досліджень.
4. Висновки
5. Дата видачі завдання 03.06.2024 р.

Студент  І.І. Капінус

Керівник роботи  П.А. Бехта

## АНОТАЦІЯ

Промисловість деревних плит у Європі, в якій домінує переважно використання ялини, зіткнеться з новими викликами через екологічні зміни та нашестя короїдів, що започаткувало нову еру в лісовому господарстві. Для дослідження можливості заміни ялини іншими видами деревини у виробництві орієнтованих-стружкових плит (OSB) було використано дев'ять різних мало використовуваних порід деревини (сосна звичайна, модрина європейська, тополя, верба, вільха, береза, бук європейський, дуб англійський та граб). Для виробництва одношарових OSB використовували 3% полімерного метилендифенілдіізоціанатного (pMDI) клею та 0,5% воску. Проведено стандартні випробування фізичних і механічних властивостей плит. Показники міцності на вигин (MOR) показали, що статистично значущої різниці між показниками ялини (34,6 МПа) та таких порід, як модрина (25,9 МПа), тополя (25,2 МПа), верба (27,8 МПа), вільха (34,3 МПа), і береза (27,1 МПа), не виявлено. Схожа тенденція була зафіксована для модуля пружності (MOE): найвищі значення MOE склали 5185 МПа для ялини та 4472 МПа для вільхи. Також не було значної різниці у міцності на внутрішнє склеювання між ялиною та іншими породами деревини. Плити, виготовлені з деревини високої щільності, демонстрували кращі фізичні властивості, тоді як плити з деревини низької щільності (за винятком сосни) мали кращі механічні показники. Крім того, було проаналізовано характеристики стружки, такі як коефіцієнт витягнутості та питома поверхня, для їх впливу на фізичні та механічні властивості плит. У результаті модрина європейська, тополя, верба та вільха були визначені як перспективні породи деревини для виготовлення OSB без змішування, що дозволяє використовувати їх як заміну ялини у виробництві деревних плит.

**Ключові слова:** орієнтовано-стружкові плити, мало використовувані породи деревини, pMDI, фізико-механічні властивості

## ЗМІСТ

1. Аналіз проблеми, мета та завдання дослідження.....	Помилка! Закладку не визначено.
2. Матеріали та методи.....	9
2.1. Матеріали .....	9
2.2. Виготовлення стружкових плит.....	10
2.3. Процедури тестування.....	10
2.3.1. Розміри стружки.....	10
2.3.2. Щільність і профіль щільності .....	11
2.3.3. Аналіз SEM.....	11
2.3.4. Взаємодія деревини з водою.....	11
2.3.5. Механічні властивості.....	12
2.4. Статистичний аналіз.....	12
3. Результати та обговорення.....	12
3.1. Розміри стружки.....	12
3.2. Щільність зразків плит .....	14
3.3. Профіль щільності зразків плит.....	17
3.4. Фізичні властивості зразків плит .....	19
3.5. Механічні властивості зразків плит .....	22
Висновки .....	29
Список літератури .....	30

## 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Протягом останніх десятиліть зміни навколишнього середовища та нашестя короїда відкрили нову еру у лісовому господарстві та виробництві деревних композитів. Європейська індустрія деревних плит, орієнтована переважно на ялину (*Picea abies*), також зіткнеться з новими викликами. Деякі дослідження показали, що використання листяних порід деревини (модрини, берези, осики тощо) та швидкорослих дерев (тополя тощо) стане майбутнім напрямком для лісового господарства (Pérez et al. 2012). Очікувані зміни в лісах — від монокультур ялини до змішаних насаджень із прогнозованим прорідженням лісів — забезпечать матеріал із невеликим діаметром і низькоякісною деревиною. У виробництві орієнтованих-стружкових плит (OSB) зазвичай використовують низькоякісні породи деревини, тонкі колоди та відходи деревообробки для створення продукції з доданою вартістю, зменшуючи тим самим потребу у старовікових лісах та високоякісній деревині (Moses and Prion 2004; Ross 2010).

Виробництво OSB останнім часом збільшилося у всьому світі з 34,8 млн м<sup>3</sup> у 2020 році до 36,3 млн м<sup>3</sup> у 2022 році (Продовольча та сільськогосподарська організація ООН, 2023). Запаси основних порід деревини у Європі у 2020 році показали, що на сосну припадає 29,6%, ялину — 23,0%, бук — 11,9%, дуб — 10,0%, березу — 6,6%, ялицю — 3,2%, а інші породи становлять 15,7% (Köhl 2020). Це вказує на великий потенціал використання мало використовуваних порід деревини для виробництва деревинних композитів (Beck et al. 2009).

Дослідження Lunguleasa et al. (2021) порівняло властивості OSB, виготовлених із ялини (*Picea abies*), сосни (*Pinus sylvestris*), та швидкорослих тополі (*Populus tremula*) і верби (*Salix alba*). OSB з густиною 700 кг/м<sup>3</sup> виготовляли з використанням 6% метилендифенілдиізоціанатного (MDI) клею. Плити з тополі та верби продемонстрували покращену міцність на вигин (MOR) (44,5 МПа проти 27,1 МПа) та збільшену міцність склеювання (IB) (1,3 МПа). Okino et al. (2004) проаналізували вплив 80 мм довжини стружки сосни (*Pinus taeda* L.) на властивості

OSB з густиною 750 кг/м<sup>3</sup>, підтвердивши придатність *Pinus taeda* L. для виробництва OSB. Результати підтвердили доцільність використання *Pinus taeda* L. для виробництва OSB. Роль трьох різних довжин стружки *Pinus taeda* L. (12, 15 і 30 см) була досліджена в роботі Chiromito et al. (2016). Збільшення довжини стружки позитивно впливало як на міцність на вигин (MOR), так і на модуль пружності (MOE). OSB із берези та осики було досліджено Beck et al. (2009, 2010), які використовували суміш рідкого та порошкового фенолформальдегідного клею (7% від маси сухої деревини). Механічні параметри зробили прототипи OSB конкурентно спроможними з іншими інженерними деревними продуктами. У дослідженнях наголошується на важливості оптимізації довжини стружки: довга стружка забезпечувала високу міцність на вигин, а коротка стружка — високу міцність на стискання. Збільшення вмісту клею призводило до покращення внутрішньої міцності склеювання (IB), але властивості на вигин залишалися незмінними в межах дослідженого діапазону вмісту клею.

У дослідженні Dumitrascu et al. (2020) для виробництва OSB використовували тонкі колоди швидкорослих порід деревини, таких як береза (*Betula pendula* Roth.), верба (*Salix alba* L.) та тополя (*Populus tremula* L.). Стружка була змішана з клеєм рMDI (10%) для виготовлення плит густиною 610 кг/м<sup>3</sup>. Результати показали, що ці три породи деревини можна використовувати як окрему сировину для виробництва OSB. Використання деревини кірі (*Paulownia tomentosa*), сосни (*Pinus sylvestris*) та бука (*Fagus sylvatica*) для виготовлення легких стружкових плит густиною 300 і 400 кг/м<sup>3</sup> дало перспективні результати для деревини кірі та сосни (Pham Van et al. 2021). Бальзамічна ялиця, чорна ялина та жовта сосна використовувалися для виготовлення OSB плит густиною 600 кг/м<sup>3</sup> та фенолформальдегідним клеєм (Zhuang et al. 2022). Плиті, виготовлені з м'яких порід деревини, мали фізичні та механічні властивості, які перевищували стандартні вимоги, за винятком вищого показника набрякання за товщиною (TS). Комбінація стружки з м'яких порід деревини та осики значно покращила показник набрякання OSB виготовлених із м'якої деревини. Дослідження Ciobanu et al.

(2014) було зосереджено на OSB, виготовлених із суміші 50% деревини хвойних порід (ялина - *Picea abies*, ялиця - *Abies alba*, сосна - *Pinus sylvestris*, модрина - *Larix decidua*), 25% бука (*Fagus sylvatica*) і 25% різних порід деревини низької щільності (тополя - *Populus tremula*, береза - *Betula pendula*, верба - *Salix alba*, вільха - *Alnus glutinosa*). Суміш стружки була змішана з клеєм MUF для лицьового шару та клеєм pMDI для серцевинного шару. Результати показали, що плити із суміші деревини відповідала вимогам EN 310 щодо механічних властивостей, але не відповідала вимогам щодо водопоглинання. Суміш стружки з берези та осики була досліджена Jin та ін. (2009) у OSB для вивчення впливу вертикального профілю щільності (VDP). Близько 10% покращення MOE можна було досягти шляхом маніпулювання VDP. Плити були виготовлені з використанням 3,5% фенолформальдегідного клею (PF) та 0,5% емульсії воску. Ще одне дослідження Акюйдіз et al. (2018) використовувало суміш чорної сосни (*Pinus nigra* A.), звичайної сосни (*Pinus sylvestris* L.) та ялиці (*Abies nordmanniana* L.) у співвідношенні 80%, 15% і 5%, відповідно. Акрамі et al. (2014а, 2015) аналізували властивості OSB, виготовлених із суміші бука та тополі. Збільшення кількості стружки з бука покращувало механічні властивості, але водночас знижувало набрякання за товщиною (TS). Вплив дрібної стружки в серцевинному шарі, змішаної в різних пропорціях і комбінаціях бука та тополі, було вивчено на плитах густиною 650 кг/м<sup>3</sup>, склеєних 5% смолою pMDI (Акрамі et al. 2014b).

У виробництві деревних плит можуть використовуватися різні види клеїв, такі як амінопластичні смоли (UF, MF та MF/UF), фенольні смоли (PF) або ізоціанати (pMDI) (Dunky і Pizzi 2002, Irle і Barbu 2010, Mendes et al. 2013). Смоли pMDI з добавками в різних відсотках, особливо для серцевинного шару, застосовуються у виробництві OSB в Європі (Mantanis et al. 2018). Комбінована система з використанням PF для поверхневих шарів і pMDI для серцевинних шарів застосовувалася для виготовлення OSB із різних видів деревини, таких як осика, сосна, каучукове дерево, червоний клен і бамбук (Brochmann et al. 2004; Malanit і Laemsak 2007; Paredes 2008; Ciobanu et al. 2014; Salem et al. 2018).

На основі попередніх досліджень було встановлено, що такі фактори, як вид деревини, щільність, геометрія стружки, тип клею, кількість клею, параметри пресування та структура OSB, впливають на фізичні та механічні властивості плит (Candan et al. 2017, Mendes et al. 2013). Однак бракує комплексного порівняння різних мало використовуваних європейських порід деревини для виробництва OSB, особливо щодо фактичної продуктивності низькоякісної деревини, а також малих і тонких колод, які зазвичай використовуються.

