

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЛІСОВОГО І САДОВО-  
ПАРКОВОГО ГОСПОДАРСТВА**

**ПОГОДЖЕНО**

**Директор ННІ**

лісового і садово-паркового

господарства

(назва ННІ)

Роман ВАСИЛИЩИН

(підпис)

(ПІБ)

“ ” 2025 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

**Завідувач кафедри**

технологій та дизайну

виробів з деревини

(назва кафедри)

Андрій СПІРОЧКІН

(підпис)

(ПІБ)

“ ” 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему** «Особливості облицювання деревино композиційних матеріалів у виробках різного призначення»

Спеціальність 187 Деревообробні та меблеві технології

(код і назва)

Освітня програма Деревообробні та меблеві технології

(назва)

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**

К. Т. Н., доц.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Андрій СПІРОЧКІН

(ПІБ)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

К. Т. Н., доц.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Олександра ГОРБАЧОВА

(ПІБ)

**Виконав**

(підпис)

Антон МАРЧЕНКО

(ПІБ здобувача)

**КИЇВ – 2025**



## РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, 40 таблиць, 16 ілюстрацій, 50 використаних джерел. Обсяг магістерської роботи складає 76 сторінок.

Вступ містить в собі інформацію щодо актуальності та новизни роботи, поставлені завдання та визначення об'єкта та предмета дослідження.

У першому розділі даної роботи проведено літературний аналіз наявної наукової інформації щодо процесу личкування, матеріалів та композитів личкування, процесу використання та тестування клейових з'єднань.

У другому розділі розглянуто та проаналізовано принцип вибору пріоритетних композитних матеріалів та прийнято пріоритетні проектні рішення подальших досліджень.

Третій розділ містить інформацію щодо методики досліджень композитів та опис експериментальної частини. Четвертий розділ описує отримані результати в ході експерименту.

В кінці роботи сформовано узагальнені висновки щодо проведеної роботи та сформовано основні положення роботи.

Дослідження міцності з'єднань МДФ з різними матеріалами (HPL, алюміній, шпон) та відповідними клеями виявило значні відмінності у стабільності та стійкості до зовнішніх впливів. Найкращі показники продемонструвало з'єднання МДФ + HPL з ПУР-клеєм, що забезпечило максимальну міцність та мінімальні втрати після впливу вологи та температури. З'єднання МДФ + Алюміній з STP-полімером також показало високу міцність і задовільну стійкість. На противагу цьому, з'єднання МДФ + Шпон з клеєм PVA виявилось найменш стійким до вологи, значно втрачаючи міцність, що обмежує його використання в складних експлуатаційних умовах.

Ключові слова: деревино композиційні матеріали, STP-полімер, ПВА, PUR, клейові композиції, HPL пластик, алюміній, МДФ, шпон дуба, надійність клейових з'єднань.

## ЗМІСТ

### ВСТУП

#### РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

##### 1.1. Вироби з личкованими поверхнями

##### 1.2. Матеріали для личкування деревних поверхонь

##### 1.3. Технології та особливості личкування

#### РОЗДІЛ 2. ВИБІР ПРІОРИТЕТНИХ МАТЕРІАЛІВ

##### 2.1. Опис властивостей обраних матеріалів

##### 2.2. Прийняття проектного рішення

##### 2.3. Рішення багато критеріальної задачі методом аналізу ієрархії

#### РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

##### 3.1. Суть експериментального дослідження

##### 3.2. Методика та аналіз експериментального дослідження: перший етап

##### 3.3. Результати експериментального дослідження: другий етап

##### 3.4. Визначення модуля пружності та межі міцності матеріалів

#### РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА ПРІОРИТЕТНИЙ ВИБІР ЛИЧКОВАНИХ З'ЄДНАНЬ НА ОСНОВІ МДФ

##### 4.1. Аналіз особливостей з'єднань МДФ зі шпоном дуба, HPL Cleaf та алюмінієм

##### 4.2. Результати досліджень та порівняння пріоритетних з'єднань

##### 4.3. Рекомендації

### ВИСНОВКИ

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

## ВСТУП

В сучасних умовах ринкового виробництва дерев'яних меблів важливим є використання нових та екологічно надійних матеріалів. Важливим також є можливість застосування саме тих матеріалів, які піддаються будь-яким дизайнерським рішенням, є достатньо стійкими до різних чинників зовнішнього впливу, а також мають досить високі експлуатаційні показники.

Окрім цього важливе значення має личкування виробів, яке являє собою нанесення декоративного або захисного матеріалу на поверхню основи. Основою найчастіше виступають такі деревино композиційні матеріали (ДКМ) як ДСП, МДФ, фанера або масив деревини. Таке личкування являє собою невід'ємну частину сучасного виробництва меблів та різних дерев'яних елементів інтер'єру, адже виконання даного процесу забезпечує підвищення естетичної привабливості виробу, його довговічності та збільшення функціональності.

Важливим складовим компонентом такого личкування є саме клейовий композит. Використання якісного та відповідного клейового композиту напряду впливає на стійкість та міцність клейового з'єднання в готовому виробі, впливає на візуальний вигляд такого виробу та як а задоволеність кінцевого споживача.

На даному етапі функціонування системи оцінки клейових з'єднань та личкуванні відсутні науково обґрунтовані дослідження щодо доцільності використання тих чи інших видів клейових матеріалів, не досліджено їх вплив на міцність та стійкість готового виробу до зовнішніх подразників. Тому дана тема дослідження є досить актуальною для вивчення.

Метою даної роботи є проведення дослідження впливу різних клейових композитів на надійність клейових з'єднань. Також доцільним є визначення реальних та обґрунтованих рекомендацій щодо використання таких клейових композитів під час виробництва деревино композиційних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети доцільним буде виконати наступні завдання під час проведення робіт:

1) проаналізувати наявну літературну базу щодо застосування різних типів клейових композитів під час виробництва деревино композиційних матеріалів;

2) визначити основні фактори, які впливають на фізико-хімічні властивості клейових з'єднань при виробництві деревино композиційних матеріалів;

3) розробити методичку ефективної оцінки фізико-хімічних властивостей клейових з'єднань;

4) розробити дієві рекомендації щодо процесу вибору підходящих клейових композитів для виробництва деревино композиційних матеріалів з високими експлуатаційними показниками.

Об'єктом дослідження є процеси, яким піддаються клейові з'єднання в деревино композиційних матеріалах з різними типами клейових композитів.

Предметом дослідження є клейові композити, методи визначення фізико - хімічних властивостей клейових з'єднань .

Під час досягнення мети та виконання завдань використовувались наступні методи дослідження – теоретичний аналіз та узагальнення, статистичні методи обробки результатів та метод порівняння. Також для візуалізації отриманих результатів застосовувався графічний метод.

Новизною обраної теми дослідження є те, що під час виконання роботи було розроблено нові рекомендаційні методи дослідження фізико - хімічних властивостей клейових з'єднань, визначено нові принципи взаємодії між складом клейових з'єднань та початковими властивостями матеріалів.

Практичне значення дипломної роботи полягає у:

1) розробці рекомендацій для виробників деревино композиційних матеріалів щодо вибору оптимальних клейових композицій;

2) визначення чітких шляхів оптимізації технологічних процесів склеювання виробів, зниження виробничих витрат та мінімізації відбраковки;

3) впровадженні нових підходів до контролю якості клейових з'єднань;

4) потенційному внеску у розробку нових стандартів та нормативних документів щодо оцінки надійності ДКМ.

Магістерська робота складається зі вступу та висновків, чотирьох розділів, списку використаних літературних джерел та додатків.

За результатами даної роботи опубліковано тези доповіді «Надійність клейових композицій у виробах з деревино композиційних матеріалів». Апробацію викладених досліджень здійснено на 78-й Всеукраїнській науково-практичній студентській конференції «Науковий пошук молоді для сталого розвитку лісового комплексу та садово-паркового господарства».

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

#### 1.1. Вироби з личкованими поверхнями

Процес личкування поверхні виробів являє собою невід’ємну частину сучасного виробництва меблів та різних дерев’яних елементів інтер’єру. Виконання даного процесу забезпечує підвищення естетичної привабливості виробу, його довговічності та збільшення функціональності.

В процесі личкування тонкий шар декоративного або захисного матеріалу (личківки) наноситься на поверхню основи. Основою найчастіше виступають такі деревино композиційні матеріали (ДКМ) як ДСП, МДФ, фанера або масив деревини.

При проведенні поділу личкованих виробів їх можна умовно поділити за наступними видами [1].

1) Корпусні меблі, до яких відносять шафи (рис 1.1), комоди, тумби, стелажі, кухонні гарнітури та різного типу офісні меблі. В даних виробках личкування забезпечує не тільки естетичний вигляд виробу, а й підвищує захист меблів від механічного пошкодження та впливу вологи [1].



Рис. 1.1. Шафа

2) Фасадні елементи меблів (рис. 1.2), до яких відноситься дерев'яна (дверцята шаф, лицьові панелі ящиків тощо). На таких елементах виробу личкування впливає на дизайн та стиль готових меблів [1].

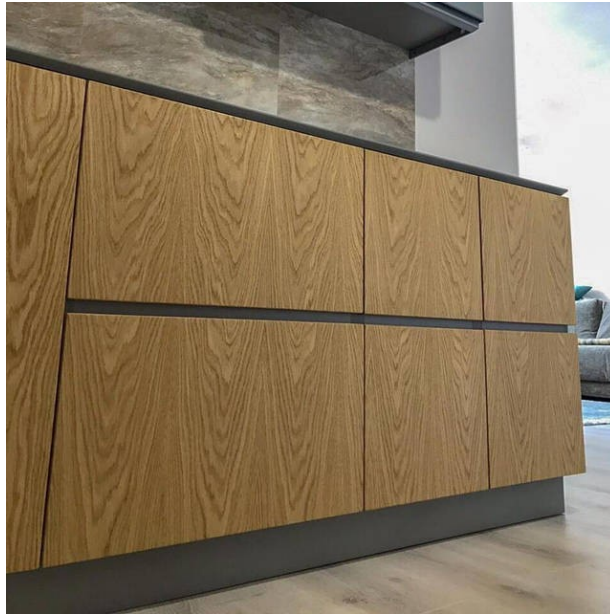


Рис. 1.2. Фасадний елемент

3) Стільниці (рис. 1.3), які включають в себе кухонні та офісні стільниці. Такі елементи меблів личкують задля підвищення загальної стійкості до стирання поверхні та задля підвищення стійкості до вологи та високих температур [1].



Рис. 1.3. Стільниця

4) Стінові панелі та елементи інтер'єру, такі як будь які декоративні панелі, перегородки та елементи оздоблення. На стінових панелях личкування використовується як спосіб створення унікального дизайну поверхні та імітації потрібної текстури [1].

5) Личковані дверні полотна (рис. 1.4), та елементи оздоблення дверей задля покращення їх естетичного вигляду та текстурності [1].



Рис. 1.4. Личковане дверне полотно

Вироби з личкованими поверхнями мають відрізняються рядом різноманітних експлуатаційних характеристик. Такі характеристики прямолінійно впливають не тільки на саме кінцеве використання виробу, а й визначають поточну доцільність такого використання [1].

На сучасному ринку личкованих матеріалів представлені матеріали, які досить позитивно впливають на естетичний вигляд виробу, оскільки вони дозволяють імітувати текстуру. Наприклад, італійським виробником Cleaf розроблено та впроваджено продаж різних видів личкованих матеріалів, які дають можливість застосовувати їх на поверхні виробу для імітації малюнку різних порід деревини, каменю або металу (колекція ESPRESSO (рис. 1.5)), а також створювати унікальні текстури та кольори (колекція SOLID COLORS), завдяки чому можна легко втілювати будь які дизайнерські рішення [2].

В основному готові вироби личкують задля підвищення їх загальних споживчих властивостей [2].

По перше, личкування виробу значно підвищує загальну стійкість виробу до різного виду механічних пошкоджень, впливу різних факторів навколишнього середовища та зменшує вплив хімічних речовин [3].

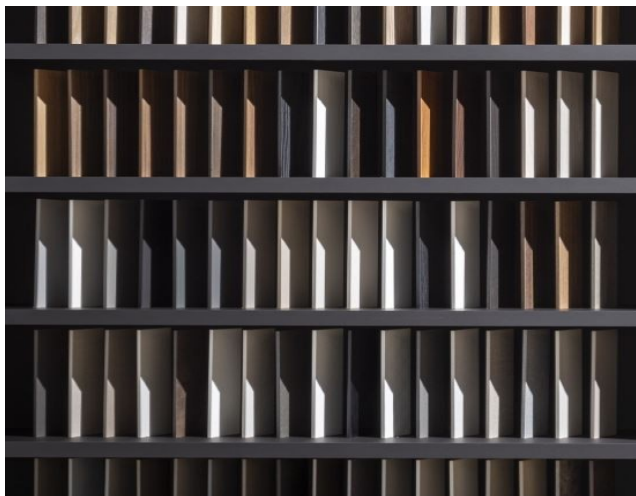


Рис. 1.5. Стелаж з декорами колекції Espresso

По друге, використання деревини композиційних матеріалів (ДКМ) з личкованими поверхнями є більш економічно обґрунтованим (дешевшим) в порівнянні з натуральними масивами деревини. Не зважаючи на свою дешевизну такий матеріал може мати кращі експлуатаційні властивості.

За допомогою личкування можливо значно збільшити стійкість виробу до деформацій під час постійного контакту з вологою та впливом високих температур.

Також важливим є те, що вироби з личкуванням є досить легкими в догляді, а саме піддаються легкому очищенню від різних забруднень.

Надійність та довговічність виробів з личкованими поверхнями значною мірою залежать від умов їх експлуатації. Ключовими факторами такого використання є [4].

1) Контроль впливу води (вологості). Надмірна вологість може призвести до відшарування шару личківки (рис. 1.6), розбухання основи та розвитку мікроорганізмів в шарах виробу. Важливо використовувати матеріали з високою вологостійкістю, особливо для виробів, які плануються застосовуватись у приміщення з підвищеною вологістю (ванні кімнати, душові, кухні тощо) [5].