У магістерській роботі було вивчено можливості використання мало використовуваних європейських порід деревини для створення інженерних деревних продуктів, зокрема плит OSB. Основною метою було визначення найбільш придатних порід деревини серед мало використовуваних для заміни норвезької ялини у виробництві OSB. Дослідження також охоплювало такі завдання:

1. розщеплення дев'яти мало використовуваних європейських порід деревини на стружку для виробництва OSB;
2. визначення характеристик стружки, отриманої з кожної породи окремо;
3. проведення кореляційного аналізу між характеристиками стружки та властивостями відповідних плит OSB;
4. комплексне порівняння фізичних та механічних властивостей OSB, виготовлених із цих порід деревини.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

### 2.1. Матеріали

Молоді колоди (віком 25-35 років) діаметром у межах 100-150 мм із норвезької ялини (*Picea abies*) — NS (як контроль), а також дев'яти різних мало використовуваних порід деревини (звичайна сосна (*Pinus sylvestris*) — SP, європейська модрина (*Larix decidua*) — EL, тополя (*Populus tremula* L.) — PO, верба (*Salix alba* L.) — WL, вільха (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) — AR, береза (*Betula pendula*) — BI, європейський бук (*Fagus sylvatica*) — BE, англійський дуб (*Quercus robur*) — OK, граб (*Carpinus betulus*) — HBM) були розколоті навпіл (для кращого паралельного орієнтування до ножа під час процесу розщеплення) та розрізані на довжину 120 мм (довжина остаточної стружки). Після цього всі матеріали одразу були розщеплені на стружку (Рис. 1) за допомогою ножового стружкового диска (MAIER MSF 1400, Dieffenbacher-CZ s.r.o., Чехія). Стружка сушилася в сушильній камері при температурі 80 °C до досягнення вмісту вологи (MC)  $4 \pm 1\%$ .



**Рисунок 1** Стружка, що використовується для виготовлення OSB

Полімерна 4,4-дифенілметан-діізоціанатна (pMDI) смола (ONGRONAT® WO 2750; BorsodChem Zrt., Угорщина) із твердим залишком 100% і в'язкістю 170-230 мПа·с використовувалася для обсмолення стружки. Водна парафінова емульсія (SVH – 60; Dřevozpracující družstvo, Чехія) із твердим залишком  $60 \pm 2\%$  і в'язкістю приблизно 24 мПа·с також застосовувалася.

## 2.2. Виготовлення стружкових плит

Одношарові стружкові плити виготовлялися із стружки однієї породи деревини; усього було створено десять груп плит із десяти різних порід деревини. Для виготовлення одношарових OSB-плит використовували 3% смоли рMDI за вагою та 0,5% воску для обсмолення стружки. Смолу розпилювали за допомогою дискового атомайзера моделі EL-4 (Coil Manufacturing, Surrey, BC, Канада) зі швидкістю 10 000 об/хв. Для кожної групи було виготовлено три плити товщиною 12 мм із цільовою густиною 600 кг/м<sup>3</sup> і розмірами 600 мм × 600 мм. OSB-плити формували без спроб орієнтації стружки. Панелі пресували під тиском 3,5 МПа за температури 180 °С з наступними етапами: 30 секунд закриття, 240 секунд під тиском, і 80 секунд для вентиляції з поступовим зменшенням тиску.

## 2.3. Процедури тестування

### 2.3.1. Розміри стружки

Були виміряні дерев'яні бруски (виготовлені з колод) і розрахована щільність вхідного матеріалу. Після виготовлення стружки були виміряні всі її розміри (товщина, ширина та довжина).

Значення питомої поверхні стружки розраховувалися за формулою (Moslemi 1974):

$$S_s = \frac{2}{t \cdot \rho}$$

де  $S_s$  – питома поверхня (м<sup>2</sup>/кг),  $t$  – товщина стружки (м),  $\rho$  – щільність абсолютно сухої деревини в сушильній печі (кг/м<sup>3</sup>).

Витягнутість стружки визначається як безрозмірне відношення довжини до товщини стружки та виражає якість стружки. Витягнутість розраховується за формулою (Moslemi 1974):

$$S_r = \frac{l}{t}$$

де  $S_r$  – коефіцієнт витягнутості,  $l$  – довжина стружки (мм),  $t$  – товщина стружки (мм).

Зразки витримувались при температурі 20 °C і відносній вологості (RH) 65% перед проведенням випробувань механічних та фізичних властивостей. Усі ці властивості випробовувалися відповідно до європейських стандартів, якщо не зазначено інше.

### **2.3.2. Щільність і профіль щільності**

Щільність визначалася відповідно до стандарту EN 323 (1994) на чотирьох зразках, вирізаних із кожної плити (три плити для кожної породи деревини). Профілі щільності вимірювалися на трьох зразках розміром 50 мм × 50 мм × 12 мм, вирізаних із кожної плити. Профілі щільності були отримані з інтервалом 0,01 мм через товщину зразка за допомогою рентгенівського аналізатора профілів щільності (DPX300-LTE, IMAL, Італія) і розраховано середній профіль щільності.

### **2.3.3. Аналіз SEM**

Для характеристики рельєфу поверхні використовувалися скануючий електронний мікроскоп Tescan Mira II та детектор розсіяних електронів. Зразки, підготовлені за допомогою мікротома, розміщувалися на мідній стрічці (Cu) та обгорталися мідною стрічкою знизу та з боків, щоб забезпечити необхідну провідність. Після цього на верхню частину зразків було нанесено 40 нм Au/Pd (золото/паладій) методом напилення, щоб уникнути заряджання під час сканування. Застосована напруга становила 10 кВ, інтенсивність променя — 10,0.

### **2.3.4. Взаємодія деревини з водою**

Вміст вологи (MC) визначався відповідно до стандарту EN 322 (1994) на десяти зразках розміром 50 мм × 50 мм. Набрякання за товщиною (TS) відповідно до EN 317 (1996) та водопоглинання (WA) вимірювалися на зразках розміром 50 мм × 50 мм після 24 та 48 годин занурення у воду відповідно, із використанням 12 зразків тих самих розмірів.

### **2.3.5. Механічні властивості**

Механічні випробування проводилися за допомогою універсальної випробувальної машини Zwick®Z050 із програмним забезпеченням testXpert v11.02 та датчиком навантаження на 50 кН (Zwick GmbH & Co. KG, Ульм, Німеччина). Випробування на вигин за трьома точками відповідно до стандарту EN 310 (1995) проводилися для визначення модуля пружності (MOE) і міцності на вигин (MOR) на чотирьох зразках, вирізаних із кожної плити (три плити для кожної породи деревини), розміром 290 мм × 50 мм із прольотом 240 мм. Міцність на внутрішнє склеювання (IB) визначалася відповідно до стандарту EN 319 (1993) на 12 зразках розміром 50 мм × 50 мм.

### **2.4. Статистичний аналіз**

Дані оброблялися за допомогою програмного забезпечення STATISTICA 10 (StatSoft Inc., США) та оцінювалися методом однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA), доповненого критерієм достовірності Tukey (HSD-тест).

## **3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ**

### **3.1. Розміри стружки**

Розмір частинок деревини є одним з факторів, які істотно впливають на властивості плит. Зокрема, міцність на вигин істотно залежить від розміру (довжини і товщини) дерев'яної стружки. Оскільки досліджувалися різні породи деревини з різною щільністю і анатомічною структурою, важливо було з'ясувати, чи впливає процес розчеплення на формування розмірів стружки. Розміри стружки, отримані питомі значення поверхні і відповідні коефіцієнти витягнутості зведені в таблицю 1.

Найменша середня товщина (0,70 мм) була зафіксована у стружці з бука, а найбільша (0,92 мм) — у стружці з сосни. Проте аналіз товщини стружки показав, що стружка з усіх досліджених порід деревини не відрізняється між собою за цим

параметром. Найдовша стружка (107 мм) була отримана з вільхи, а найкоротша (78 мм) — із сосни. Лише стружка з вільхи значно відрізняється ( $p < 0,05$ ) за довжиною від стружки з ялини. Крім того, стружка з вільхи суттєво ( $p < 0,05$ ) відрізняється за довжиною від стружки з ялини, сосни, тополі та дуба. У свою чергу, стружка з сосни значно ( $p < 0,05$ ) відрізняється за довжиною від стружки з верби, вільхи, берези та бука. Аналіз ширини стружки показав, що за цим параметром стружка з усіх досліджених порід деревини відрізняється незначно ( $p \geq 0,05$ ) одна від одної, за винятком стружки з берези, бука та дуба. Ширина стружки з берези була найбільшою і суттєво ( $p < 0,05$ ) відрізнялася від ширини стружки з бука та дуба. Водночас ширина стружки з берези, бука та дуба незначно ( $p \geq 0,05$ ) відрізнялася від ширини стружки з інших порід деревини. Крім того, стружка, отримана з різних досліджених порід деревини, незначно ( $p \geq 0,05$ ) відрізнялася за шириною від стружки з ялини. Помічено також, що в міру зменшення щільності породи деревини питома поверхня стружки збільшується.