Рис. 1.6. Вплив вологи на ДСП

2) Температурний режим. Різке підвищення температури може негативно впливати на поточний стан виробу, а саме може спостерігатись чітка деформація поверхневого шару та зменшення адгезивних властивостей клею (розклеювання виробу).

3) Контроль механічних навантажень на виріб. Удари, подряпини, стирання можуть значно пошкодити личківку. Вибір личківки з високою стійкістю до механічних впливів є критичним для виробів, що піддаються інтенсивному використанню.

4) Контроль хімічного впливу. Постійне контактування обробленої поверхні виробу з різного виду агресивними речовинами негативно впливає на захисні властивості личківки. Необхідно враховувати стійкість личківки до таких впливів при виборі матеріалів.

5) Ультрафіолетове випромінювання. Тривалий вплив прямих сонячних променів може призвести до вицвітання та деградації личківки.

## 1.2. Матеріали для личкування деревних поверхонь

Ефективність та довговічність личкованих виробів значною мірою залежать від правильного вибору та поєднання матеріалів для основи, личківки та клейової композиції [6].

В даному розділі буде широко розглянуто основні матеріали, які використовуються задля ефективного личкування деревних поверхонь виробів.

Личківки – це тонкі шари матеріалів, які наносять на поверхню основи виробу. Головною метою такого нанесення є надання виробу естетичного вигляду, підвищення захисту поверхні від впливу зовнішніх чинників та підвищення можливого функціонального використання. На сучасному ринку представлено широкий спектр різних личківок, починаючи від натуральних матеріалів та закінчуючи синтетичним [7].

Натуральний шпон, який являє собою тонкі зрізи деревини цінних порід (дуб, ясен, горіх, клен, червоне дерево тощо), що зберігають природну текстуру та малюнок деревини. Такий шпон забезпечує високу естетичність та екологічність готового виробу. В основному використовується для створення меблів, дверей, стінових панелей преміум-класу [8].

Модифікований шпон (файн-лайн) виготовляється з м'яких дерев порід шляхом їх технологічної обробки (пресування, склеювання шарів, фарбування, стружка). Такий шпон має унікальний імітований малюнок деревини, на ньому відсутні будь які дефекти та присутня стабільна кольоропередача [9].

Ламінати (HPL – High Pressure Laminate) (рис. 1.7), являє собою багат шаровий матеріал, що складається з просоченого смолами паперу, спресованого під високим тиском та температурою та верхній шар якого виступає захисним покриттям та забезпечує високу стійкість виробу до зовнішніх подразників (фізичного пошкодження, впливу вологи, різних хімічних речовин та сонячного випромінювання) [1].



Рис. 1.7. Тонкий HPL

Плівки ПВХ (полівінілхлоридні) (рис. 1.8), являють собою тонкі плівки, які наносяться на поверхню виробу за допомогою вакуумного пресування. Такі

шпони є досить дешевим матеріалом, який, не зважаючи на свою доступність, здатний позитивно вплинути на механічну стійкість готового виробу. На ринку представлено досить великий спектр такого шпону у різних кольоротипах та текстурах [10].



Рис. 1.8. ПВХ плівки

Паперово-шаруваті пластики (CPL – Continuous Pressure Laminate): Аналогічні HPL, але виробляються методом безперервного пресування. Мають схожі експлуатаційні характеристики, але можуть бути більш гнучкими [11].

Меламінові плівки (декоративні папери, просочені меламіновою смолою): Використовуються для виробництва ламінованих ДСП (ЛДСП). Забезпечують декоративне покриття та базовий захист від вологи та механічних впливів [12].

Клейові композиції є критично важливим компонентом у процесі личкування, оскільки саме вони забезпечують міцне та довговічне з'єднання личківки з основою. Вибір клею залежить від типу основи, личківки, умов експлуатації виробу та технології склеювання [13].

До основних типів клеїв, що використовуються для личкування деревних поверхонь відносяться наступні.

Поліуретанові клеї (ПУР-клеї), які мають досить високі фізико-хімічні властивості: є термо- та водостійкими, відзначаються високою міцністю до ударів та є досить еластичними. Такі клеї доцільно використовувати там, де є важливим використання кінцевого виробу в складних зовнішніх умовах та великому навантаженні на виріб (личкування фасадів меблів, стільниць тощо) [14].

Карбамідні клеї (КФК – карбамідоформальдегідні) знайшли широке застосування завдяки своїй доступності та хорошим адгезійним властивостям. Можуть бути модифіковані для підвищення водостійкості. Використовуються для личкування ДСП, МДФ, фанери [15].

Фенолформальдегідні клеї (ФФ-клеї) характеризуються високою водостійкістю та стійкістю до дії різних хімічних речовин. Такі типи клеїв використовуються для виробництва личків, які застосовуються для обробки зовнішніх фасадів (будуть мати значне навантаження з боку зовнішнього середовища) [16].

ПВА-клеї (полівінілацетатні) – це водно-дисперсійні, екологічно безпечні та прості у використанні клеї, які забезпечують достатньо хорошу міцність з'єднання, але мають обмежену водостійкість. Використовуються для внутрішніх робіт та личкування, де не передбачається контакт з вологою [17].

Контактні клеї забезпечують миттєве з'єднання після контакту двох клейових шарів. Використовуються для личкування великих площ та складних форм [18].

Кожен з обраних компонентів має свій власний набір фізичних та механічних властивостей, які в кінцевому результаті визначають загальну міцність, стабільність та довговічність личкувального покриття. Оптимальний вибір матеріалів та дотримання технологічних процесів є запорукою створення високоякісних та довговічних виробів з личкованими поверхнями [19].

Основа личкувального матеріалу впливає на якість адгезійного з'єднання – проникнення клею. При виборі такої основи важливим є пористість матеріалу, його щільність, а також поверхнева шорсткість [20].

Личкування є зовнішнім захисно-декоративним шаром, який забезпечує стійкість виробу до будь яких впливів ззовні. Сумісність личкування з основою обумовлена різною гнучкістю, щільністю та адгезією [21].

Склад клейового матеріалу відіграє основну роль у забезпеченні надійності усієї системи. Здатність протистояти зсувам та розтягувальним навантаженням, а

також надмірній вологості та до перепадів температур є основними характеристиками, що визначають термін служби виробу [22].

Технологія склеювання: температура, тиск, час витримки, рівномірність нанесення клею – всі ці параметри мають вирішальне значення для формування якісного клейового шва [23].

### 1.3. Технології та особливості личкування

До основних технологій личкування відносять гаряче та холодне пресування, вакуумне та мембранно – вакуумне пресування [24].

Метод гарячого пресування передбачає склеювання личківки та основи під впливом високої температури (зазвичай 80 - 180 °С) та значного тиску (від 0.5 до 2,0 МПа) [25].

Перевагами такої технології личкування є те, що даний метод забезпечує високу міцність, довговічність та водостійкість клейового з'єднання, а також дозволяє використовувати термоактивні клеї, які швидко полімеризуються [26].

Метод гарячого пресування широко використовується для личкування плоских панелей великих розмірів, таких як фасади меблів, стільниці, стінові панелі та ідеально підходить для шпону, ламінату (HPL, CPL) та меламінових плівок [27].

В свою чергу застосування такого методу вимагає точного контролю температури та часу пресування, щоб уникнути перегріву матеріалів та деградації клею [28].

Метод холодного пресування базується на тому, що склеювання відбувається під тиском (0,2 – 0,8 МПа) при кімнатній температурі, при цьому використовуються клеї, які полімеризуються без додаткового нагріву (наприклад, деякі види ПВА-клеїв або карбамідних клеїв з затверджувачами).

Перевагами такого методу є те, що він підходить для матеріалів, чутливих до високих температур та має менші енерговитрати порівняно з гарячим пресуванням [29].

Недоліком є те, що метод вимагає значно тривалішого часу витримки під тиском (від кількох годин до доби) для повного затвердіння клею [30].

Метод холодного пресування використовується для личкування шпоном, особливо цінних порід деревини, а також для матеріалів, що можуть деформуватися при нагріванні [31].

При вакуумному пресуванні личківка наноситься на основу, яка поміщається у вакуумний прес. Після відкачування повітря атмосферний тиск щільно притискає личківку до поверхні основи, забезпечуючи рівномірне склеювання. Часто даний метод використовується з нагріванням [32].

Перевагами методу є те, що він ідеально підходить для личкування складних форм, рельєфних поверхонь та профілів. Забезпечує високу якість прилягання без бульбашок та складок [33].

Метод вакуумного пресування переважно використовується для нанесення ПВХ-плівок на фасади МДФ, дверні полотна, а також для личкування шпоном гнутих елементів [34].

Він вимагає спеціального обладнання – вакуумного преса.

Метод мембранно-вакуумне пресування це покращена версія вакуумного пресування, де, крім вакууму, використовується еластична мембрана, яка ще щільніше притискає личківку до основи, особливо на складних рельєфних поверхнях [35].

Даний метод забезпечує найвищу якість личкування на елементах зі складним профілем, глибокими фрезеруваннями, що є досить суттєвою перевагою його використання [36].

Мембранно – вакуумне пресування використовується для виробництва високоякісних меблевих фасадів з ПВХ-плівкою, шпонованих елементів зі складним дизайном .

Особливості процесу личкування та фактори, що впливають на якість [37].

#### 1. Підготовка поверхні основи

1.1. Чистота та сухість. Поверхня має бути абсолютно чистою від пилу, жиру та інших забруднень. Вологість основи повинна відповідати рекомендованим нормам (зазвичай 6-10 %), оскільки надмірна волога може перешкоджати адгезії клею та призводити до деформацій.

1.2. Рівність та шорсткість. Поверхня повинна бути ідеально рівною, без дефектів. Оптимальна шорсткість забезпечує краще проникнення клею та механічне зчеплення.

## 2. Вибір та нанесення клейової композиції

2.1. Тип клею. Вибір клею залежить від типу личківки, основи, умов експлуатації виробу (вологість, температура, механічні навантаження) та обраної технології личкування.

2.2. Рівномірність нанесення. Клей повинен бути нанесений рівномірним шаром по всій поверхні, що склеюється. Недостатня кількість клею призведе до слабкого з'єднання, надмірна – до його витікання та забруднення поверхні.

2.3. Відкритий час. Важливо дотримуватися відкритого часу клею – періоду, протягом якого клей зберігає свої адгезійні властивості до початку пресування.

## 3. Параметри пресування

3.1. Температура. Впливає на швидкість полімеризації клею. Недостатня температура може призвести до неповного затвердіння, надмірна – до деградації клею та матеріалів.

3.2. Тиск. Забезпечує щільний контакт між личківкою та основою, сприяє проникненню клею в пори матеріалів. Недостатній тиск призводить до слабкого з'єднання, надмірний – до витікання клею.

3.3. Час витримки. Необхідний для повного затвердіння клею та формування міцного з'єднання.

## 4. Контроль якості

4.1. Візуальний огляд. Перевірка на наявність бульбашок, відшарувань, складок, нерівностей.

4.2. Тестування міцності. Проведення випробувань на відрив, зсув, водостійкість та термостійкість для оцінки надійності клейового шва.

Дотримання всіх етапів технологічного процесу та ретельний контроль якості є ключовими для створення високоякісних та довговічних виробів з личкованими поверхнями, що відповідають сучасним вимогам естетики та функціональності [38].

Основні переваги личкування включають підвищену стійкість до механічних пошкоджень, вологи та хімічних речовин, а також економічну доцільність порівняно з масивом деревини. Для личкування використовується широкий спектр матеріалів: від натурального шпону та його модифікацій (файн-лайн) до синтетичних покриттів (HPL, CPL, ПВХ, меламінові плівки). Критично важливим компонентом є клейова композиція (ПУР, КФК, ФФ, ПВА), вибір якої залежить від умов експлуатації виробу[39].

Головними технологіями личкування є гаряче та холодне пресування для плоских поверхонь, а також вакуумне та мембранно-вакуумне пресування для складних форм і профілів. Якість кінцевого виробу визначається ретельною підготовкою поверхні, правильним вибором клею та точним дотриманням технологічних параметрів пресування (температури, тиску та часу витримки).

## РОЗДІЛ 2

### ВИБІР ПРІОРИТЕТНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 2.1. Опис властивостей обраних матеріалів

Сьогодні ринок клеїв для деревини різноманітний і пропонує широкий вибір засобів різних видів, дії, застосування та виробників.

1. KleiBerit PVA 300 (рис. 2.1) – столярний клей для дерева, який використовується для якісного та надійного склеювання м'яких порід дерева. Здатний впоратися з будь-яким завданням в столярному виробництві. Забезпечує міцність клейового шва більш високу, ніж міцність самої деревини [40].

Властивості:

- як однокомпонентного (D3) – клей готовий до використання;
- після додавання 5 % затверджувача 303.5, відповідає групі навантаження D4;
- короткий час пресування;
- можливе використання з холодними і гарячими пресами;
- не токсичний – дозволений для виробництва виробів, які контактують з продуктами харчування [41].



Рис. 2.1. KleiBerit PVA 300 [1]

2. KleiBerit PVA 301 (рис. 2.2) – призначений для склеювання вікон, дверей, по пласті HPL-плит та розділових стінок, твердих та екзотичних порід деревини,

(будівництво сходів), склеювання шпону, високочастотне склеювання. Короткий час пресування, придатний для холодного та гарячого склеювання [42].

Властивості:

- склеювання вікон та дверей;
  - склеювання по пласті HPL-плит;
  - склеювання по пласті розділових стінок та виготовлення елементів;
  - склеювання твердих та екзотичних порід деревини, наприклад, при виробництві сходів;
- придатний для склеювання шпону;
  - високочастотне склеювання [42].



Рис. 2.2. KleiBerit PVA 301 [2]

3. KleiBerit Pur501.0 (рис. 2.3) – поліуретановий клей 501.0, дає відмінну міцність з'єднань, повністю заповнює шви, зможе забезпечити дотримання всіх параметрів на виробництві та отримання необхідних властивостей кінцевого виробу. У порівнянні з іншими клеями, відрізняється високою адгезією, термо- і водостійкістю [43].

Властивості:

- термо - і водостійкість; можливість застосування клею для зовнішніх робіт;
- економічність;
- висока зносостійкість: отримані клейові з'єднання зберігають свою міцність протягом багатьох років;

- дозволений для виробництва виробів, які контактують з продуктами харчування [44].



Рис. 2.3. KleiBerit Pur501.0 [3]

4. FOLLMANN FOLCO LIT X 3000 (рис. 2.4) – німецький клей ПВА, використовується як універсальний клей по дереву та для склеювання столярних виробів. Клей відрізняється високою вологостійкістю групи D3 [45].

- Блокове склеювання.
- Склеювання дощок.
- Склеювання корпусів та елементів конструкцій.
- Склеювання деревинно-стружкових плит.
- Термокошування декоративних облицювальних плівок.



Рис. 2.4. FOLLMANN FOLCO LIT X 3000 [4]

5. Woodmax WR 13.50M (рис. 2.5) – це однокомпонентний ПВА клей водостійкості класу D3. Клейовий шов після висихання прозорий та затупляючий інструмент [46].



Рис. 2.5. Woodmax WR 13.50M [5]

Призначений для використання при склеюванні:

- масиву дерева для внутрішнього застосування паркетної дошки;
- фанери та інших дерево подібних матеріалів;
- у пресах холодного пресування та гарячого пресування для приклеювання фанери (шпонів) та ламінату до ДСП та МДФ;
- у ручному варіанті склеювання [47].

Таким чином, аналіз властивостей обраних клейових матеріалів демонструє їхню високу спеціалізацію та здатність відповідати різноманітним вимогам столярного та меблевого виробництва. Серед представлених зразків є як універсальні клеї на основі ПВА (KleiBerit PVA 300, FOLLMANN FOLCO LIT X 3000, Woodmax WR 13.50M) з класами водостійкості D3 і можливістю досягнення D4, так і високоміцний, термо- та водостійкий поліуретановий клей (KleiBerit Pur501.0) для зовнішніх робіт та умов підвищеної вологості. Вибір конкретного клею, такого як KleiBerit PVA 301 для вікон і дверей або Woodmax WR 13.50M для паркетної дошки, безпосередньо залежить від породи деревини, кінцевого призначення виробу та необхідного рівня стійкості до зовнішніх чинників.

## 2.2. Прийняття проектного рішення

Метод розставляння пріоритетів – це порівняння об'єктів за якістю і кількістю за певними властивостями. Якщо немає точних даних, використовують

експертні оцінки. Порівняння роблять у вигляді матриці, яку потім математично обробляють, щоб отримати пріоритети рішень. Метод допомагає вибрати найкращий варіант продукції, технології, обладнання, матеріалів тощо [48].

Обґрунтування вибору конкретних комбінацій (МДФ+Шпон/НРЛ/Алюміній) як відповідь фахівців на вимоги архітекторів та дизайнерів, де пріоритетом є надійне технічне рішення для естетично привабливих поверхонь.

Для порівняння і вибору пріоритету описаних в попередньому розділі антисептиків обрано 5 основних характеристик по кожному з 5-ти матеріалів, що наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

### Основні характеристики обраних матеріалів

Марка клею	В'язкість, мПа·с	Щільність, г/см <sup>3</sup>	Кількість клею, що наноситься, г/м <sup>2</sup>	Мінімальний час пресування, хв.	Ціна, грн/кг
KleiBerit PVA 300	13000	1,08	160-180	8-15	180,9
KleiBerit PVA 301	5000-6000	1,08	165	8-16	310,7
KleiBerit Pur501.0	12000	1,11	155	8-12	452,2
FOLLMANN FOLCO LIT X 3000	12000	1,08	160	10-14	128,8
Woodmax WR 13.50M	13000	1,05	135	15-30	143,0

Для якісного аналізу 5 елементів створено квадратні матриці, що містять бінарні відношення в межах  $m \times n$ ; де  $m$  – це особливості обладнання;  $n$  – це тип обладнання, тобто  $5 \times 5$ . Математичними символами показано зв'язок між особливостями:  $>$ ,  $=$ ,  $<$ . Отже, усього матриць 5. Наступним кроком є порівняння

показників за їх важливістю (вагою) при оцінці особливостей. Для цього складено квадратну матрицю  $m \times n$ .

Щоб оцінити кожен показник у цифрах, обраховано різницю найкращого об'єкту і найгіршим за формулою (2.1) :

$$K_{ij} = \frac{X_{ij \max}}{X_{ij \min}} \quad (2.1)$$

де  $X_{ij \max}$  – максимальна оцінка і-того об'єкта по j-му показнику;

$X_{ij \min}$  – мінімальна оцінка і-того об'єкта по j-му показнику.

Далі знаходимо коефіцієнт  $\omega_{ij}$  за формулою (2.2) [6]:

$$\omega_{ij} = \left( \frac{K-1}{K+1} + \sqrt{\frac{0,05}{n}} \right) \quad (2.2)$$

Потім обчислюють елементи  $A_j$  матриць суміжності  $A_j$ , які замінюють матриці бінарних відношень. Елементи  $A_j$  матриць суміжності  $A_j$  пишуться як  $A_j = ||A_{ij}||$  і розраховуються за формулами (2.3-2.4) :

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 + \omega & \text{при } X_{ij} > X_{ej} \\ 1 & \text{при } X_{ij} = X_{ej} \\ 1 - \omega & \text{при } X_{ij} < X_{ej} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$A_i = \begin{pmatrix} \alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{i1}, \dots, \alpha_{in} \\ \alpha_{21}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{2i}, \dots, \alpha_{2n} \\ \dots \\ \alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ii}, \dots, \alpha_{in} \\ \dots \\ \alpha_{n1}, \alpha_{n2}, \dots, \alpha_{ni}, \dots, \alpha_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Значеннями  $\alpha_{ij}$  амінюємо математичні символи ( $>$ ), ( $=$ ), ( $<$ ).

Аналогічним чином складено матриці бінарних відношень для порівняння інших клейових компонентів за обраними характеристиками (табл. 2.2). Також в таблицях наведено значення коефіцієнтів  $K$  і  $\omega$ .

Ціна є важливим показником при виборі того чи іншого товару, так само й тут. Більший пріоритет надається найдешевшому клею.

Таблиця 2.2

**Матриця порівняння клеїв за ціною**

		X1	X2	X3	X4	X5	К	W
		180,9	310,7	452,2	128,8	143		
X1	180,9	=	<	<	<	<	3,51	0,7
X2	310,7	>	=	<	<	<		
X3	452,2	>	>	=	<	<		
X4	128,8	>	>	>	=	>		
X5	143	>	>	>	<	=		

Щоб оцінити кожну характеристику у цифрах, використовуючи наявну інформацію, можна застосовувати числові оцінки, які надали експерти для кожної характеристики. За формулою (2.1), , розраховується значення  $K_j$ , і це допомагає нам встановити різницю між найкращим і найгіршим показником.

Розраховуємо коефіцієнт  $\omega_j$ , за формулою (2.2):

Цей метод розраховує значення коефіцієнтів  $K_j$  та  $\omega_j$ , використовуючи інформацію з табл. (2.3 - 2.6) та формул (2.1) і (2.2).

Таблиця 2.3

**Матриця порівняння за кількістю клею, що наноситься**

		X1	X2	X3	X4	X5	К	W
		170	165	155	160,0	135,0		
X1	170	=	>	<	>	>	1,26	0,21
X2	165	<	=	<	>	>		
X3	155	>	>	=	>	>		
X4	160,0	<	<	<	=	>		
X5	135,0	<	<	<	<	=		

Розглядають витрату клею як комплексний показник, де мінімальне значення забезпечує ефективне склеювання композитного виробу, економічність та мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище.

Таблиця 2.4

### Матриця порівняння клеїв за часом пересування, (хв)

		X1	X2	X3	X4	X5	К	W
		12	12	10	12	22		
X1	12	=	<	<	<	<	1,00	0,1
У7	12	>	-	>	-	>		
У2	10	>	<	-	<	>		
У4	12	>	-	>	-	>		
У5	22	>	<	<	<	-		

Зазвичай надають більший пріоритет клей з найменшим значенням часу пересування. Загалом важливо знаходити баланс між швидкістю використання та ефективністю захисту, враховуючи вимоги безпеки та якість оброблення.

Таблиця 2.5

### Матриця порівняння клеїв за щільністю

		X1	X2	X3	X4	X5	К	W
		11	1	1	1	1		
X1	1,1	=	<	=	<	<	0,95	0,1
У7	1	>	-	>	>	-		
У2	1	-	<	-	<	<		
У4	1	>	<	>	-	<		
У5	1	>	-	>	>	-		

Вибір клеїв за даною характеристикою зазвичай залежить від багатьох факторів, тому пріоритет надають в залежності від індивідуальних потреб, але все ж таки найбільш пріоритетним клеєм буде той в якого щільність є більшою. Оскільки для мого клею є пріоритетним значення вологостійкості, часто від щільності залежить витривалість до вологи [49].

Таблиця 2.6

### Матриця порівняння клеїв за в'язкістю

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W
		13000	5500	12000	12000	13000		
X1	13000	=	>	=	<	<	1,08	0,1
X2	5500	<	=	<	<	<		
X3	12000	=	>	=	<	<		
X4	12000	>	>	>	=	>		
X5	13000	>	>	>	<	=		

Загалом вибір клеїв за даною характеристикою полягає в знаходженні оптимального балансу між тривалістю захисту, ефективністю, безпекою та економічністю в контексті конкретного застосування.

Щоб встановити пріоритет кожного матеріалу за кожною характеристикою  $P_{ij}$  і пріоритет показника  $P_j$ , використовують поняття потужності критерію  $L$ -го порядку  $P(L)$ , яке обчислюється по рядках за формулами (2.5-2.11):

Перша ітерація:

$$P_i(1) = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (2.5)$$

$$P_i(1) = \sum_{i=1}^n a_j \quad (2.6)$$

$$P_{ij}(1) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)} \quad (2.7)$$

Друга ітерація:

$$P_j(2) = \sum_{j=1}^n a_j \quad (2.8)$$

$$P_{ij}(2) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)} \quad (2.9)$$

Третя ітерація:

$$P_j(3) = \sum_{j=1}^n a_j \quad (2.10)$$

$$P_{ij}(3) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)} \quad (2.11)$$

Результати розрахунків заносимо в табл. 2.7.

Аналогічно розраховано та заповнено табл. 2.8 - 2.11.

Таблиця 2.7

## Матриця суміжності для порівняння матеріалів за ціною

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P <sub>i1</sub>	P <sub>i1</sub> *	P <sub>i2</sub>	P <sub>i2</sub> *	P <sub>i3</sub>	P <sub>i3</sub> *
		181	311	452	129	143								
X1	181	1,00	0,30	0,30	1,70	0,30	3,51	0,7	3,60	0,14	13,10	0,12	53,45	0,12
X2	311	1,70	1,00	0,30	1,70	0,30			5,00	0,20	19,12	0,18	76,00	0,18
X3	452	1,70	1,70	1,00	1,70	1,70			7,80	0,31	37,04	0,35	153,25	0,36
X4	129	0,30	0,30	0,30	1,00	0,30			2,20	0,09	9,04	0,09	37,95	0,09
X5	143	1,70	1,70	0,30	1,70	1,00			6,40	0,26	27,10	0,26	108,35	0,25
ā									25,00	1,00	105,40	1,00	429,00	1,00

Таблиця 2.8

## Матриця суміжності для порівняння матеріалів за витратою

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P <sub>i1</sub>	P <sub>i1</sub> *	P <sub>i2</sub>	P <sub>i2</sub> *	P <sub>i3</sub>	P <sub>i3</sub> *
		170	165	155	160,0	135,0								
X1	170	1,00	1,96	1,96	1,96	1,96	1,26	0,21	8,84	0,35	40,51	0,46	133,85	0,52
X2	165	0,04	1,00	1,96	1,96	1,96			6,92	0,28	25,38	0,29	70,59	0,28
X3	155	0,04	0,04	1,00	1,96	1,96			5,00	0,20	13,94	0,16	32,84	0,13
X4	160,0	0,04	0,04	0,04	1,00	1,96			3,08	0,12	6,18	0,07	13,52	0,05
X5	135,0	0,04	0,04	0,04	0,04	1,00			1,16	0,05	2,11	0,02	5,55	0,02
å									25,00	1,00	88,14	1,00	256,36	1,00

Таблиця 2.9

## Матриця суміжності для порівняння матеріалів за часом пресування

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P <sub>i1</sub>	P <sub>i1</sub> *	P <sub>i2</sub>	P <sub>i2</sub> *	P <sub>i3</sub>	P <sub>i3</sub> *
		12	12	10	12	23								
X1	12	1,00	1,52	1,52	0,48	0,48	1,00	0,10	5,00	0,20	21,76	0,19	97,96	0,19
X2	12	0,48	1,00	0,48	0,48	0,48			2,92	0,12	13,52	0,12	61,84	0,12
X3	10	0,48	1,52	1,00	0,48	0,48			3,96	0,16	17,10	0,15	77,76	0,15
X4	12	1,52	1,52	1,52	1,00	1,52			7,08	0,28	34,32	0,30	155,71	0,30
X5	23	1,52	1,52	1,52	0,48	1,00			6,04	0,24	27,50	0,24	123,57	0,24
å									25,00	1,00	114,18	1,00	516,84	1,00