**Таблиця 1** Середні значення розміру пасма

Породи деревини	Товщина [мм]	Ширина [мм]	Довжина [мм]	Коефіцієнт витягнутості	Питома поверхня [м <sup>2</sup> /кг]
<b>Ялина звичайна (NS)*</b>	<b>0,75 (0,30) А, Б, В</b>	<b>15,9 (9,8) А, Б</b>	<b>83 (32) А, Б, В</b>	<b>111 (61)</b>	<b>6.8</b>
Сосна звичайна (SP)	0,92 (0,23) С, Д	15,0 (8,8) А, Б	78 (31) А	85 (40)	5.03
Модрина європейська (EL)	0,84 (0,26) А, Б, В, Г	14,5 (6,2) А, Б	94 (33) А, Б, В, Г	112 (52)	5.07
Тополя (PO)	0,83 (0,21) А, Б, В, Г	15.4 (7.3) А, Б	83 (27) А, Б, В	100 (41)	5.4
Верба (WL)	0,75 (0,22) А, Б	14,0 (7,3) А, Б	97 (28) Б, В, Г	129 (53)	4.59
Вільха (AR)	0,73 (0,22) А, Б	15,7 (7,6) А, Б	107 (22) Д	147 (53)	6.73
Береза (BI)	0,76 (0,23) А, Б, В	18,6 (10,1) Б	102 (24) З, Д	134 (51)	5.17
Бук європейський (BE)	0,70 (0,21) А	12.6 (5.1) А	101 (26) З, Д	144 (57)	3.91
Англійський дуб (OK)	0,79 (0,26) А, Б, В	13,0 (5,7) А	84 (26) А, Б, В	106 (48)	3.33
Граб (HBM)	0,88 (0,27) Б, В, Г	16,9 (11,6) А, Б	97 (27) А, Б, В, Г	110 (46)	3.17

\*Контроль. Значення з однаковою літерою в стовпці статистично не відрізняються за тестом Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Цифри в дужках позначають стандартне відхилення

Таким чином, лише стружка з вільхи суттєво ( $p < 0,05$ ) відрізняється за довжиною від стружки з ялини. Стружка з інших порід деревини незначно ( $p \geq 0,05$ ) відрізняється від стружки з ялини за товщиною, довжиною та шириною. Крім

того, не було виявлено значних відмінностей між хвойними та листяними породами деревини за розмірами стружки, отриманої з них. Незначні відмінності у розмірах стружки з різних порід деревини свідчать про те, що процес розщеплення не вплинув на розміри стружки. Хоча очевидно, що під час розщеплення різних порід деревини споживання електроенергії для цього процесу буде різним, але це не було метою цього етапу дослідження.

### 3.2. Щільність зразків плит

Відмінності в щільності вхідного матеріалу коливалися від 392 кг/м<sup>3</sup> (ялина) до 761 кг/м<sup>3</sup> (дуб) і впливали на кінцеву щільність плити, яка також коливалася від 656 кг/м<sup>3</sup> (ялина) до 799 кг/м<sup>3</sup> (граб) (табл. 2). Щільність плит, виготовлених зі стружки ялини, сосни, тополі, модрини та вільхи, незначно відрізняються між собою ( $p \geq 0,05$ ), враховуючи, що щільність цих порід деревини також дещо відрізняється. Аналогічно, щільність плит, виготовлених зі стружки берези, бука, дуба та граба, незначно відрізняються між собою ( $p \geq 0,05$ ), оскільки щільність цих порід деревини також відрізняється несуттєво. Щільність плит, виготовлених із стружки модрини та верби, незначно відрізняється ( $p \geq 0,05$ ) від щільності плит, виготовлених із стружки бука та дуба. Окрім щільності вхідного матеріалу, CR (коефіцієнт ущільнення) також впливає на щільність плит. Плити, виготовлені з такої стружки, мають майже однакову щільність, оскільки стружка модрини та верби ущільнюється більше (відповідно на 56% і 28%), ніж стружка бука та дуба (відповідно на 4% і 11%). OSB із деревини низької щільності, таких як вільха, тополя та сосна, мають майже таку ж щільність, як OSB із стружки ялини. Більше того, вони також продемонстрували схожий CR. Цілком природно, що деревина низької щільності демонструвала вищий CR порівняно з деревиною високої щільності (Таблиця 2).

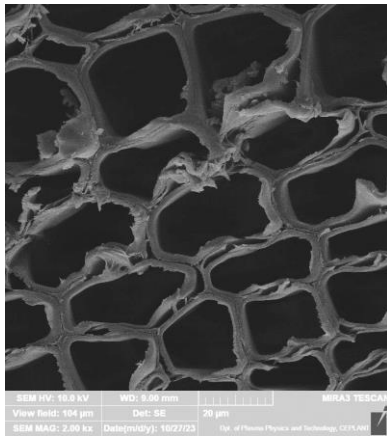
**Таблиця 2** Середні значення вхідної щільності порід деревини, щільності і МС стружкових плит

Породи деревини	Щільність вхідної деревини [кг/м <sup>3</sup> ]	Щільність плити[кг/м <sup>3</sup> ]	Ступінь ущільнення	Вологість [%]
<b>Ялина звичайна (NS)*</b>	<b>392 (12)</b>	<b>656 (42) А</b>	<b>1,67</b>	<b>6,5 (0,3) А</b>
Сосна звичайна (SP)	432 (28)	669 (30) А	1.55	9,7 (0,1) Д, Е
Модрина європейська (EL)	470 (37)	731 (32) Б, З	1.56	9,7 (0,2) Д, Е
Тополя (PO)	446 (22)	680 (32) А, Б	1.52	8,6 (0,1) З
Верба (WL)	581 (31)	746 (54) З, Д	1.28	9,3 (0,1) Д
Вільха (AR)	407 (33)	685 (31) А, Б	1.68	6,9 (0,4) А
Береза (BI)	509 (23)	761 (51) З, Д	1.50	6,8 (0,4) А
Бук європейський (BE)	730 (6)	758 (58) З, Д	1.04	7,7 (0,6) Б
Англійський дуб (OK)	761 (20)	798 (56) Д	1.05	9,5 (0,4) Д, Е
Граб (HBM)	717 (41)	799 (43) Д	1.11	9,9 (0,4) Е

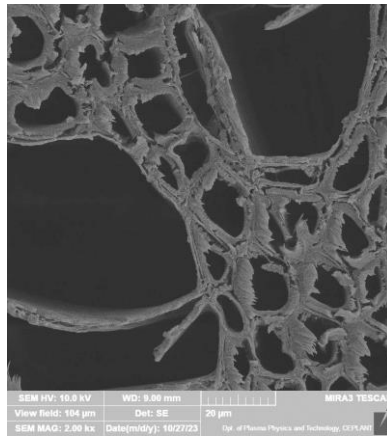
\*Контроль. Середні значення з однаковою буквою в стовпці статистично не відрізняються за тестом Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Цифри в дужках позначають стандартне відхилення

Зміни в структурі деревини пов'язані з ступенем ущільнення (CR) плити: чим вищий CR, тим більші зміни у деформації деревної структури в стружкових плитах. Порівняння структури недеформованої деревини та кінцевої плити показало суттєві зміни у деревній структурі плит із ялини, деформацію форми клітинних стінок у плитах із берези та відсутність змін у плитах із бука порівняно з деревиною бука (Рис.1).

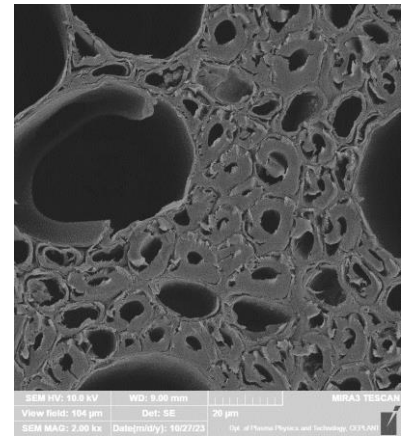
Щільність плит визначається щільністю вхідної деревини, що використовується, а також режимами пресування. Оскільки в цьому дослідженні параметри пресування та запланований ступінь ущільнення стружки для формування шару плити були постійними, щільність плит визначається щільністю вхідної деревини та ступенем ущільнення (CR). Хвойні, а також листяні породи деревини в цьому дослідженні продемонстрували різну здатність до ущільнення при високому тиску та температурі через відмінності в породах деревини (Таблиця 2), і ця різниця буде відображатися у вертикальних профілях щільності (VDP) плит. На Рисунку 2 показано кореляцію між щільністю плит і щільністю деревини на основі повного набору результатів, отриманих для всіх досліджених порід деревини. Високе значення коефіцієнта детермінації  $R^2 = 0.8$  демонструє хорошу лінійну кореляцію між щільністю деревини та щільністю плити.