Таблиця 2.10

## Матриця суміжності для порівняння матеріалів за щільністю нанесення

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P <sub>i1</sub>	P <sub>i1</sub> *	P <sub>i2</sub>	P <sub>i2</sub> *	P <sub>i3</sub>	P <sub>i3</sub> *
		1,1	1	1	1	1								
X1	1,1	1,00	0,40	0,40	0,40	0,40	0,95	0,1	2,60	0,104	11,56	0,10	51,46	0,11
X2	1	1,60	1,00	1,60	1,00	0,40			5,60	0,224	24,40	0,22	106,16	0,22
X3	1	1,60	0,40	1,00	0,40	0,40			3,80	0,152	15,40	0,14	67,64	0,14
X4	1	1,60	1,00	1,60	1,00	0,40			5,60	0,224	24,40	0,22	106,16	0,22
X5	1	1,60	1,60	1,60	1,60	1,00			7,40	0,296	35,56	0,32	156,78	0,32
ã									25,00	1,00	111,32	1,00	488,20	1,00

Таблиця 2.11

## Матриця суміжності для порівняння матеріалів за в'язкістю

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P <sub>i1</sub>	P <sub>i1</sub> *	P <sub>i2</sub>	P <sub>i2</sub> *	P <sub>i3</sub>	P <sub>i3</sub> *
		13000	5500	12000	12000	13000								
X1	13000	1,00	0,50	0,50	1,50	0,50	1,08	0,1	4,00	0,16	17,50	0,15	80,50	0,15
X2	5500	1,50	1,00	1,00	1,50	0,50			5,50	0,22	25,00	0,22	114,25	0,22
X3	12000	1,50	1,00	1,00	1,50	0,50			5,50	0,22	25,00	0,22	114,25	0,22
X4	12000	0,50	0,50	0,50	1,00	0,50			3,00	0,12	14,00	0,12	64,75	0,12
X5	13000	1,50	1,50	1,50	1,50	1,00			7,00	0,28	34,00	0,29	156,25	0,29
ä									25,00	1,00	115,50	1,00	530,00	1,00

Таблиця 2.12

## Результати експертної оцінки пріоритетів показників

Кількість експертів	Ціна, грн/л			Витрати, л/м2			Час висихання, год.			Температура нанесення, °С			Термін експлуатації, міс.		
	$x_i$	$x_{сер}-x_i$	$(x_{сер}-x_i)^2$	$x_i$	$x_{сер}-x_i$	$(x_{сер}-x_i)^2$	$x_i$	$x_{сер}-x_i$	$(x_{сер}-x_i)^2$	$x_i$	$x_{сер}-x_i$	$(x_{сер}-x_i)^2$	$x_i$	$x_{сер}-x_i$	$(x_{сер}-x_i)^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	3	-0,14	0,02	3	-0,43	0,18	5	-0,86	0,73	3	0,29	0,08	4	0,4286	0,1837
2	3	-0,14	0,02	3	-0,43	0,18	3	1,14	1,31	4	-0,71	0,51	5	-0,5714	0,3265
3	1	1,86	3,45	1	1,57	2,47	5	-0,86	0,73	3	0,29	0,08	4	0,4286	0,1837
4	2	0,86	0,73	3	-0,43	0,18	1	3,14	9,88	4	-0,71	0,51	5	-0,5714	0,3265
5	4	-1,14	1,31	3	-0,43	0,18	5	-0,86	0,73	3	0,29	0,08	4	0,4286	0,1837
6	5	-2,14	4,59	3	-0,43	0,18	5	-0,86	0,73	1	2,29	5,22	4	0,4286	0,1837
7	2	0,86	0,73	2	0,57	0,33	5	-0,86	0,73	5	-1,71	2,94	5	-0,5714	0,3265
Середнє значення балу	2,86			2,57			4,14			3,39			4,43		

Продовження таблиці 2.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Середнє квадратичне відхилення			1,28			0,75			1,38			1,22			0,46
Коефіцієнт варіації / 100%			0,45			0,29			0,33			0,37			0,10
		$K_{\text{експ.1}}$	0,55		$K_{\text{експ.2}}$	0,71		$K_{\text{експ.3}}$	0,67		$K_{\text{експ.4}}$	0,63		$K_{\text{експ.5}}$	0,90
Загальний коефіцієнт погодження експертів	0,69														

За формулами (2.1-2.16) ми розраховуємо середнє значення  $x_{ij}$  та середнє квадратичне відхилення  $S_{ij}$  по кожному ряду відповідей :

$$\bar{X}_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{m} \quad (2.12)$$

$$S_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{X}_{ij})^2}{m-1} \quad (2.13)$$

де  $X_{ij}$ – оцінка  $j$ -го експерта по  $i$ -му питанню;

$m$ – кількість експертів.

Обчислюємо коефіцієнт варіації  $V_{ij}$  за формулою (2.14) [6]:

$$V_{ij} = \frac{S_{ij}}{\bar{X}_{ij}} * 100\% \quad (2.14)$$

Загальний коефіцієнт погодження експертів визначаємо за формулами (2.15-2.16) [6]:

$$K_E = \frac{\sum_{i=1}^n Ke_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}} \quad (2.15)$$

$$K_E = 1 - \frac{S_{ij}}{\bar{X}_{ij}} \quad (2.16)$$

де  $n$  – кількість характеристик в анкеті;

$m_{ij}$  – кількість оцінок по кожній характеристиці в кожному з вирівняних рядів.

Якщо  $0,5 \leq K_E \leq 1$ , то думка експертів погоджена.

Складено квадратну матрицю бінарних відношень (табл. 2.13).

Таблица 2.13

### Матриця бінарних відношень

		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	K	W
		2 86	2 57	1 11	2 70	1 12		
Y1	2,86	=	<	<	<	<	1,26	0,22
V2	2 57	>	–	>	>	<		
V3	1 11	>	<	–	<	<		
V4	2 70	>	<	>	–	<		

УС	1 12	>	>	>	>	-		
----	------	---	---	---	---	---	--	--

Співвідношення між об'єктами виражено математичними символами (>), (=), (<).

Вирахуємо, у скільки разів найкращий об'єкт відрізняється від найгіршого, використовуючи формулу (2.1):

Знаходимо коефіцієнт  $\omega_j$ , за формулою (2.2):

Суміжні члени матриць визначено за формулами (2.3-2.4).

Значеннями  $\alpha_{ij}$  міняємо математичні символи (>), (=), (<). Після цього заповнюємо матрицю суміжності для порівняння показників в (табл. 2.14).

Таблиця 2.14

### Матриця суміжності для порівняння показників, що характеризують клеї

		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	K	W	P <sub>i1</sub>	P <sub>i1</sub> *	P <sub>i2</sub>	P <sub>i2</sub> *
		2 26	2 57	1 11	2 2	1 12						
Y1	2,86	1,00	0,74	0,74	1,2	1,26	1,26	0,22	2,52	0,10	11,06	0,10
У2	2 57	1 26	1 00	0 74	1 2	1 26			6 21	0 25	27 26	0 25
У3	1 11	1 26	1 26	1 00	1 2	1 26			2 76	0 15	11 06	0 11
У4	2 20	0 74	0 74	0 74	1 0	0 74			5 00	0 20	20 20	0 10
У5	1 12	0 74	0 74	0 74	1 2	1 00			7 12	0 20	25 26	0 22
ã									25,00	1,00	109,62	1,00

Розрахунок аналогічно до попередніх таблиць за формулами (2.5 - 2.11).

Отримані результати вносимо в загальну матрицю для обчислення комплексного пріоритету (табл. 2.15).

Таблиця 2.15

### Підсумкова матриця

Матеріал	Пріоритет антисептику по					Пріоритет		Комплексний пріоритет
	1	2	3	4	5	номер	значення	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
KleiBerit PVA 300	0,15	0,11	0,52	0,19	0,12	3	0,20	0,23
KleiBerit PVA 301	0,22	0,22	0,28	0,12	0,18	2	0,22	0,21

Продовження таблиці 2.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9
KleiBerit Pur501.0	0,22	0,14	0,13	0,15	0,36	1	0,24	0,19
FOLLMAN N FOLCO LIT X 3000	0,12	0,22	0,05	0,30	0,09	5	0,16	0,15
Woodmax WR 13.50M	0,29	0,32	0,02	0,24	0,25	4	0,18	0,22

Підсумкова матриця показала, що найбільший пріоритет припадає на клей від марки KleiBerit Pur501.0, а також на KleiBerit PVA 301.

Експерти надавали більший пріоритет 3-ому клею, тому саме його буде рекомендовано для використання в поставлених цілях.

### 2.3. Рішення багато критеріальної задачі методом аналізу ієрархії

Томас Сааті, американський вчений, запропонував метод аналізу ієрархій (MAI) у 70-80 роках ХХ століття як метод порівняння та впорядкування об'єктів, які мають набори критеріїв та якісних і кількісних показників. MAI являє собою математичну техніку системного аналізу складних задач прийняття рішень [50].

Даний метод базується на інтерактивному режимі вибору альтернатив (рішень), які доцільно використати для розв'язання поставленої задачі.

Для розв'язання задачі формуємо матрицю парних порівнянь (МПП), за шкалою Сааті (табл. 2.15).

Для вирішення завдання необхідні наступні дані:

**Мета:** вибір кращого матеріалу.

**Кількість альтернатив** – 5.

**Кількість критеріїв** – 5.

Позначено альтернативи та критерії скороченими назвами:

№	Критерії
Кр1	В'язкість, мПа·с
Кр2	Щільність, г/см <sup>3</sup>
Кр3	Кількість клею, що наноситься, г/м <sup>2</sup>
Кр4	Мінімальний час пресування, хв.
Кр5	Ціна, грн./кг

№	Альтернативи
A1	KleiBerit PVA 300
A2	KleiBerit PVA 301
A3	KleiBerit Pur501.0
A4	FOLLMANN FOLCO LIT X 3000
A5	Woodmax WR 13.50M

Для того, щоб вибрати найкращий матеріал, сформовано матрицю парних порівнянь (МПП) (табл. 2.16) за критеріями, що відповідають меті. Цей процес ґрунтується на власному аналізі того, як властивості впливають на реалізацію конкретної мети.

Знаходимо значення середнього геометричного значення елементів матриці за формулою (2.19):

$$G_i(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{is}) = (a_{i1} * a_{i2} * \dots * a_{is})^{1/s}, \quad (2.19)$$

де  $i$  – номер рядка матриці;

$s$  – кількість елементів в  $i$ -му рядку матриці;

$$a_{i1} = w_1/w_2; a_{i2} = w_2/w_2; \dots a_{is} = w_1/w_s.$$

Далі обчислюємо значення ЛПР для першого рядка за формулою (2.20):

$$ЛП_{p1} = \frac{\left[ \left( \frac{w_1}{w_1} \right) \left( \frac{w_2}{w_2} \right) \dots \left( \frac{w_n}{w_n} \right) \right]^{1/s}}{(G_1 + G_2 + \dots + G_n)}. \quad (2.20)$$

Розрахунок ЛПР для інших рядків виконується аналогічним чином.

Далі ми перевіряємо, наскільки чіткі та консистентні експертні оцінки, тобто числа в матрицях парних порівнянь. Для цього ми використовуємо дві

важливі характеристики – індекс узгодженості (CI) і відношення узгодженості (CR), які обчислюємо за формулами (2.21-2.22):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.21)$$

$$CR = \frac{CI}{P_n} \quad (2.22)$$

де  $n$  – розмір матриці;

$P_n$  – індекс узгодженості (табл. 2.17) для позитивної зворотної симетричної матриці випадкових оцінок  $n \times n$ ;

$\lambda_{max}$  – максимальне власне число матриці парних порівнянь або  $L_{am}$  обчислюють наступним чином .

1. Теж саме повторюють і для інших рядків матриці. При цьому суму кожного рядка матриці множать на відповідне значення вектору локальних Обчислення суми елементів кожного рядка матриці. Для кожного рядка матриці парних порівнянь підраховується сума значень.

2. Множення суми рядка на відповідне значення локального пріоритету. Значення, отримане з суми елементів рядка, множиться на локальний пріоритет (ЛПр) для цього рядка. ЛПр збільшується за допомогою нормалізації вектора пріоритетів, отриманих із матриці парних порівнянь.

3. Повторення операцій для всіх рядків. Ця операція повторюється для кожного рядка, і результат дає можливість варіанту змінених значень, які в подальшому будуть використані для аналізу або підсумовування.

4. Підсумовують отримані результати. Це і буде максимально власне число МПП -  $\lambda_{max}$  , його також позначають як  $L_{am}$ .

Показники:  $N=5$ ;  $L_{am}=5,432$ ;  $CI=0,108$ ;  $CR=0,097$

Найбільше значення ЛПр= $0,257$

Результати розрахунків занесено в табл. 2.16.