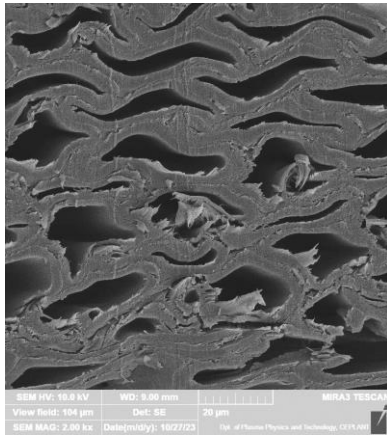
Ялина



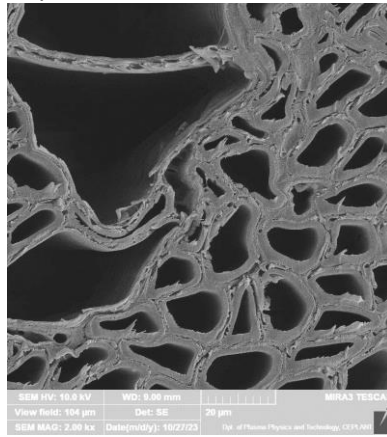
Береза



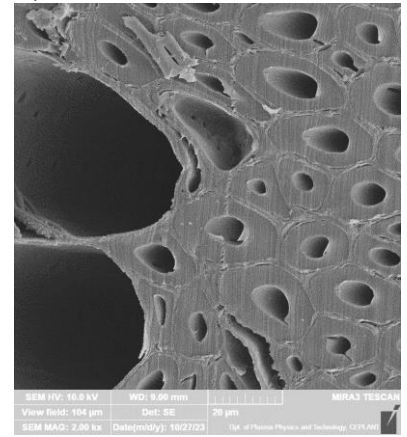
Бук



Ялина OSB

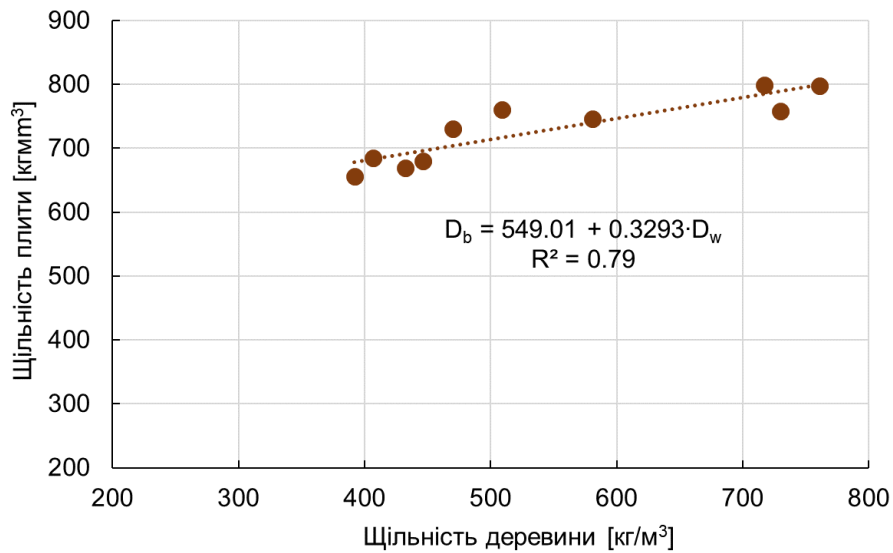


Береза OSB



Бук OSB

**Рисунок 1** Ущільнення обраної деревини та OSB за допомогою SEM

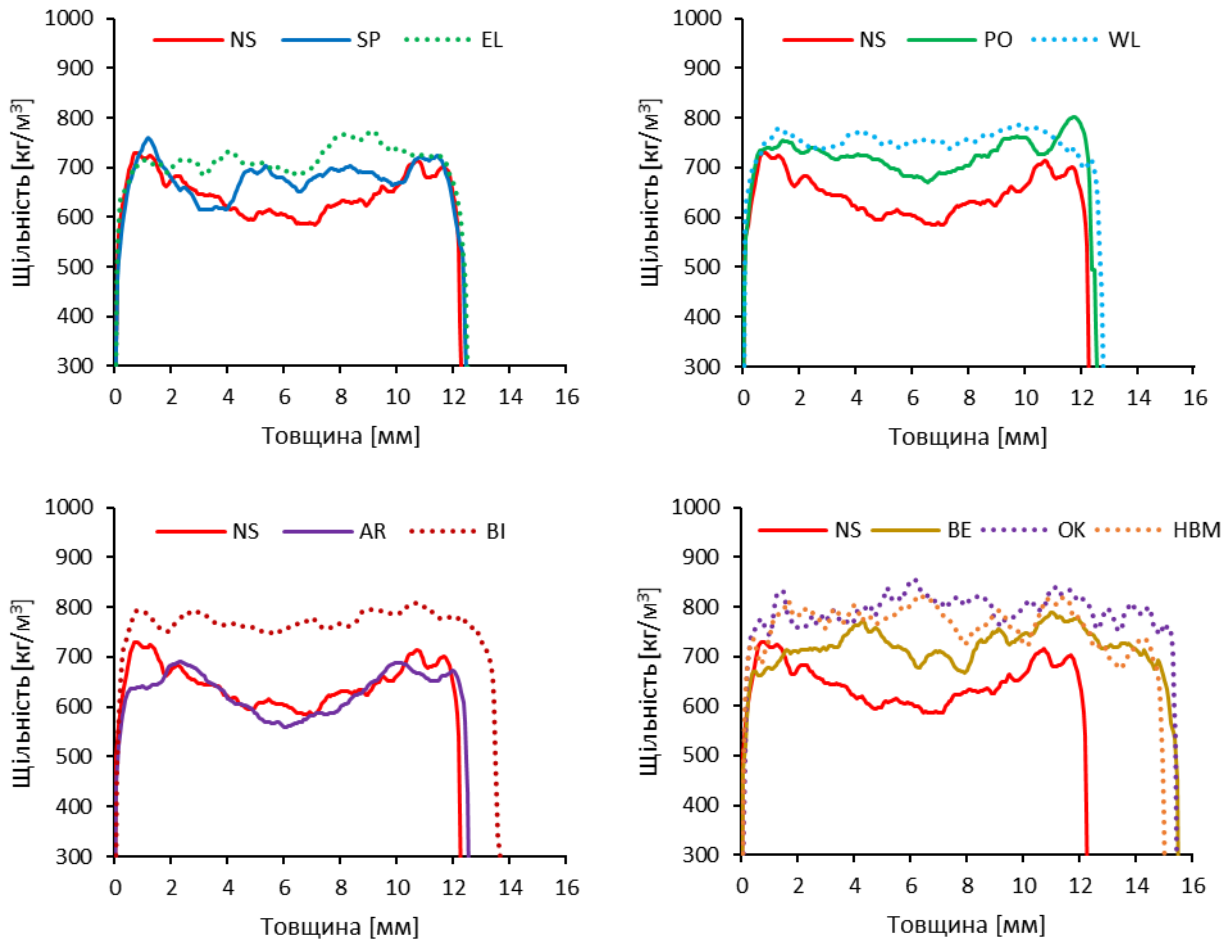


**Рисунок 2** Кореляція між щільністю плити ( $D_b$ ) і щільністю деревини ( $D_w$ )

МС плит після кондиціювання показав нижчі значення для ялини, вільхи, берези та бука, і вищі значення для решти плит.

### 3.3. Профіль щільності зразків плит

Профіль вертикальної щільності (VDP) показав типову U-подібну форму (Kelly 1977) для деяких порід деревини низької щільності, особливо ялини, сосни, тополі та вільхи (Рис. 3). Ці результати узгоджуються з попередніми висновками (Wang and Winistorfer 2000; Beck et al. 2009p.). Порівнянний VDP також спостерігався в дослідженні Beck et al. (2009) для берези з дещо більшою щільністю біля поверхні та майже рівномірною щільністю через всю товщину. Інші породи деревини високої щільності (береза, бук, граб, дуб і верба) показали майже рівномірний профіль щільності (невелика різниця між поверхневим та внутрішнім шаром) через товщину плит, без збільшення щільності на поверхні. Це можна пояснити легшим ущільненням стружки порід деревини з низькою щільністю ( $CR = 1.52-1.68$ ) під високим тиском і температурою в поверхневих шарах, ніж у внутрішньому шарі плит. Водночас стружка порід деревини з високою щільністю дуже важко ущільнюється ( $CR = 1.04-1.28$ ), тому щільність таких плит у внутрішньому та поверхневих шарах майже однакова (Рис. 3). Zhuang et al. (2022) також виявили, що різниця в щільності між поверхневим і внутрішнім шарами OSB була незначною зі збільшенням щільності деревини. Крім того, з цієї ж причини не вдалося досягти цільової товщини плит, використовуючи стружку порід деревини з високою щільністю. Панелі, виготовлені з таких порід деревини, показали значне зменшення ущільнення після відкриття гарячого преса, у більшості випадків до 15,5 мм порівняно з цільовою товщиною 12 мм. Це необхідно враховувати на практиці при використанні порід деревини з високою щільністю, обираючи для них відповідні параметри пресування.



**Рисунок 3** Профіль вертикальної щільності зразків OSB: ялина звичайна (NS), сосна звичайна (SP), модрина європейська (EL), тополя (PO), верба (WL), вільха (AR), береза (BI), бук європейський (BE), дуб англійський (OK), граб (HBM)

Загалом, вертикальний профіль щільності (VDP) є одним із важливих факторів, які впливають на більшість фізичних і механічних властивостей деревних плит. Крім того, деякі дослідники (Chen et al., 2010) стверджують, що U-подібний VDP є корисним для міцності на вигин (MOR) та модуля пружності (MOE), тоді як більш рівний VDP забезпечує вищу розмірну стабільність та міцність на внутрішнє склеювання (IB). До того ж, однорідний профіль щільності OSB, який забезпечується деревиною з високою щільністю, можна розглядати як перевагу, що сприяє рівномірному розподілу пружності у конструкційному елементі та полегшує використання кріпильних елементів у будівництві.

### 3.4. Фізичні властивості зразків плит

Результати досліджень набрякання за товщиною (TS) і водопоглинання (WA) виявилися дещо несподіваними (Таблиця 3). Як видно з Таблиці 3 і Рисунка 4, нижчі значення TS і WA спостерігаються в плитах із більшою щільністю, виготовлених із деревини високої щільності (бук, граб, дуб і верба, за винятком берези). Результати TS у цьому дослідженні суперечать загальноприйнятому досвіду. У цьому дослідженні зі збільшенням щільності плит TS зменшується. Зазвичай зі збільшенням щільності плит TS зростає, а WA зменшується. Причину цього можна знайти, якщо подивитися на профіль щільності плит (Рисунок 3). Як зазначалося раніше, породи деревини високої щільності продемонстрували майже однорідний профіль щільності з практично однаковою щільністю через всю товщину плит. Зазвичай зразки плит вбирають воду через краї. У зразках плит, виготовлених із деревини низької щільності, щільність внутрішнього шару низька, і вода легко проникає через краї плити. Однак у зразках плит, виготовлених із деревини високої щільності, щільність внутрішнього шару висока, практично така ж, як і поверхневих шарів, що ускладнює проникнення води всередину плити. Проте те саме не можна сказати про вплив щільності плит на TS. У цьому дослідженні зі збільшенням щільності TS також зменшується, що не відповідає загальновідомій тенденції. Однак результати різних досліджень впливу щільності на TS, проведені іншими авторами, також суперечливі. Wu і Piao (1999) продемонстрували, що TS і WA зростають зі збільшенням щільності зразків. Chen et al. (2010), досліджуючи вплив щільності плит на властивості OSB, виявили, що TS і WA лінійно зменшуються зі збільшенням щільності плит, подібно до цього дослідження. Аналогічно, Geimer (1982), досліджуючи TS у плитах зі стружки зазначив, що TS був нижчим у плит із високою щільністю. Jin et al. (2009) вказали, що WA добре корелює зі щільністю випадково орієнтованих OSB, тоді як взаємозв'язок між TS і щільністю був менш очевидним. TS спочатку збільшувався зі зростанням щільності, а після досягнення пікової точки близько 650 кг/м<sup>3</sup> тенденція змінилася. Wang et al. (2003) порівнювали властивості комерційних OSB

із осики, сосни та змішаних листяних порід і зауважили, що в межах однієї породи їхні дані не показали послідовних взаємозв'язків між WA, TS і щільністю плит.

Набрякання за товщиною (TS) після 24 годин показало низькі значення для граба, бука та дуба — близько 10% порівняно з ялиною, яка мала найвище значення TS — 25,4% (Таблиця 3). Така ж тенденція спостерігалася і в TS після 48 годин. Дослідження Akrami et al. (2014a) для OSB із бука та тополі з щільністю 720 кг/м<sup>3</sup> показало TS після 24 годин на рівні 12% і 23%, що відповідає результатам цього дослідження: TS після 24 годин для бука становив 10,3%, а для тополі — 13,9%. Водопоглинання (WA) продемонструвало найнижче значення для бука — 22,5% після 24 годин, тоді як дуб і модрина показали WA 24,8% і 32,9% відповідно. Найвищі значення WA після 24 годин становили 58,3% і 58,0% для берези та ялини відповідно. Така ж тенденція спостерігалася і для WA після 48 годин.

**Таблиця 3** Набрякання за товщиною і водопоглинання зразків

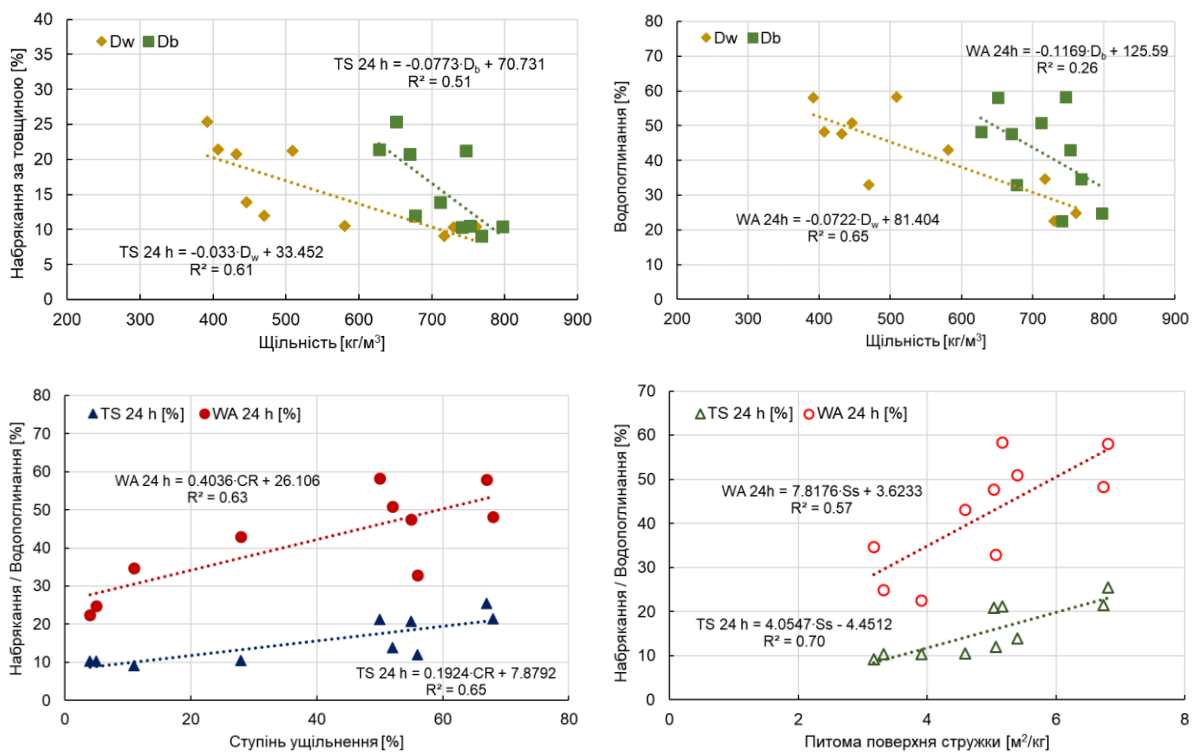
Породи деревини	ТС 24 год [%]	WA 24 год [%]	ТС 48 год [%]	WA 48 год [%]
<b>Ялина звичайна (NS)*</b>	<b>25.4 (3.4) Б</b>	<b>58,0 (3,1) Е, Ж</b>	<b>29,9 (4,1) З</b>	<b>66,5 (3,1) Е, Ж</b>
Сосна звичайна (SP)	20.8 (4.6) Б	47,6 (7,4) Д, Е	25,2 (3,6) Б, В	61,6 (6,4) Д, Е, F
Модрина європейська (EL)	12,0 (4,6) А	32,9 (10,2) А, Б, В	21,2 (7,5) А, Б	48,4 (12,5) Б, В
Тополя (PO)	13,9 (3,9) А	50,9 (10,4) Д, Е, F	19,6 (4,4) А, Б	64,2 (10,9) Е, Ж
Верба (WL)	10.5 (4.2) А	43,0 (9,2) З, Д	16.7 (4.2) А	56,5 (10,3) В, Г, Е
Вільха (AR)	21,4 (5,8) Б	48.2 (7.3) Г, Е, Ж	27,8 (5,4) З	59,3 (7,9) В, Г, Е, Ж
Береза (BI)	21.2 (3.4) Б	58,3 (8,6) Ж	28,9 (3,0) З	68,9 (7,3) Ж
Бук європейський (BE)	10.3 (2.6) А	22.5 (3.1) А	18.2 (3.7) А	30.6 (3.2) А
Англійський дуб (OK)	10.4 (3.6) А	24,8 (4,0) А, Б	17,5 (4,2) А	40.2 (7.1) А, Б
Граб (HBM)	9.1 (3.9) А	34,7 (11,9) Б, В	15.4 (4.5) А	49,9 (14,7) Б, В, Г

\*Контроль. Середні значення з однаковою буквою в стовпці статистично не відрізняються за тестом Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Цифри в дужках позначають стандартне відхилення.

Було також встановлено, що щільність деревини має значний вплив на TS і WA плит (Рис. 4). І TS, і WA зменшуються зі збільшенням щільності деревини. Оскільки розміри стружки значно перевищують розміри структурних елементів деревної тканини (клітин), стружку можна розглядати як частинки, які мають властивості масивної деревини. Тому породи деревини високої щільності, які мають меншу пористість, поглинають менше води та менше набрякають порівняно з породами деревини низької щільності. Відповідно, плити з вищою

щільністю повільніше поглинають воду, що знижує швидкість TS. Jin et al. (2009) зазначили, що відносно слабкі контакти між стружками у плитах низької щільності призводять до утворення слабких зв'язків, які більш схильні до руйнування під час замочування у воді, що збільшує TS. Крім того, плити низької щільності є дуже пористими через велику кількість порожнин у їхній структурі, що сприяє проникненню та поглинанню води, а отже, і набряканню.

Ступінь ущільнення та питома поверхня стружки також мають значний вплив на TS і WA. Плити з вищим ступенем ущільнення та питомою поверхнею стружки демонстрували вищі значення TS і WA. Як показано в Таблиці 2, менша щільність деревини призводить до вищого ступеня ущільнення; відповідно, згідно з Hsu (1987), це збільшує значення WA і TS. Пружність всередині плити частково вивільняється при зануренні у воду.



**Рисунок 4** Кореляції між набряканням за товщиною, водопоглинанням і щільністю плит ( $D_b$ ) та деревини ( $D_w$ ), ступенем ущільнення (CR) і питомою поверхнею стружки (Ss).

Відомо, що TS і WA залежать від тривалості впливу. Wu і Lee (2002) продемонстрували, що тришарові плити з вищою щільністю мали тенденцію до більшого TS, тоді як у одношарових плитах із рівномірною щільністю вплив

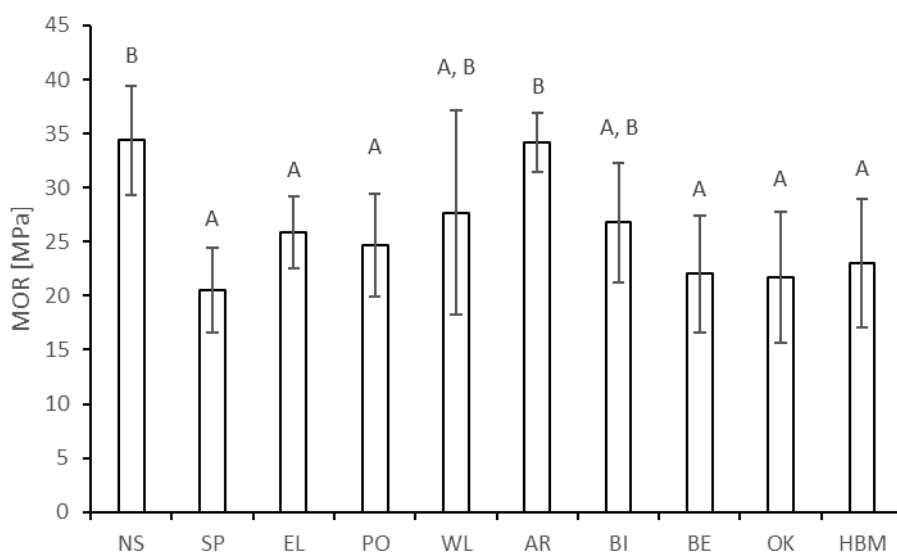
щільності на TS був змішаним. Jin et al. (2009) стверджували, що, незважаючи на більший потенціал набрякання, плити з більшою щільністю зазвичай не повністю просочуються водою під час 24-годинного тесту замочування, що ускладнює вивільнення деформації. Отже, результати цього дослідження свідчать про те, що взаємозв'язок між TS, WA та щільністю плит є досить складним, і для отримання надійних кореляцій необхідно провести більше досліджень.