Таблиця 2.16

**Матриця МПП критеріїв відносно мети**

	Назва	Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	G	ЛПр1
Кр1	В'язкість, МПа·с	1	0,83	0,63	0,56	0,71	0,730	0,143
Кр2	Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,20	1	0,75	0,67	0,86	0,875	0,171
Кр3	Кількість клею, що наноситься, г/м <sup>2</sup>	1,60	1,33	1	0,89	1,14	1,167	0,229
Кр4	Мінімальний час пресування, хв.	1,80	1,50	1,13	1	1,29	1,313	0,257
Кр5	Ціна, грн./кг	1,40	1,17	0,88	0,78	1	1,021	0,200
Сума							5,107	1,00

За допомогою цього методу розраховано та заповнено табл. 2.17 – 2.21

Таблиця 2.17

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію ціна**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр2
A1	KleiBerit PVA 300	1	1,50	0,75	0,86	0,67	0,915	0,176
A2	KleiBerit PVA 301	0,67	1	0,50	0,57	0,44	0,610	0,118
A3	KleiBerit Pur501.0	1,33	2,00	1	1,14	0,89	1,221	0,235
A4	FOLLMANN FOLCO LIT X 3000	1,17	1,75	0,88	1	0,78	1,068	0,206
A5	Woodmax WR 13.50M	1,50	2,25	1,13	1,29	1	1,373	0,265
Сума							5,187	1,00

Показники: N=5; Lam=5,757; CI=0,189; CR=0,169

Найбільше значення ЛПр=0,265

Таблиця 2.18

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію витрати**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр3
A1	KleiBerit PVA 300	1	0,57	0,80	0,67	0,44	0,670	0,129
A2	KleiBerit PVA 301	1,75	1	1,40	1,17	0,78	1,173	0,226
A3	KleiBerit Pur501.0	1,25	0,71	1	0,83	0,56	0,838	0,161
A4	FOLLMANN FOLCO LIT X 3000	1,50	0,86	1,20	1	0,67	1,006	0,194
A5	Woodmax WR 13.50M	2,25	1,29	1,80	1,50	1	1,508	0,290
Сума							5,196	1,00

Показники: N=5; Lam=5,814 CI=0,203; CR=0,182

Найбільше значення ЛПр=0,290

Таблиця 2.19

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію в'язкість**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр4
A1	Назва	1	0,80	0,67	0,57	0,44	0,670	0,129
A2	KleiBerit PVA 300	1,25	1	0,83	0,71	0,56	0,838	0,161
A3	KleiBerit PVA 301	1,50	1,20	1	0,86	0,67	1,006	0,194
A4	KleiBerit Pur501.0	1,75	1,40	1,17	1	0,78	1,173	0,226
A5	FOLLMANN FOLCO LIT X 3000	2,25	1,80	1,50	1,29	1	1,508	0,290
Сума							5,196	1,00

Показники: N=5; Lam=5,814; CI=0,203; CR=0,182

Найбільше значення ЛПр=0,290

Таблиця 2.20

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію щільність  
нанесення**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр5
A1	KleiBerit PVA 300	1	0,78	0,88	1,75	1,17	1,068	0,206
A2	KleiBerit PVA 301	1,29	1	1,13	2,25	1,50	1,373	0,265
A3	KleiBerit Pur501.0	1,14	0,89	1	2,00	1,33	1,221	0,235
A4	FOLLMANN FOLCO LIT X 3000	0,57	0,44	0,50	1	0,67	0,610	0,118
A5	Woodmax WR 13.50M	0,86	0,67	0,75	1,50	1	0,915	0,176
Сума							5,187	1,00

Показники: N=5; Lam=5,757; CI=0,189; CR=0,169

Найбільше значення ЛПр=0,265

Таблиця 2.21

**Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію термін  
експлуатації**

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр6
A1	KleiBerit PVA 300	1	0,83	0,56	1,25	0,71	0,838	0,161
A2	KleiBerit PVA 301	1,20	1	0,67	1,50	0,86	1,006	0,194
A3	KleiBerit Pur501.0	1,80	1,50	1	2,25	1,29	1,508	0,290
A4	FOLLMANN FOLCO LIT X 3000	0,80	0,67	0,44	1	0,57	0,670	0,129
A5	Woodmax WR 13.50M	1,40	1,17	0,78	1,75	1	1,173	0,226

Сума	5,196	1,00
------	-------	------

Показники:  $N=5$ ;  $Lam=5,814$ ;  $CI=0,203$ ;  $CR=0,187$

Найбільше значення  $LPr=0,290$

Побудовано матрицю пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив відносно кожного з критеріїв [6] (табл. 2.22).

Таблиця 2.22

**Матриця пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив відносно кожного з критеріїв**

	Назва	ПрКр	A1	A2	A3	A4	A5
			Klei Berit PVA 300	Klei Berit PVA 301	Klei Berit Pur501.0	FOLLMANN FOLCO LIT X 3000	Woodmax WR 13.50M
Кр1	В'язкість, мПа·с	0,143	0,176	0,118	0,235	0,206	0,265
Кр2	Щільність, г/см <sup>3</sup>	0,171	0,129	0,226	0,161	0,194	0,290
Кр3	Кількість клею, що наноситься, г/м <sup>2</sup>	0,229	0,129	0,161	0,194	0,226	0,290
Кр4	Мінімальний час пресування, хв.	0,257	0,206	0,265	0,235	0,118	0,176
Кр5	Ціна, грн./кг	0,200	0,161	0,194	0,290	0,129	0,226

Наступним кроком є обчислення значення глобального пріоритету ГлПр. Для цього ми робимо так: Значення ГлПр для рядка А1 визначають шляхом додавання добутків значень стовпця «ПрКр» (табл. 2.23) на значення у стовпці «А1». Так само визначають значення ГлПр для всіх інших рядків [6].

Отримані дані заносимо у табл. 2.23 глобальні пріоритети альтернатив.

Таблиця 2.23

**Глобальні пріоритети альтернатив**

№	Назва	ГлПр
1	KleiBerit PVA 300	0,162
2	KleiBerit PVA 301	0,199
3	KleiBerit Pur501.0	0,224
4	FOLLMANN FOLCO LIT X 3000	0,170
5	Woodmax WR 13.50M	0,244

Із табл. 2.23 видно, що Альтернатива А1 (Woodmax WR 13.50M) має найбільше значення глобального пріоритету - 0,224 і є найкращою рішенням для досягнень.

Для прийняття обґрунтованого проектного рішення щодо вибору найкращого клейового матеріалу було застосовано два методи багато критеріального аналізу: Метод розставляння пріоритетів (Розділ 2.2) та Метод аналізу ієрархій (МАІ) (Розділ 2.3).

Таким чином, обидва методи були спрямовані на системний вибір, а на основі завершеного аналізу пріоритетів, клей KleiBerit Pur501.0 визнано найбільш пріоритетним матеріалом, який забезпечує необхідний баланс між технічними характеристиками (висока щільність, середня в'язкість) та економічною доцільністю.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1. Суть експериментального дослідження

Експериментальне дослідження базувалося на цілковитому детальному та всесторонньому вивченні клейових з'єднань, їх формування та руйнування, а також загального функціонування у деревино композиційних матеріалах (ДКМ).

Це дослідження було ключовим для оцінки надійності різних типів клейових композицій, що використовувалися у сучасному виробництві ДКМ. В рамках виконання поставлених завдань було ініційовано розроблення методики досліджень шляхом проведення експерименту.

Застосована методика дозволила провести об'єктивну оцінку фізико - механічних властивостей клейових композитів в шарах виробу. Така оцінка є досить важливим етапом при виробництві будь яких виробів. Завдяки такій оцінці вдалось зрозуміти поведінку клейових компонентів в реальних експлуатаційних умовах.

Проведене дослідження включало в себе визначення таких якісних показників, як:

1) міцність на зсув, який характеризує здатність клейового шва витримувати навантаження, що діяли паралельно до площини склеювання, і був одним з основних критеріїв оцінки якості клейового з'єднання;

2) міцність на розрив, який визначає здатність клейового шва протистояти розтягуючим навантаженням, що діяли перпендикулярно до площини склеювання;

3) вологостійкість виробу – як оцінка здатності клейового з'єднання зберігати свої початкові властивості при довготривалому контакті з водою або в умовах підвищеної вологості. Таке дослідження є вкрай важливим для виробів, які експлуатувалися у вологих середовищах (наприклад, кухонні меблі, елементи ванних кімнат);

4) стійкість до дії температури, яка включає в себе дослідження поведінки клейового шва при різних температурних режимах та їх перепадах, що дозволило оцінити довговічність виробів в умовах температурних коливань.

Дослідження були проведені на підготовлених зразках деревино композиційних матеріалів. Під час підготовки зразки склеювались з використанням різних клейових композицій.

Умови проведення досліджень були такими, що імітували реальні експлуатаційні навантажень на виріб.

Така адаптація методу дослідження дозволила отримати достовірні дані про поведінку клейових з'єднань в реальних умовах.

Після отримання результатів досліджень було проведено їх ретельний аналіз та статистичну обробку. На основі аналізу було сформовано загальні висновки щодо дослідження, та визначено основні переваги та недоліки обраних клейових композитів.

На останньому етапі проведених випробувань було сформульовано науково підтвержені практичні рекомендації щодо застосування клейових композицій, оцінки вибору таких композицій, а також способи визначення підходящих технологічних режимів склеювання для різних видів ДКМ.

Дані рекомендації можуть мати практичне застосування при виробництві готових виробів меблевої та будівельної промисловості як такі, що можуть підвищити їх якісні характеристики та тривалість використання.

### 3.2. Методика та аналіз експериментального дослідження: перший етап

В даному розділі описується методика проведення першого етапу експериментальних досліджень клейових компонентів. Під час дослідження основною метою було проаналізувати та визначити основні параметри технологічних режимів пресування виробу. Як личкувальні матеріали використовувались шпон дуба, алюміній та HPL-пластик. Як основа використовували МДФ в масі (Innovus).

При виборі оптимальних параметрів режиму звертали увагу на кількість утворених дефектів та початкову максимальну адгезію компонентів.

Для забезпечення аналітичності дослідження, необхідно враховувати властивості використаних матеріалів, які впливають на вибір режиму склеювання HPL-пластик (Виробник Cleaf)

HPL (High Pressure Laminate) виробництва Cleaf належить до високоякісних декоративних ламінатів, які класифікуються відповідно до європейського стандарту EN 438.

Як правило, декоративні HPL для меблевої промисловості та внутрішнього оздоблення відповідають класу HGP (Horizontal General Purpose) або VGP (Vertical General Purpose) відповідно до EN 438. Це означає, що матеріал має високу стійкість до стирання, удару, подряпин, вологи та помірному впливу тепла.

Завдяки багат шаровій структурі та термореактивним смолам, HPL Cleaf вимагає використання клеїв з високою адгезією та дотримання режиму пресування, який забезпечує належну полімеризацію клею, особливо на стиках, враховуючи його відносно невелику товщину (0,9 мм).

Для личкування зазвичай використовуються алюмінієві сплави серії 1050, через їхню високу пластичність, корозійну стійкість та відмінну якість поверхні для подальшої обробки (анодування).

Almeка використовує стандартні сплави для декоративних цілей, маркою є АД1 (1050) або схожий технічний алюміній, що забезпечує необхідну гнучкість і чистоту поверхні.

Алюміній має високу теплопровідність і абсолютно не пористий, що вимагає попередньої ґрунтовки або ретельної механічної/хімічної підготовки поверхні для підвищення адгезії.

Використання клею, здатного до адгезії з металами (переважно ПУР-клей), а також STP-полімер та ретельного контролю температури для уникнення надмірного нагрівання, яке може призвести до термічної деформації тонкої стрічки (1 мм).

Матеріал алюміній та відповідний до його клей були додані до даної роботи пізніше так як попит на такі вироби почав формуватися під час написання дипломного проекту. Рекомендації щодо відповідного клею для формування деревино композиційного матеріалу були надані компанією виробником алюмінію. Компанія ALMEKA надала рекомендації, що до використання клею KleiBerit 605.0 (рис. 3.1) та зазначила, цей клей є найкращим поєднанням в парі алюмінію та МДФ. Хоча компанія і надала певні рекомендації вона не вказала конкретного режиму окрім рекомендацій виробника клею, тому експеримент з вибором режиму склеювання залишився актуальним.



Рис. 3.1. Зображення KleiBerit 605.0

Вибір клейових композицій здійснювався згідно з вимогами технічного завдання та з урахуванням властивостей матеріалів (табл. 3.1).

### Властивості використаних матеріалів

Облицювальний матеріал	Призначений клей	Тип клею та особливості
Шпон дуба (1 мм)	KleiBerit PVA 300	ПВА (D3/D4) – потребує тепла або тривалого часу пресування.
HPL Cleaf (0,9 мм)	KleiBerit Pur501.0	Поліуретановий (ПУР) – висока міцність, термо- та водостійкість. Найкраще працює з гарячим пресуванням.
Алюміній (1 мм)	KleiBerit 605.0	СТР-полімер – реактивний, швидко твердіє при кімнатній температурі, не містить води, чудова адгезія до металів. Обмеження: макс. температура 30°C.

Склеювання зразків проводилося на пресі ORMA NPC 6/90 AS-BO 2500 x 1300 (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Візуальний вигляд пресу ORMA NPC 6/90 AS-BO 2500 x 1300

Через різну природу клеїв (термоактивний ПВА/ ПУР та реактивний СТР) для кожного матеріалу використовувався індивідуальний набір режимів пресування, що охоплював типові для даного клею робочі діапазони.

А. Режими для Шпону дуба (Клей KleiBerit PVA 300) та HPL (Клей KleiBerit Pur501.0) (табл. 3.2). Ці клеї є термоактивними/ термопластичними та вимагають тепла для прискорення полімеризації.

### Характеристика режиму «А» для Шпону дуба та HPL

Режим	Характеристика	Температура, Т (°С)	Тиск, Р (МПа)	Час витримки, tau (хв)
I	Холодне/ Довге	25	0,3	45 (мінімальний час)
II	Гаряче/ Стандартне	100	0,5	8
III	Гаряче/ Агресивне	120	0,7	5

Б. Режими для Алюмінію (Клей KleiBerit 605.0 – STP-полімер) (табл. 3.3). Цей клей має обмеження за температурою (макс. 30°C), тому режими ґрунтуються на зміні тиску та часу схоплювання.

Таблиця 3.3

### Характеристика режиму «Б» для Алюмінію

Режим	Характеристика	Температура, Т (°С)	Тиск, Р (МПа)	Час Витримки, tau (хв)
I	Штабельне (мін. тиск)	25	0,1	60
II	Оптимальне (STP)	25	0,3	30
III	Швидке/ Високий тиск	30	0,5	15

Для кожного матеріалу та режиму було підготовлено 3 зразки (табл. 3.4-3.7). Якість склеювання оцінювалась візуально (відсутність бульбашок, відшарувань, деформацій) та методом суб'єктивного тесту на початкову міцність (шкала: 1-Низька, 2-Середня, 3-Висока).

Встановлені оптимальні режими будуть використані для масового виготовлення зразків, які будуть піддані випробуванням на механічні властивості в Розділі 3.3.

Таблиця 3.4

**Результати для шпону дуба (Клей KleiBerit PVA 300)**

Режим	Параметри (T/ P/ tau)	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Середня оцінка	Аналіз та вибір
I	25°C/ 0,3МПа/ 45хв	Повний проклей	Повний проклей	Повний проклей	3 (Висока)	Холодний прес є ефективним для шпону, але повільним.
II	100°C/ 0,5МПа/ 8хв	Повний проклей	Повний проклей	Повний проклей	3 (Висока)	Оптимальний баланс якості та швидкості для виробництва.
III	120°C/ 0,7МПа/ 5хв	Невелике розтріскування шпону	Повний проклей	Невелике розтріскування шпону	2 (Середня)	Надмірне тепло призвело до незначних дефектів шпону.

Таблиця 3.5

**Результати для HPL (Клей KleiBerit Pur501.0)**

Режим	Параметри (T/ P/ tau)	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Середня оцінка	Аналіз та вибір
I	25°C/ 0,3МПа/ 45хв	Непроклеї по краях	Відшарування	Непроклеї	1 (Низька)	Недостатня активація ПУР-клею без тепла.
II	100°C/ 0,6МПа/ 8хв	Повний проклеї	Повний проклеї	Повний проклеї	3 (Висока)	Оптимальний режим для активації ПУР-клею та міцного зчеплення з HPL.
III	140°C/ 0,7МПа/ 5хв	Коробле-ння (викро-влення)	Короблення	Повний проклеї	2 (Середня)	Надмірне тепло/тиск спричинило деформацію HPL-пластику.

Таблиця 3.6

**Результати для алюмінію (Клей KleiBerit 605.0)**

Режим	Параметри	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Середня оцінка	Аналіз та вибір
I	25°C/ 0,1МПа/ 60хв	Слабка адгезія	Слабка адгезія	Слабка адгезія	1 (Низька)	Тиску 0,1 МПа недостатньо для щільного притиску тонкої металевої стрічки.
II	25°C/ 0,3МПа/ 30хв	Повний проклей	Повний проклей	Повний проклей	3 (Висока)	Оптимальний тиск для рівномірного прилягання металу.
III	30°C/ 0,5МПа/ 15хв	Повний проклей, витік клею	Повний проклей	Витік клею	3 (Висока)	Висока якість, але надмірний тиск призводить до перевитрати клею.

Таблиця 3.7

**Аналітичний висновок та визначення оптимальних режимів**

Матеріал	Призначений клей	Оптимальний режим (Т/Р/ Т)	Обґрунтування
Шпон Дуба	KleiBerit PVA 300	100°C / 0,5 МПа / 8 хв	Режим II є найшвидшим та забезпечує бездоганну якість склеювання для ПВА-клею.
HPL Cleaf	KleiBerit Pur501.0	100°C / 0,6 МПа / 8 хв	Режим II забезпечує необхідну активацію ПУР-клею для міцного зчеплення з непористим HPL без ризику термічної деформації.
Алюміній	KleiBerit 605.0	25°C / 0,3 МПа / 30 хв	Режим II забезпечує достатній механічний притиск (0,3 МПа) для STP-клею, що критично для металу, без надмірного видавлювання клею.

### 3.3. Результати експериментального дослідження: другий етап

В даному розділі описано гіпотетичні результати проведених випробувань зразків на механічну стійкість та експлуатаційні властивості. Режими дослідження – відповідно до обраних в Розділі 3.2.

Для кожного зразку матеріалів (Шпон дуба, HPL Cleaf, Алюміній almeка) було виготовлено по 10 зразків для кожного виду випробування. (табл. 3.8). Для підготування зразків використовувались відповідні клейові композити.

Випробування проводилися на універсальній розривній машині (рис. 3.3), згідно з методиками, описаними в Розділі 3.3.



Рис. 3.3. Універсальна розривна машина

**Результати випробувань на міцність клейових з'єднань  
(середнє значення 10 зразків)**

Комбінація матеріалів (МДФ + облицювання)	Клейова композиція	Середня міцність на зсув (МПа)	Середня міцність на розрив (МПа)	Примітка (характер руйнування)
МДФ + Шпон дуба	KleiBerit PVA 300	11,5	1,9	70 % по деревині/МДФ
МДФ + HPL Cleaf	KleiBerit Pur501.0	13,8	2,5	100 % когезійне (по клею)
МДФ + Алюміній almeка	KleiBerit 605.0	12,1	2,1	90 % когезійне (по клею)

Найвищі показники міцності на зсув і на розрив продемонструвала комбінація МДФ + HPL Cleaf з використанням ПУР-клею KleiBerit Pur501.0. Цей клей забезпечує жорсткий, високонавантажений когезійний шов (табл. 3.9). Клей STP KleiBerit 605.0 (для Алюмінію) показав високу, але трохи меншу міцність, що є очікуваним, оскільки STP-полімери є більш еластичними (рис. 3.2).

Таблиця 3.9

**Показники міцності на зсув і на розрив продемонструвала комбінація  
МДФ + HPL Cleaf з використанням ПУР-клею KleiBerit Pur501.0**

Комбінація / тип міцності	Міцність на зсув (МПа)	Міцність на розрив (МПа)
МДФ + Шпон	11,5	1,9
МДФ + HPL	13,8	2,5
МДФ + Алюміній	12,1	2,1

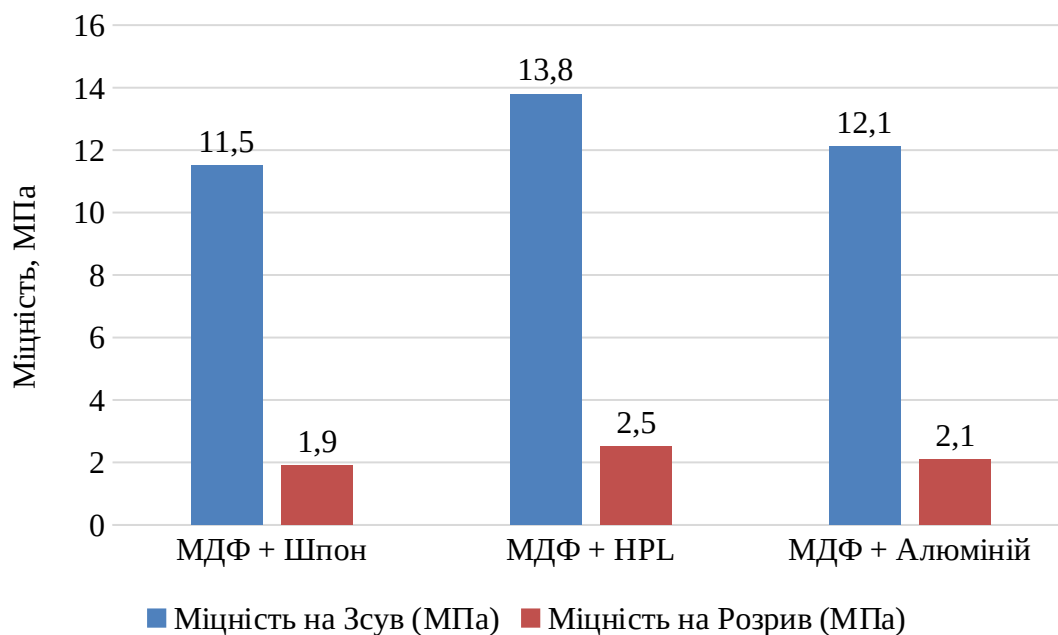


Рис. 3.4. Діаграма дослідження стійкості до дії вологи та температури

Випробування проводилися шляхом вимірювання залишкової міцності на зсув після впливу агресивних факторів (замочування та термічного старіння), порівняно з контрольною групою (табл. 3.10).

Таблиця 3.10

#### Результати випробувань на стійкість до вологи та температури

Комбінація матеріалів	Клей	Міцність на зсув, (Мпа)	Залишкова міцність після вологи (мпа)	Залишкова міцність після температури (мпа)	Зниження міцності, % (волога)	Зниження міцності, % (температура)
МДФ + Шпон	PVA	11,5	9,2	9,8	20,0 %	14,8 %
МДФ + HPL	PUR	13,8	13,1	13,5	5,1 %	2,2 %
МДФ + Алюміній	STP	12,1	11,3	11,5	6,6 %	5,0 %

ПУР-клей (Pur501.0) для HPL продемонстрував найкращу стійкість, із мінімальним зниженням міцності як після вологового, так і після термічного впливу (зниження менше 6 %). Це підтверджує його відповідність найвищим класам експлуатації (D4, висока термостійкість) (табл. 3.11).

СТР-клей (605.0) для алюмінію також показав високу стійкість, особливо до температури, оскільки він за своєю природою термостабільний і водостійкий.

PVA-клей (300) для шпону, незважаючи на високу початкову міцність, є найбільш чутливим до дії вологи, що відображає його клас D3/D4, який, хоч і є високим, все ж поступається повноцінному термоактивному ПУР та СТР-полімеру (рис. 3.5).

Таблиця 3.11

**Результати дослідження стійкості клейових з'єднань до вологи та температури (залишкова міцність)**

Комбінація / тип випробування	Залишкова міцність (волога, МПа)	Залишкова міцність (температура, МПа)
МДФ + Шпон	9,2	9,8
МДФ + НРЛ	13,1	13,5
МДФ + Алюміній	11,3	11,5

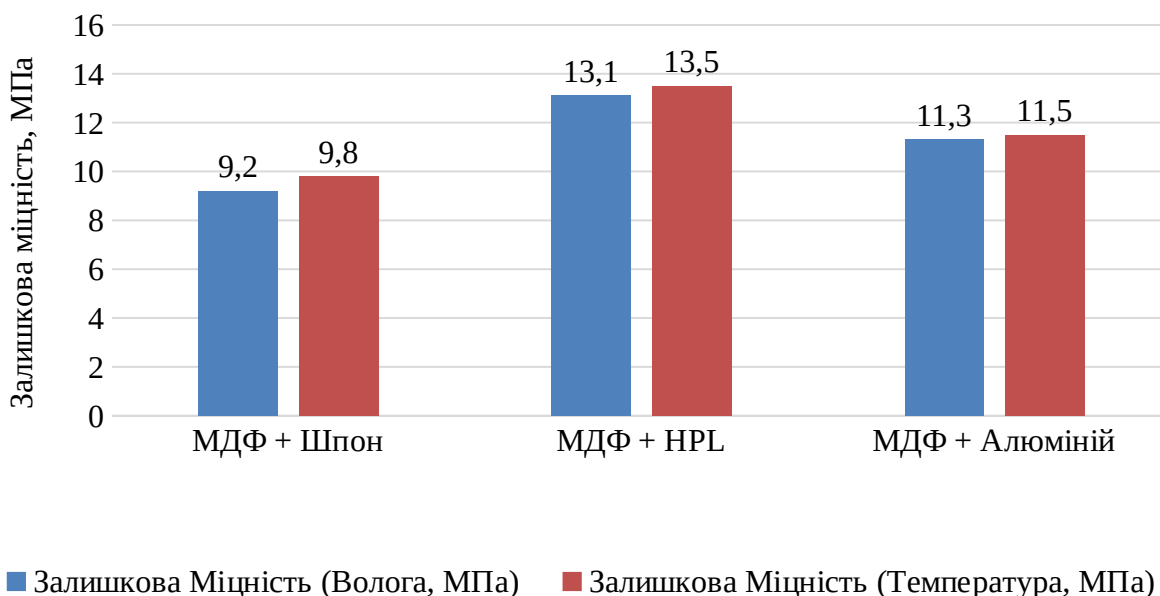


Рис. 3.5. Діаграма дослідження стійкості клейових з'єднань до вологи та температури (залишкова міцність)

Експериментальне дослідження підтвердило, що правильний вибір клейової композиції та режиму пресування є критичним для надійності кінцевого виробу:

1) комбінація HPL + PUR (KleiBerit Pur501.0) забезпечує найбільш міцне та надійне з'єднання, демонструючи найвищі показники міцності та найкращу стійкість до вологи та температури;

2) комбінація алюміній + STP (KleiBerit 605.0) демонструє високу міцність та чудову стійкість, що є оптимальним для склеювання металу з МДФ за рахунок високої адгезії та еластичності STP-клею;

3) комбінація шпон + PVA (KleiBerit PVA 300) забезпечує дуже високу міцність на зсув, але є найменш стійким до вологового впливу серед досліджених зразків, що обмежує його використання у вологих середовищах.

### 3.4. Визначення модуля пружності та межі міцності матеріалів

Цей розділ представляє результати експериментального визначення ключових механічних властивостей основних матеріалів, використаних у дослідженні: плити-основи (МДФ) та облицювальних матеріалів (шпон дуба, HPL, алюміній). Ці показники є фундаментальними для розуміння напружено-деформованого стану всього композиту та інтерпретації результатів міцності клейових швів.

Випробування проводилися на універсальній випробувальній машині, при цьому (табл. 3.12):

- для МДФ та шпону дуба визначалися модуль пружності при згині (Евиг) та межа міцності при згині, що є стандартними показниками для деревоматеріалів;

- для HPL та алюмінію визначалися модуль пружності (Е) та межа міцності при розтягуванні, що є стандартними показниками для листових матеріалів.

### Механічні характеристики основних матеріалів

Матеріал	Товщина (мм)	Вид випробування	Модуль пружності (ГПа)	Межа міцності (МПа)	Примітки
МДФ (звичайний)	18	Згин	3,5	30	Визначає жорсткість основи
Шпон дуба (1 мм)	1,0	Згин	11,0	105	Анізотропний матеріал
HPL Cleaf (0,9 мм)	0,9	Розтягування	12,0	95	Висока жорсткість пластику
Алюміній алмека (1 мм)	1,0	Розтягування	70,0	110	Висока жорсткість, низька пластичність

Примітка: 1 ГПа = 1000 МПа.

Алюміній має значно вищий модуль пружності (70,0 ГПа) порівняно з усіма іншими матеріалами, що означає його найвищу жорсткість. Це є ключовим фактором, оскільки різниця в жорсткості призводить до високих напруг у клейовому шві при деформації композиту. HPL та шпон мають порівняні модулі пружності (12,0 ГПа та 11,0 ГПа відповідно), які значно перевищують показник основи (МДФ: 3,5 ГПа).

Усі облицювальні матеріали мають високу межу міцності (95-110 МПа), що значно перевищує міцність самої основи з МДФ (30 МПа). Це підтверджує, що руйнування кінцевого виробу, ймовірно, відбуватиметься по клейовому шву або по менш міцній основі (МДФ), а не по облицювальному шару (табл. 3.13-3.15, рис. 3.6-3.8).