### **3.5. Механічні властивості зразків плит**

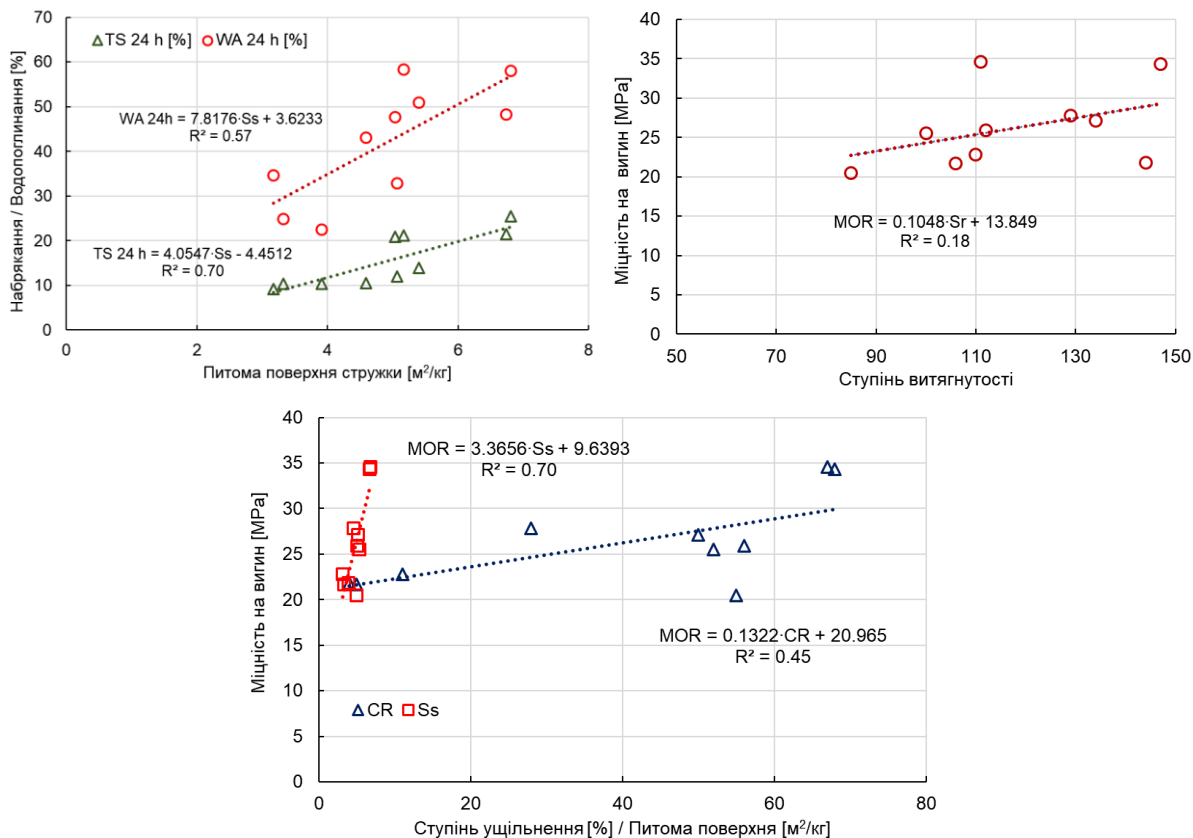
Плити з ялини та вільхи мали найвищі значення MOR (34,6 МПа та 34,3 МПа відповідно), тоді як плити з сосни мали найнижче значення MOR (20,5 МПа). Значення MOR показали, що статистично значущої різниці між ялиною (34,6 МПа) та модриною (25,9 МПа), тополею (25,2 МПа), вербою (27,8 МПа), вільхою (34,3 МПа) і березою (27,1 МПа) немає (Рис. 5). Аналогічно, немає значної різниці в значеннях MOR між сосною, модриною, тополею, вербою, березою, буком, дубом і грабом. Такий результат є дещо несподіваним, оскільки в експериментах використовували деревину з різною щільністю. Оскільки в цьому дослідженні всі плити виготовлялися за однакових параметрів пресування, а аналіз розмірів стружки показав, що її розміри однакові незалежно від породи деревини, значення MOR практично не відрізняються між собою. Крім того, не було знайдено сильної залежності між MOR і щільністю плит ( $R^2 = 0,26$ ); трохи кращий зв'язок був виявлений між MOR і щільністю деревини ( $R^2 = 0,39$ ). Більш того, було виявлено негативний вплив щільності деревини та плит на MOR. Графічне представлення зв'язків між MOR і щільністю плит та деревини наведено на Рис. 6. Проте, як добре відомо, MOR залежить не лише від щільності плит, але й від багатьох інших факторів, включаючи ступінь ущільнення, товщину та довжину стружки, коефіцієнт витягнутості, питому поверхню, кількість клею в зовнішніх шарах тощо. Ступінь ущільнення, коефіцієнт витягнутості, а також питома поверхня стружки позитивно впливають на MOR (Рис. 6). Загалом збільшення всіх цих параметрів підвищувало MOR. Найсильніший зв'язок показала питома

поверхня стружки ( $R^2 = 0,70$ ) на основі повного набору результатів, отриманих для всіх порід деревини. Вища питома поверхня стружки призводила до підвищення MOR, оскільки стружка з вищою питомою поверхнею займає більший обсяг, ніж стружка з нижчою питомою поверхнею. Таким чином, стружка з вищою питомою поверхнею при високому тиску та температурі під час гарячого пресування ущільнюється більше, збільшуючи контакт між стружками завдяки більшій їх кількості та зменшенню об'єму порожнин. Довша та тонша стружка (вищий коефіцієнт витягнутості) забезпечувала кращий MOR порівняно з коротшою та товстішою стружкою завдяки кращому вирівнюванню між довгими стружками та збільшенню довжини перекриття (Barnes 2001). Інші автори (Beck et al. 2009; Chiromito et al. 2016) також показали, що довжина та товщина стружки значно та позитивно впливають на MOR і MOE.

Результати цього дослідження показують, що для забезпечення порівнянних властивостей на вигин для плит із ялини, сосни, бука, дуба та граба стружка сосни повинна мати вищий коефіцієнт витягнутості, тоді як стружка бука, дуба та граба повинна мати вищу питому поверхню, яку можна отримати за рахунок використання тоншої стружки при заданій довжині.



**Рисунок 5** Міцність на вигин (MOR) OSB із різних порід деревини – норвезька ялина (NS), звичайна сосна (SP), європейська модрина (EL), тополя (PO), верба (WL), вільха (AR), береза (BI), європейський бук (BE), англійський дуб (OK), граб (HBM) (штрихові лінії показують стандартні відхилення).

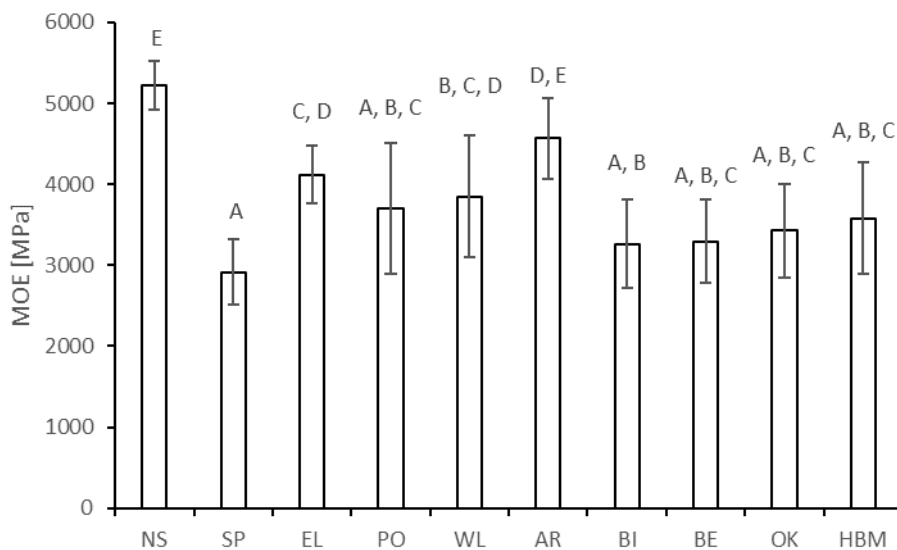


**Рисунок 6** Кореляції між міцністю на вигин та середньою щільністю плит ( $D_b$ ) і деревини ( $D_w$ ), коефіцієнтом витягнутості ( $Sr$ ), ступенем ущільнення ( $CR$ ) та питомою поверхнею стружки ( $Ss$ ).

Дослідження Lunguleasa et al. (2021) було зосереджено на вербі, тополі, сосні та ялині для OSB і показало значення MOR у паралельному напрямку близько 44,54 МПа для верби та 27,07 МПа для ялини. У цьому дослідженні також спостерігалось зниження значень MOR від верби та тополі до сосни. У дослідженні Dumitrascu et al. (2020) порівняння берези, верби та тополі показало значення MOR у паралельному напрямку — 36,0 МПа, 36,6 МПа та 43,3 МПа, відповідно, а у перпендикулярному напрямку — 33,0 МПа, 35,3 МПа та 18,2 МПа.

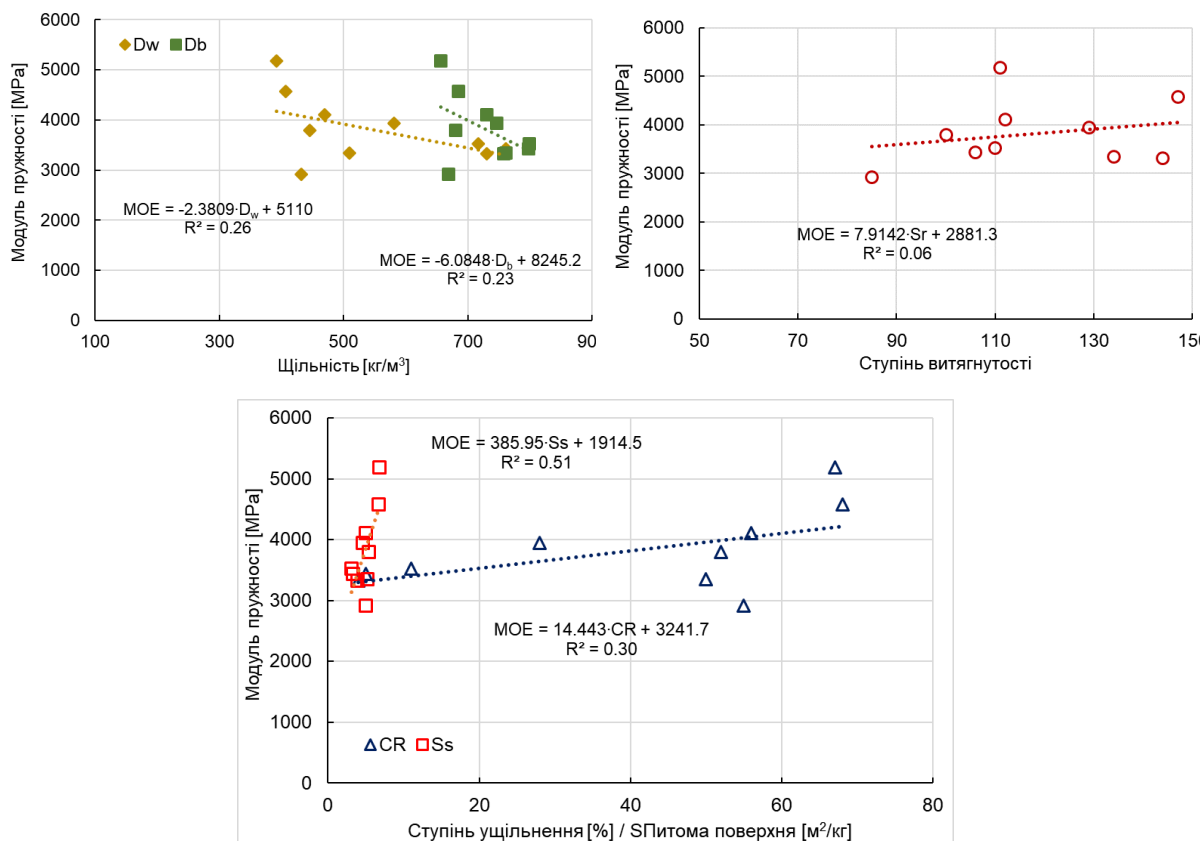
Подібна тенденція у значеннях MOR спостерігалась також у значеннях MOE (Рис. 7, 8). Найвищі значення MOE становили 5 185 МПа для ялини та 4 472 МПа для вільхи, без значних відмінностей. Значення MOE для модрина (4 110 МПа), тополі (3 815 МПа) та верби (3 939 МПа) порівняно з вільхою також не показали значної різниці. Результати цього дослідження добре узгоджуються з результатами, отриманими іншими авторами (Chen et al., 2010; Zhuang et al., 2022). Zhuang et al. (2022) показали подібну тенденцію до зниження значень MOE

зі збільшенням щільності деревини. Chen et al. (2010) встановили, що взаємозв'язки між характеристиками вигину та щільністю найкраще описуються квадратичними регресійними кривими. Як значення MOR, так і MOE зростали зі збільшенням щільності плит, але зростання сповільнювалося, коли щільність досягала приблизно 690 кг/м<sup>3</sup> (для MOR) і 660 кг/м<sup>3</sup> (для MOE). Щільність плит у цьому дослідженні варіювалася в межах 650-800 кг/м<sup>3</sup>.