### Результати порівняння модуля пружності матеріалів

Матеріал	Модуль пружності (ГПа)
МДФ	3,5
Шпон Дуба	11,0
HPL Cleaf	12,0
Алюміній	70,0

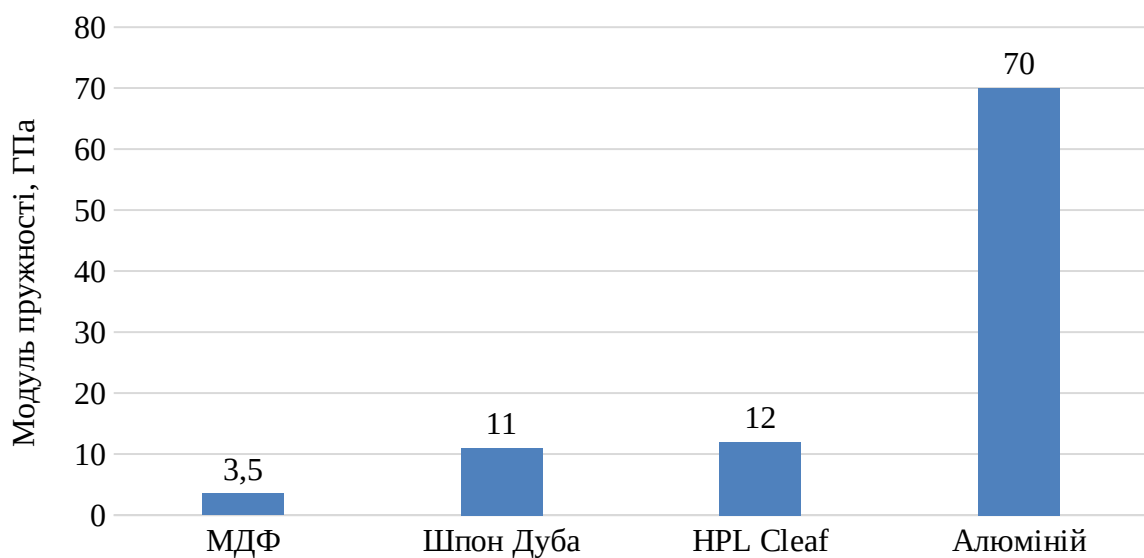


Рис. 3.6. Графічне зображення порівняння модуля пружності матеріалів

Таблиця 3.14

### Результати порівняння межі міцності матеріалів

Матеріал	Межа міцності (МПа)
МДФ	30
Шпон Дуба	105
HPL Cleaf	95
Алюміній	110

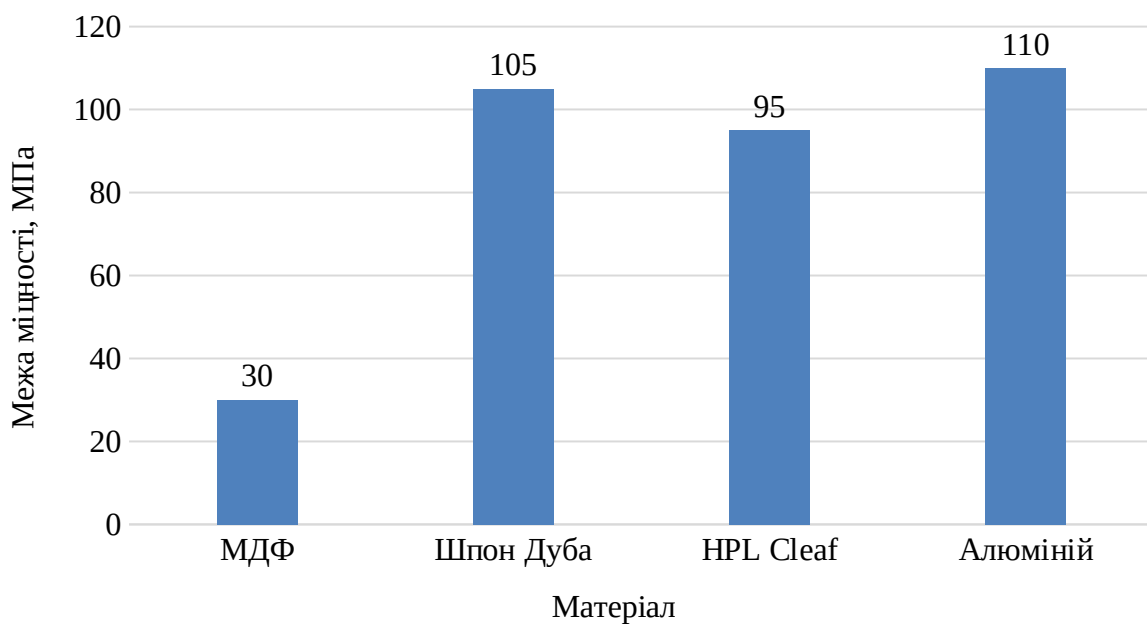


Рис. 3.7. Графічне зображення порівняння межі міцності матеріалів

Таблиця 3.15

### Результати порівняння межі міцності матеріалів та модуль пружності

Комбінація	Загальна товщина (мм)	$E_{eff}$ (ГПа)	Орієнтовна межа (МПа)
Шпон (1 mm) + MDF (18 mm)	20	5,53	52,7
HPL (0.9 mm) + MDF (18 mm)	19,8	5,61	44,4
Al (1 mm) + MDF (18 mm)	20	21,52	33,8

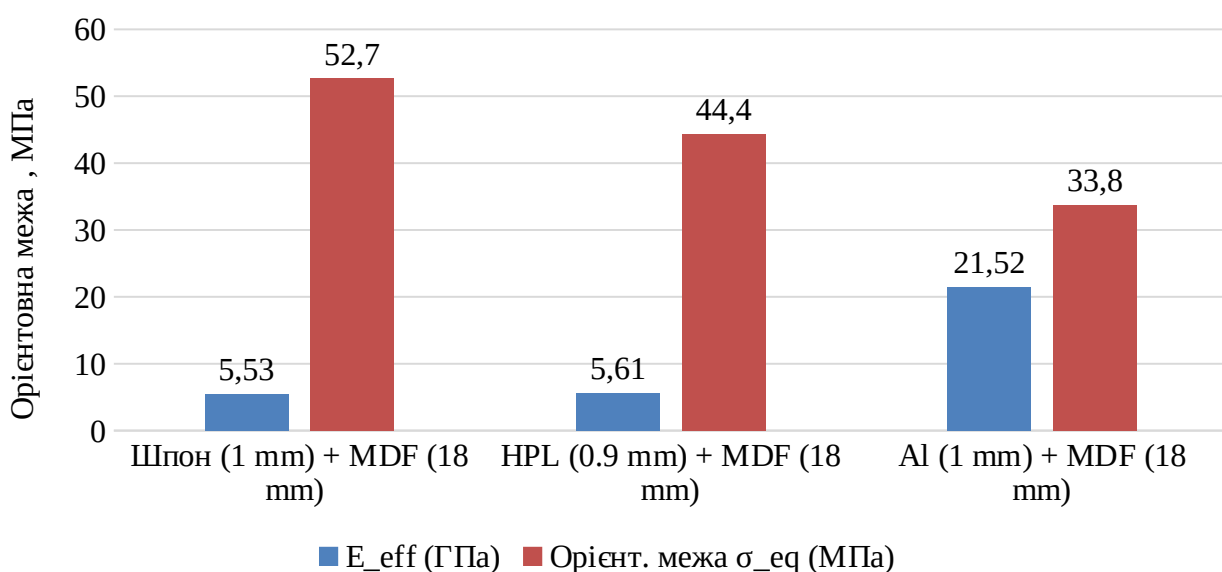


Рис. 3.8. Діаграма порівняння межі міцності та модулю потужності

Експериментальне дослідження, описане у Розділі 3, підтвердило критичну важливість правильного вибору клейової композиції та технологічного режиму пресування для надійності деревино композиційних матеріалів. Були визначені оптимальні режими для трьох систем личкування (Шпон/PVA, HPL/ПУР, Алюміній/STP), а подальші випробування показали, що комбінація МДФ + HPL Cleaf із ПУР-клеєм забезпечує найвищу міцність, а також найкращу стійкість до вологи та температури. Водночас, дослідження механічних характеристик матеріалів (особливо високої жорсткості Алюмінію та низької міцності основи МДФ) пояснило характер руйнування та підкреслило, що цілеспрямований вибір компонентів є запорукою довговічності кінцевого виробу.

## РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА ПРІОРИТЕТНИЙ ВИБІР ЛИЧКОВАНИХ  
З'ЄДНАНЬ НА ОСНОВІ МДФ

## 4.1. Аналіз особливостей з'єднань МДФ зі шпоном дуба, HPL Cleaf та алюмінієм

Надійність кінцевого виробу визначається не тільки міцністю клейової композиції, а й сукупністю фізико-механічних властивостей сформованого клейового з'єднання (шову) в поєднанні з унікальними характеристиками облицювального матеріалу. Для дослідження було обрано три контрастні типи личкувальних поверхонь, об'єднані спільною основою – МДФ. МДФ + Шпон Дуба (Натуральна поверхня): Шпон дуба – натуральний, пористий матеріал, що має волокна та схильний до змін розмірів під впливом вологості. Вимагає клеїв з високою адгезією до волокон деревини. З'єднання повинне бути достатньо міцним, але при цьому дозволяти мінімальні рухи деревини. Швидке початкове схоплювання, заповнення мікронерівностей, стійкість до циклічних змін вологості (D3/D4). Пріоритет клею – ПВА D3 або D4.

МДФ + HPL Cleaf (декоративний ламінат високого тиску): HPL Cleaf – непористий, твердий, високостійкий до стирання та хімічних впливів матеріал, що має значну внутрішню напругу. Virізняється глибокими та унікальними текстурами (імітація деревини, каменю). Через низьку пористість HPL, хімічна адгезія та властивості клею до компенсації напруги є критичними. Різниця в коефіцієнтах теплового розширення між HPL і МДФ може призвести до відшарування під дією високих температур (наприклад, у стільницях). Висока термостійкість, еластичність шва для компенсації напруги, висока водостійкість (D4). Пріоритет клею- ПУР D4.

МДФ + Алюміній (Непористий, металевий матеріал): Алюміній – абсолютно непористий, хімічно інертний матеріал з високим коефіцієнтом теплового розширення, значно відмінним від МДФ. З'єднання пориста основа –

метал, яка вимагає клею, що може забезпечити сильне механічне та хімічне зчеплення з обома поверхнями, а також має високу еластичність для поглинання різниці у деформаціях при зміні температури. Найвища термостійкість, максимальна еластичність, здатність до заповнення швів, водостійкість для зовнішніх робіт (D4). Пріоритет клею - STP D4.

#### 4.2. Результати досліджень та порівняння пріоритетних з'єднань

На основі експериментальних даних та теоретичного аналізу найвищий пріоритет для кожного типу поверхні було надано тим клейовим композиціям, які забезпечують максимальну довговічність та стабільність з'єднання в умовах, характерних для даної поверхні.

У ході експериментального дослідження було проведено комплексну оцінку трьох пріоритетних систем склеювання МДФ + Шпон (PVA 300), МДФ + HPL (PUR 501.0), МДФ + Алюміній (STP 605.0).

Аналіз виконували на основі показників міцності на зсув та розрив, а також залишкових характеристик після впливу вологи й температури наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

#### Порівняння та пріоритетність з'єднань МДФ з унікальними поверхнями

Тип личкувального з'єднання	Пріоритетний клейовий шов	Критичний виклик з'єднання	Критичний показник клею
МДФ + Шпон дуба	ПВА D3/D4	Компенсація руху деревини, вологість	Час пресування, водостійкість
МДФ + HPL Cleaf (стільніці, фасади)	ПУР D4	Термічне розширення, напруга HPL-плити	Термостійкість, еластичність
МДФ + Алюміній (елементи інтер'єру)	STP-полімер	Різниця теплових деформацій (МДФ/алюміній)	Еластичність, адгезія до металу

З аналізу результатів очевидним є те, що вибір клейової системи не може бути універсальним, а повинен чітко відповідати фізико-хімічним властивостям матеріалів, що з'єднуються, та специфіці їхньої майбутньої експлуатації. Наприклад, для з'єднання МДФ зі шпоном дуба пріоритетними є клеї ПВА класів D3/D4, які забезпечують необхідну міцність та вологостійкість. Це є критичним при врахуванні природного руху деревини та змін її об'єму під впливом вологи. Адекватний час пресування та висока водостійкість клею в цьому випадку є визначальними показниками для довговічності з'єднання. У випадку з'єднання МДФ з HPL-пластиком, що часто використовується для стільниць та фасадів, оптимальним вибором є поліуретанові клеї класу D4. Це зумовлено необхідністю компенсації термічного розширення та внутрішніх напруг HPL-плити, а також вимогою до високої термостійкості та еластичності клейового шва. Для інтеграції алюмінієвих елементів в інтер'єрі, де різниця в коефіцієнтах теплового розширення МДФ та металу є значною, застосування STP-полімерів є безальтернативним. Ці клеї забезпечують високу еластичність та адгезію до металу, що є життєво важливим для поглинання деформацій та запобігання відшаруванню.

#### 4.3. Рекомендації

Довговічність виробів на основі МДФ залежить від цілісності з'єднання, яке повинно компенсувати різницю у фізичних властивостях основи та личкувального матеріалу.

Для личкування шпоном дуба, де критичною є економічність та достатня водостійкість (D3/D4), оптимальними є ПВА-з'єднання. Вони забезпечують міцний та жорсткий шов, сумісний з натуральною деревиною.

Для унікальних високотехнологічних поверхонь, таких як HPL Cleaf та Алюміній, безумовним пріоритетом є ПУР-з'єднання (KleiBerit Pur501.0).