**Рисунок 7** Модуль пружності (MOE) OSB із різних порід деревини – норвезька ялина (NS), звичайна сосна (SP), європейська модрина (EL), тополя (PO), верба (WL), вільха (AR), береза (BI), європейський бук (BE), англійський дуб (OK), граб (HBM) (штрихові лінії показують стандартні відхилення).

Дослідження Lunguleasa et al. (2021) показало значення MOE для OSB із верби близько 4 700 МПа та для тополі близько 4 600 МПа у паралельному напрямку; для сосни значення MOE у паралельному напрямку становили близько 3 200 МПа, а у перпендикулярному напрямку — близько 3 000 МПа, що є порівняним із результатами цього дослідження. OSB із тополі в дослідженні Dumitrascu et al. (2020) показали нижче значення MOE у паралельному напрямку — 3 147 МПа, порівняно зі значеннями цього дослідження, тоді як верба (5 665 МПа) і береза (4 636 МПа) продемонстрували вищі значення MOE у паралельному напрямку порівняно з цим дослідженням, зосередженим на неорієнтованих OSB.

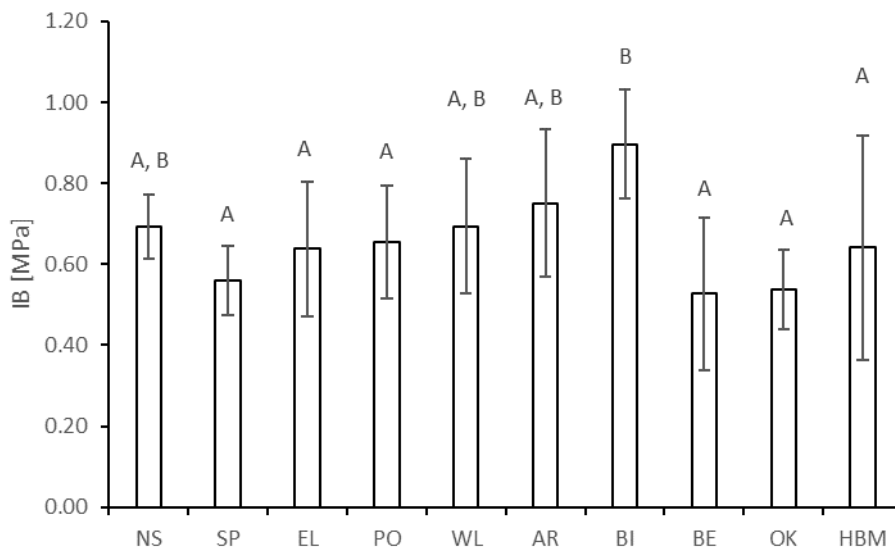


**Рисунок 8** Кореляції між модулем пружності (MOE) та середньою щільністю плит ( $D_b$ ) і деревини ( $D_w$ ), коефіцієнтом витягнутості ( $S_r$ ) та питомою поверхнею стружки ( $S_s$ ).

Міцність на внутрішнє склеювання (IB) досягла найвищого середнього значення для берези — 0,9 МПа, але значущої різниці між ялиною та іншими породами деревини не було (Рис. 9). Це може підтверджувати, що для IB, як одного з ключових параметрів, можливо виготовити OSB зі співставними властивостями з усіх досліджених мало використовуваних порід деревини. Причини відсутності різниці у значеннях міцності на внутрішнє склеювання (IB) можуть бути такими ж, як і для MOR. Ступінь кореляції між IB і щільністю плит у цьому дослідженні був дуже низьким, що може бути наслідком відмінностей у вертикальному профілі щільності (VDP) та геометрії стружки. Вплив досліджуваних змінних на IB є дуже складним. Загалом, зі збільшенням щільності деревини IB зменшувався, тоді як збільшення ступеня ущільнення та питомої поверхні стружки підвищувало IB. Взаємозв'язки між IB і цими факторами показані графічно на Рис. 10. Beck et al. (2009) також встановили, що геометрія стружки та порода деревини

не мали значного впливу на ІВ. Xu і Winistorfer (1995) знайшли позитивну кореляцію між ІВ і ОСВ, хоча коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ) становив лише 0,20–0,25.

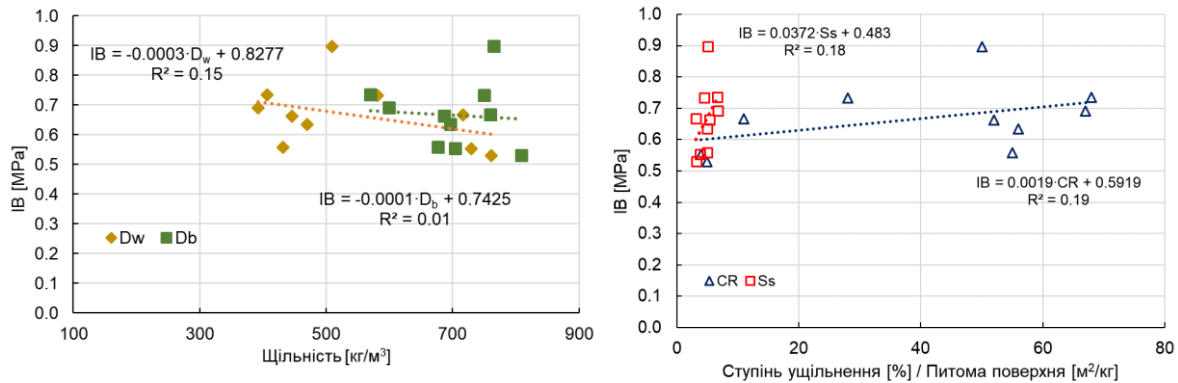
У дослідженні Dumitrascu et al. (2020) ОСВ досягли вищих значень ІВ: 1,05 МПа, 1,33 МПа та 1,28 МПа для берези, верби та тополі відповідно. Значення ІВ у дослідженні Beck et al. (2009) зі співставлення різних розмірів стружки показали середні значення для осики — 0,69 МПа і для берези — 0,77 МПа, які можна порівняти з результатами цього дослідження. У дослідженні Akrami et al. (2014a) для ОСВ із бука та тополі з щільністю 720 кг/м<sup>3</sup> значення ІВ становили 0,7 МПа та 0,6 МПа, що протилежно результатам цього дослідження. У цьому дослідженні ІВ для бука становив 0,55 МПа, а для тополі — 0,67 МПа.



**Рисунок 9** Міцність на внутрішнє склеювання (ІВ) ОСВ із різних порід деревини – норвезька ялина (NS), звичайна сосна (SP), європейська модрина (EL), тополя (PO), верба (WL), вільха (AR), береза (BI), європейський бук (BE), англійський дуб (OK), граб (HBM) (штрихові лінії показують стандартні відхилення).

Добре відомо, що деревина високої щільності важко склеюється через товстіші клітинні стінки та менший діаметр люменів (Frihart and Hunt, 2010). У таких випадках клеї не проникають легко в деревину, що перешкоджає створенню доброго механічного зчеплення. Крім того, деревина високої щільності характеризується вищою концентрацією екстрактивних речовин, які можуть заважати затвердінню клеїв (Frihart and Hunt, 2010). Тому для стиснення міцної,

жорсткої деревини високої щільності та забезпечення контакту між поверхнями деревини та клеєм потрібен набагато більший тиск.



**Рисунок 10** Кореляції між міцністю на внутрішнє склеювання (IB) та середньою щільністю плит (Db) і деревини (Dw), ступенем ущільнення (CR) і питомою поверхнею стружки (Ss).

Загальні результати, отримані для властивостей OSB, відповідали мінімальним вимогам стандарту EN для OSB/2 (MOR > 20 МПа, MOE > 3500 МПа (за винятком плит, виготовлених із чистої сосни, берези, бука та дуба), IB > 0,32 МПа, TS після 24 годин < 20% (за винятком плит, виготовлених із чистої ялини, сосни, вільхи та берези) при товщині плит у діапазоні 10-18 мм) і OSB/3 (MOR > 20 МПа, MOE > 3500 МПа (за винятком плит, виготовлених із чистої сосни, берези, бука та дуба), IB > 0,32 МПа, TS після 24 годин < 15% (за винятком плит, виготовлених із чистої ялини, сосни, вільхи та берези) при товщині плит у діапазоні 10-18 мм). Крім того, значення IB були на 1,7–2,8 рази вищими за рівні, визначені стандартом EN 300. TS після 24 годин для плит із стружки модрини, тополі, верби, бука, дуба та граба становили 9,1–13,9%, що на 54,5–30,5% і 39,3–7,3% менше, ніж допускає стандарт EN 300 для OSB/2 і OSB/3 відповідно.

Результати цього дослідження відповідають результатам, описаним іншими авторами (Chen et al., 2010), які встановили, що вплив щільності плит на MOR, MOE і IB можна описати опуклими квадратичними функціями. Це означає, що в області низької щільності ці властивості плит поліпшуються швидше зі збільшенням щільності, ніж у області високої щільності. Коли щільність досягала певного

підвищеного рівня (660–690 кг/м<sup>3</sup>), подальше збільшення щільності мало незначний вплив на покращення властивостей.

## **ВИСНОВКИ**

Було встановлено, що якість стружки, виготовленої з мало використовуваних порід деревини, таких як звичайна сосна, європейська модрина, тополя, верба, вільха, береза, європейський бук, англійський дуб та граб, порівнянна з якістю стружки з ялини, що зазвичай використовується для виготовлення OSB. Це дозволило зробити висновок, що ці породи деревини мають потенціал для використання у виробництві OSB для виготовлення плит з прийнятними фізичними та механічними властивостями. Характеристики стружки мають значний вплив на фізичні та механічні властивості плит OSB.

Виходячи з результатів фізико-механічних властивостей окремих видів OSB, серед досліджених мало використовуваних порід деревини модрина, тополя, верба та вільха можуть вважатися найбільш придатними для виготовлення плит. Усі ці породи деревини продемонстрували властивості, порівнянні з плитами з ялини, яка сьогодні є найпопулярнішою в європейському регіоні. Результати показали, що плити, виготовлені з деревини високої щільності, набрякали менше, ніж плити з деревини низької щільності.

Результати показали, що використання порід деревини низької щільності (ялина, сосна, тополя та вільха) призводить до формування тонких щільних поверхневих зон і менш щільної товстої внутрішньої зони плит, тоді як використання порід деревини високої щільності (береза, бук, граб, дуб і верба) забезпечує однорідні зони щільності як у поверхневих, так і у внутрішніх шарах. Загалом для деревини високої щільності характерний плоский профіль вертикальної щільності (VDP).

Було також встановлено, що вплив різних порід деревини на властивості плит є дуже складним і не може бути точно пояснений простими лінійними

регресійними моделями. Для пояснення складності взаємодії між факторами слід розглянути моделі вищого рівня та оптимізацію цих змінних.

У подальших дослідженнях бажано виготовляти OSB із сумішей різних порід деревини у різних відсоткових співвідношеннях, використовуючи мало використовувані європейські породи, на основі кількості дерев у лісі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Akrami A, Barbu M C, Fruehwald A (2014a) Characterization of properties of oriented strand boards from beech and poplar. *European Journal of Wood and Wood Products* 72: 393–398. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0793-9>
- Akrami A, Fruehwald A, Barbu M C (2014b) The effect of fine strands in core layer on physical and mechanical properties of oriented strand boards (OSB) made of beech (*Fagus sylvatica*) and poplar (*Populus tremula*). *European Journal of Wood and Wood Products* 72: 521-525.
- Akrami A, Frühwald A, Barbu M C (2015) Supplementing pine with European beech and poplar in oriented strand boards. *Wood Material Science & Engineering* 10(4): 313-318.
- Akyildiz M H, Dogan K, Kaymakci A (2018) The impact of density and mixture ratio of melamine on some properties of oriented strand board. *Maderas. Ciencia y tecnología* 20(3): 417-430.
- Barnes D (2001) A model of the effect of strand length and strand thickness on the strength properties of oriented wood composites. *Forest Prod J* 51(2):36 – 46.
- Beck K, Cloutier A, Salenikovich A, Beauregard R (2009) Effect of strand geometry and wood species on strandboard mechanical properties. *Wood and Fiber Science*: 267-278.
- Beck K, Cloutier A, Alexander S, Beauregard R. (2010) Comparison of mechanical properties of oriented strand board made from trembling aspen and paper birch. *European Journal of Wood and Wood Products* 68(1): 27-33.

- Brochmann J, Edwardson C, Shmulsky R (2004) Influence of resin type and flake thickness on properties of OSB. *Forest Products Journal* 54(3): 51-55.
- Candan Z, Shaler M S, Heller J J P, Edgar R (2017) Enhancing dimensional stability of oriented strand Composites within biorefinery. *Maderas. Ciencia y tecnología* 19(3): 387-398.
- Chen S, Du C, Wellwood R (2010) Effect of panel density on major properties of oriented strandboard. *Wood and Fiber Science* 42(2), 177–184.
- Chiromito E M S, Campos C I, Ferreira B S, Christoforo A L, Lahr F A R (2016) Mechanical properties of wood panels produced with wood strands with three different lengths. *Scientia Forestalis* 44: 175–180.
- Ciobanu V D, Zeleniuc O, Dumitrascu A E, Lepadatescu B, Iancu B (2014) The influence of speed and press factor on oriented strand board performance in continuous press. *BioResources* 9(4): 6805-6816.
- Dumitrascu A E, Lunguleasa A, Salca E A, Ciobanu V D (2020) Evaluation of selected properties of oriented strand boards made from fast growing wood species. *BioResources* 15(1): 199-210.
- Dunky M, Pizzi A (2002) Wood adhesives. in: *Adhesion Science and Engineering*, Elsevier: 1039–1103. DOI: 10.1016/B978-0444
- EN 310; Wood-Based Panels—Determination of Modulus of Elasticity in Bending and of Bending Strength. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1995.
- EN 317; Particleboards and Fibreboards. Determination of Swelling in Thickness after Immersion in Water. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1996.
- EN 319; Particleboards and Fibreboards—Determination of Tensile Strength Perpendicular to the Plane of the Board. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1993.
- EN 322; Wood-based panels—Determination of moisture content. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1994.

- EN 323; Wood-Based Panels—Determination of Density. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1994.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2023) “Forestry production and trade,” (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>), Accessed 26 September 2023.
- Frihart CR, Hunt CG (2010) Adhesives with Wood Materials. Bond Formation and Performance In Wood Handbook—Wood as an Engineering Material; General Technical Report FPL-GTR-190; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 2010; Chapter 10, pp. 10-1–10-24.
- Geimer RL (1982) Dimensional stability of flakeboards as affected by board specific gravity and flake alignment. *Forest Prod J* 32(8):44-52.
- Hsu WE (1987) A process for stabilizing waferboard/OSB. In: Proceedings of Particleboard Symposium. Washington State University, Washington, DC, USA, 1987, pp. 219–236.
- Irle M, Barbu M C (2010) Chapter 1 Wood-based panels technology. In *Wood-Based Panels. An introduction for Specialists*; Thoemen H, Irle M, Sernek M, Eds; Brunel University Press: London, UK, pp. 1–94.
- Jin J, Dai C, Hsu W E, Yu C (2009) Properties of strand boards with uniform and conventional vertical density profiles. *Wood Science and Technology*, 43(7-8): 559-574. <https://doi.org/10.1007/s00226-009-0248-3>
- Kelly MW (1977) Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. Gen. Tech. Rep. FPL-10. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, p 10
- Köhl M, Linser S, Prins K (2020) State of Europe’s Forests 2020. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe. FOREST EUROPE Liaison Unit Bratislava, Slovakia

- Lunguleasa A, Dumitrascu A E, Spirchez C, Ciobanu V D (2021) "Influence of the Strand Characteristics on the Properties of Oriented Strand Boards Obtained from Resinous and Broad-Leaved Fast-Growing Species" *Applied Sciences* 11, no. 4: 1784. <https://doi.org/10.3390/app11041784>
- Malanit P, Laemsak N (2007). Effect of strand orientation on physical and mechanical properties of rubberwood oriented strandboard. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 4(2): 215-223.
- Mantanis G I, Athanassiadou E T, Barbu M C, Wijnendaele K (2018) Adhesive systems used in the European particleboard, MDF and OSB industries. *Wood material science & engineering*, 13(2): 104-116.
- Mendes RF, Junior GB, de Almeida N F, Surdi P G, Barbeiro I N (2013) Effects of thermal pre-treatment and variables of production on properties of OSB panels of *Pinus taeda*. *Maderas- Ciencia y tecnología* 15(2): 141-152.
- Moslemi AA (1974) *Particleboard. Volume 1: Materials*. Southern Illinois University Press.
- Moses D M, Prion H G L (2004) "Stress and failure analysis of wood composites: a new model," *Composites Part B: Engineering*, 35(3): 251–261. DOI: 10.1016/j.compositesb.2003.10.002
- Okino E Y A, Teixeira D E, De Souza M R, Santana M A E, De Sousa M E (2004) Properties of oriented strandboard made of wood species from Brazilian planted forests: Part 1: 80 mm-long strands of *Pinus taeda* L. *European Journal of Wood and Wood Products*, 62(3): 221-224.
- Paredes J J, Jara R, Shaler S M, Van Heiningen A (2008) Influence of hot water extraction on the physical and mechanical behavior of OSB. *Forest Products Journal*, 58(12): 56-62.
- Pérez-Cruzado C, Mohren G M J, Merino A, Rodríguez-Soalleiro R (2012) Carbon balance for different management practices for fast growing tree species planted on former pastureland in southern Europe: a case study using the

- CO2Fix model. *European Journal of Forest Research*, 131(6): 1695–1716. DOI: 10.1007/s10342-012-0609-6
- Pham Van T, Schöpfer C, Klüppel A, Mai C (2021) Effect of wood and panel density on the properties of lightweight strand boards. *Wood Material Science & Engineering*, 16(4): 237-245.
- Ross R J (2010) *Wood handbook: wood as an engineering material*, USDA Forest Service., Forest Products Laboratory. DOI: 10.2737/FPL-GTR-190
- Salem M Z M, Böhm M, Šedivka P, Nasser R A, Ali H M, Elgat W A (2018) Some physico-mechanical characteristics of uncoated OSB ECO-products made from scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and bonded with pMDI resin. *BioResources*, 13(1): 1814-1828.
- Wang S, Gu H, Neimsuwan T, Wang S (2003) Layer thickness swell and related properties of commercial OSB products: A comparative study. Pages 65-76 in *Proceedings of 37th International Wood Composite Materials Symp*, 7-10 April 2003. Washington State Univ., Pullman, WA.
- Wang S, Winistorfer PM (2000) The effect of species and species distribution on the layer characteristics of OSB. *For Prod J* 50(4): 37–44.
- Wu Q, Piao C (1999) Thickness swelling and its relationship to internal bond strength loss of commercial oriented strandboard. *For Prod J* 49(7/8): 50-55.
- Xu W, Winistorfer PM (1995) Layer thickness swell and layer internal bond of medium density fiberboard and oriented strandboard. *Forest Prod J* 45(10):67-71.
- Zhuang B, Cloutier A, Koubaa A (2022) Physical and Mechanical Properties of Oriented Strand Board Made from Eastern Canadian Softwood Species. *Forests*, 13(4): 523.