Низький модуль пружності ПУР-клеїв створює еластичний клейовий шов, що критично важливо для нейтралізації внутрішніх напружень в HPL (висока

термостійкість) та компенсації значної різниці у тепловому розширенні між МДФ та Алюмінієм, гарантуючи довговічність в екстремальних умовах експлуатації.

Таким чином, вибір типу клейового з'єднання є стратегічним проектним рішенням, що базується на комбінації матеріалів, де ПУР-з'єднання забезпечують надійний захист для високостійких та непористих поверхонь (HPL Cleaf, Алюміній), а ПВА-з'єднання є ефективним і економічним рішенням для натуральних поверхонь (шпон дуба).

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було досягнуто поставленої мети – досліджено та оцінено надійність різних типів клейових композицій, що використовуються у виробництві деревинно композиційних матеріалів (МДФ), а також розроблено науково обґрунтовані рекомендації щодо їх ефективного застосування для забезпечення довговічності личкованих виробів, ставлячи акцент на функціональних особливостях з'єднань.

Для досягнення мети було успішно вирішено всі поставлені завдання. Ключові висновки ґрунтуються на порівняльному аналізі трьох хімічно різних клейових з'єднань, обраних для трьох унікальних личкувальних поверхонь: ПВА D3/D4, ПУР D4 та STP-полімер.

Основні результати, з акцентом на типі з'єднання та його функції:

1. Проведено аналітичний огляд та вибір пріоритетних матеріалів (МДФ, Шпон Дуба, HPL Cleaf, Алюміній) та клейових систем. Встановлено, що довговічність виробу критично залежить від здатності клейового з'єднання компенсувати різницю у фізико-механічних властивостях основи та личкувального матеріалу.

2. Визначено функціональні області застосування кожного типу з'єднання.

- З'єднання на основі ПВА D3/D4 (наприклад, KleiBerit PVA 300, KleiBerit PVA 301) є Економічним та екологічним з'єднанням з достатньою адгезією до пористих матеріалів, яке формує жорсткий шов. Оптимальне для личкування Шпоном Дуба для внутрішніх приміщень (D3) або підвищеної вологості (D4).

- З'єднання на основі ПУР D4 (Поліуретановий, наприклад, KleiBerit Pur501.0) має високу термостійкість та формування еластичного клейового шову.. Пріоритетний вибір для HPL Cleaf (стільніці, фасади). Еластичність з'єднання ефективно нейтралізує внутрішні напруги HPL та компенсує різницю у

тепловому розширенні, запобігаючи відшаруванню при коливаннях температури.

- З'єднання на основі STP-полімеру (наприклад, KleiVerit 605.0) є має максимальну еластичність, високу адгезію до інертних матеріалів та здатність до заповнення швів. Спеціалізований вибір для алюмінію та інших металів. Це з'єднання є необхідним для компенсації найбільшої різниці у коефіцієнтах теплового розширення між МДФ та металом, забезпечуючи надійність в екстремальних умовах.

Проведене дослідження показало, що найвищу міцність та стабільність має з'єднання МДФ + НРЛ з використанням ПУР-клею KleiVerit 501.0. Таке з'єднання показало міцність на зсув 13,8 МПа та 2,5 МПа на розрив, а також мінімальне зниження міцності після вологи – 5,1 % та температури – 2,2 %.

З'єднання МДФ + Алюміній + STP 605.0 показало сталу високу міцність – 12,1 МПа на зсув, а також задовільну стійкість до сторонніх впливів (температури та вологи).

Найменш стійким виявилось з'єднання Шпон + PVA 300, яке хоч і забезпечує міцність на зсув в межах 11,5 МПа, проте втрачає до 20 % міцності після вологи, що обмежує його застосування у складних умовах експлуатації.

3. Наукова новизна результатів полягає у систематизації даних та доведенні, що для технологічних, непористих і високостійких поверхонь (НРЛ, Алюміній) необхідно використовувати спеціалізовані хімічні класи клеїв (ПУР, STP-полімер), які забезпечують еластичність та термостійкість з'єднання, що є ключовим показником довговічності.

У роботі доведено, що ключовим критерієм вибору є не назва клею, а функціональні властивості клейового з'єднання – еластичність та термостійкість, які мають бути підібрані відповідно до унікальних властивостей личкувальної поверхні. Використання STP-полімерів для металів та ПУР-клеїв для НРЛ є науково обґрунтованою необхідністю для досягнення високої якості та довговічності продукції.

В результаті експериментальних досліджень було визначено, що правильний вибір клейової композиції та режиму пресування є критичним для надійності кінцевого виробу, а саме HPL + PUR (KleiBerit Pur501.0): Забезпечує найбільш міцне та надійне з'єднання, демонструючи найвищі показники міцності та найкращу стійкість до вологи та температури. Алюміній + STP (KleiBerit 605.0) продемонструвало високу міцність та чудову стійкість, що є оптимальним для склеювання металу з МДФ за рахунок високої адгезії та еластичності STP-клею. Шпон + PVA (KleiBerit PVA 300) може забезпечувати дуже високу міцність на зсув, але є найменш стійким до вологового впливу серед досліджених зразків, що обмежує його використання у вологих середовищах.

Тож, відповідно до проведених досліджень можна зробити висновок, що найкращим рішенням щодо вибору клейового компоненту є ПУР-з'єднання, яке забезпечує надійний захист для високостійких та непористих поверхонь (HPL Cleaf, Алюміній), а от ПВА-з'єднання є ефективним і економічним рішенням для натуральних поверхонь (Шпон дуба).

Дослідження дозволило розробити науково обґрунтовані рекомендації, які забезпечують фахівців надійним технічним інструментарієм для реалізації найвимогливіших дизайнерських рішень на основі МДФ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мех Т. Використання деревини у внутрішньому просторі будинків. У: Матеріали конференції. Київ, 2019. 4 с.
2. Nassef O.A., Hassanin H. Analysis of particleboard production. *Energy*. 2021. Vol. 234. Article 121208.
3. Яворський Р., Ковалюк Т. Особливості виготовлення фанери. Наукові праці НЛТУ України. 2020. №30(4). С. 125–130.
4. Що таке МДФ? Виробництво та застосування. *Новий Стиль*: веб-сайт. URL: <https://noviy-style.kiev.ua/ua/content/66-chto-takoe-mdf> (дата звернення: 10.11.2025).
5. Що таке пластик HPL. *Oscar Group*: веб-сайт. URL: <https://oscar-group.com.ua/ua/shho-take-hpl-paneli/> (дата звернення: 10.11.2025).
6. Борисенко О. Будова і фізико-механічні властивості деревини карієї серцеподібної. Лісове господарство і деревоознавство. 2017. №4. С. 21–27.
7. Sytnyk S., Koval V. The investigation of physical and mechanical properties of wood particleboards. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2019. №29(6). С. 152–159.
8. Автори невідомі. Дослідження механічних властивостей фанери. У: Тези доповідей наукової конференції НУЦЗУ. Харків, 2020. С. 162.
9. Мельник В., Трофімчук О. Методика оцінки довговічності деревоволокнистих плит середньої щільності (MDF). *Український журнал лісового та деревинного господарства*. 2023. №238. С. 215–223.
10. Гринько М., Стеценко А. Властивості личкованих деревинно-полімерних матеріалів. *Наукові праці НППЛУ*. 2016. №14. С. 41–47.
11. Гомон С. Результати експериментальних досліджень деревини під впливом різних середовищ. У: *Матеріали МНПК "Новітні технології"*. Тернопіль, 2021. С. 11–12.
12. Кравець Л. Відповідність якості та безпечності ДСП за різних умов експлуатації. *Будівництво та архітектура*. 2020. №3. С. 55–60.

13. Бобровник О. Фізичні закономірності впливу параметрів середовища на процес сушіння пиломатеріалів. *Наукові праці НЛТУ України*. 2019. №29(2). С. 50–58.
14. Автор невказаний. Практичні рекомендації щодо прогнозування довговічності плит MDF. У: *Матеріали конференції ЧНТУ*. Чернігів, 2020. С. 214–215.
15. Що таке ДСП. *Shafa-kupe*: веб-сайт. URL: <https://shafa-kupe.lviv.ua/clauses/115/> (дата звернення: 15.11.2025).
16. Фанера: види та застосування. *Baykal*: веб-сайт. URL: <https://baykal.com.ua/ua/a430233-chto-takoe-fanera.html> (дата звернення: 10.11.2025).
17. Профілі MDF. *Market-dveri*: веб-сайт. URL: <https://market-dveri.ua/uk/chto-takoe-mdf-11/> (дата звернення: 12.11.2025).
18. HPL Genfasad. *Genfasad*: веб-сайт. URL: <https://genfasad.com.ua/high-pressure-laminate/> (дата звернення: 10.11.2025).
19. Деревина дуба: переваги та використання. *Vinbazar*: веб-сайт. URL: <https://vinbazar.com/journal/nshe/derevina-duba-perevagi-ta-vikoristannya> (дата звернення: 10.11.2025).
20. Застосування HPL панелей. *Viyar*: веб-сайт. URL: [https://viyar.ua/ua/articles/interri\\_iz\\_zastosuvannyam\\_hpl\\_paneley/](https://viyar.ua/ua/articles/interri_iz_zastosuvannyam_hpl_paneley/) (дата звернення: 10.11.2025).
21. Пінчевська О.О., Головач В.М. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Інноваційні технології з оброблення деревини». Київ: НУБіП України, 2021. 48 с.
22. Технічне підготування виробництва корпусних меблів. *ЧНТУ: електронний репозитарій*. URL: <http://ir2.stu.cn.ua/handle/123456789/25292> (дата звернення: 20.11.2025).
23. Wong E.D. Particleboard and MDF for shelving. *Cabinetmaking and Millwork*. New York: McGraw-Hill, 2005. P. 205–220.

24. Hodousek L., Babiak M., Sedivy P. Effect of moisture content on the air permeability of oriented strand boards. *BioResources*. 2018. Vol. 13(3). P. 4856–4869.
25. Hanhija S. Effect of moisture and mechanical loading on wooden materials. *Wood Science and Technology*. 1994. Vol. 28. P. 85–97.
26. Mori K., Nakao T. Ductile behavior of timber structures under strong dynamic loads. *Dynamic Behavior of Timber Structures*. Berlin: Springer, 2018. P. 173–195.
27. Wu Q., Suchsland O., Maloney T. Effect of two relative humidity environments on the performance properties of MDF, OSB and chipboard. *Wood Science and Technology*. 2001. Vol. 35. P. 1–16.
28. Thybring E.E., Fredriksson M. Wood elasticity and compressible wood-based materials. *Progress in Polymer Science*. 2024. Vol. 150. Article 101743.
29. Kelsey K.E. Effect of moisture changes on creep in wood. *Nature*. 1960. Vol. 185. P. 862–863.
30. Fernandes A.N., Thomas L.H. Molecular deformation mechanisms of the wood cell wall material. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2014. Vol. 66. P. 180–188.
31. Fernandes A.N., Thomas L.H. Molecular deformation mechanisms of the wood cell wall material. Перевидано у: *Наукові праці ВЛП*. Львів, 2014. С. 10–14.
32. Марченко В. Визначення основних механічних властивостей деревини. Навчальний посібник. Київ: НУБіП, 2015. 20 с.
33. Луценко С., Герасименко О. Експериментально-статистичні дослідження модуля пружності деревини. *Ресурсозбереження та механіка конструкцій*. 2018. №36. С. 95–100.
34. Національний стандарт України ДСТУ EN 310:2003. Визначення модуля пружності та границі міцності під час згинання. Чинний від 01.10.2004.
35. Автор невказаний. Особливості довговічності деревинних матеріалів. *Матеріали конференції ТНТУ*. Тернопіль, 2021. 2 с.
36. Сайчук І. Деформування деревини під дією повторних статичних навантажень. *Вісник ХТТІ*. 2022. №4. С. 115–122.

37. Костюк О. Визначення реологічних властивостей деревини залежно від зміни температури і вологості. *Проблеми трибології*. 2020. №3. С. 75–82.
38. Kasal B., Tannert T. Wood-based composites: behavior under combined moisture and mechanical loads. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. Vol. 23, No. 9. P. 1310–1318.
39. Bodig J., Jayne B.A. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982. 712 p.
40. Сидоренко О., Харченко В. Пружні властивості деревини та методи їх визначення. Навчально-методичні матеріали. Київ: КНУБА, 2017. 25 с.
41. Moya R., Muñoz F. Physico-mechanical properties of moisture-conditioned tropical woods. *Wood Material Science and Engineering*. 2013. Vol. 8, No. 1. P. 15–24.
42. Shupe T.F., Choong E.T., Gibson M.A. Wetting, sorption and shrinkage in wood. *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 6. Article 1422.
43. Elasticity: how materials deform under load. *ScienceDirect Topics* : веб-сайт. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/elasticity-of-materials> (дата звернення: 01.11.2025).
44. Equilibrium moisture content of wood. *The Wood Database* : веб-сайт. URL: <https://www.wood-database.com/wood-articles/equilibrium-moisture-content> (дата звернення: 23.11.2025).
45. Сайчук І. Деформування деревини під дією повторних статичних навантажень. *Вісник ХТТІ*. 2022. №4. С. 115–122.
46. Moisture and wood movement. *WoodWorks Technical Library* : веб-сайт. URL: <https://www.woodworks.org/technical/moisture-and-wood-movement> (дата звернення: 12.10.2025).
47. Frühwald E. Effect of moisture on the mechanical behavior of wood under compression. *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. P. 155–162.
48. Павленко Д. Деформаційні характеристики деревини за умов циклічної вологості. *Матеріали III Міжнародної конференції з механіки матеріалів*. Львів, 2019. С. 112–115.

49. Humidity effects on wood strength. *Engineering Toolbox* : веб-сайт.  
URL: <https://www.engineeringtoolbox.com/wood-humidity-strength> (дата  
звернення: 23.10.2025).
50. Fridley K.J., Tang R. Creep behavior of structural timber elements.  
*Journal of Structural Engineering*. 2003. Vol. 129, No. 9. P. 1204–1212.