

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій і дизайну


Кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів,
целюлози та паперу

Пояснювальна записка

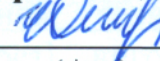
до дипломної роботи магістра на тему:

“Аналіз матеріалів для армування фанери”

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


(підпис) Пришляк Н.В.

Керівник: доц. каф. ТДКМ, к.т.н.


(підпис) Бринь О.І.

Рецензент: доц. каф. ТЗМСДБЖД
(посада, вчене звання, науковий ступінь)


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

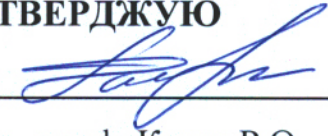
Львів – 2025

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
Освітня програма Технології деревинних композиційних матеріалів і модифікування деревини

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри 

д.т.н., проф. Козак Р.О.

“ 22 ”  2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Пришляку Назарію Васильовичу

1. Тема роботи Аналіз матеріалів для армування фанери

керівник роботи доц. кафедри ТДКМ Бринь Олеся Ігорівна, к.т.н.,
затверджені наказом університету від “ 22 ” жовтня 2024 року № С-846

2. Термін подання студентом роботи 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Визначити сутність фанери як матеріалу, проаналізувати її структурні обмеження та обґрунтувати необхідність армування. Класифікувати матеріали, що використовуються для армування фанери, та оцінити їхній вплив на покращення фізико-механічних властивостей. Проаналізувати технологічні особливості виготовлення армованої фанери. Проаналізувати в'язучі речовини, які використовуються при виготовленні армованої фанери. Оцінити ключові фізико-механічні властивості одержаної армованої фанери.

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

Вступ

1. Загальні відомості

2. Матеріали для армування фанери

3. Технологічні особливості виготовлення армованої фанери

Висновки

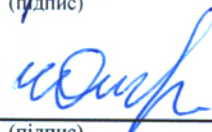
5. Дата видачі завдання 25.07.2025 р.

Студент


(підпис)

Пришляк Н.В.

Керівник роботи


(підпис)

Бринь О.І.

АНОТАЦІЯ

Метою даної магістерської роботи є комплексний аналіз матеріалів для армування фанери з метою покращення її властивостей та розширення сфер застосування.

У роботі розглянуто фанеру як багат шаровий деревинний композиційний матеріал, наведено її основні властивості та класифікацію відповідно до чинних нормативних документів. Обґрунтовано доцільність армування як ефективного способу покращення фізико-механічних характеристик фанери. Армування забезпечує перерозподіл напружень у матеріалі, підвищує міцність, жорсткість і тріщиностійкість, а також розширює сфери її застосування. Проаналізовано та класифіковано матеріали, що застосовуються для армування фанери, за походженням, формою введення та функціональним призначенням. Показано, що використання армувальних матеріалів є ефективним способом підвищення міцності, жорсткості, зносостійкості та довговічності фанери.

Встановлено, що синтетичні та мінеральні волокна (скловолокно, базальтове, вуглецеве, арамідне) забезпечують найбільше покращення механічних властивостей, тоді як металеві сітки переважно виконують захисну функцію. Натуральні рослинні волокна (льон, коноплі, бамбук, кенаф, джут) є екологічною альтернативою, проте потребують додаткової обробки через високу гігроскопічність.

Зроблено висновок, що вибір армувального матеріалу та способу його введення повинен здійснюватися з урахуванням умов експлуатації та вимог до властивостей армованої фанери, що є основою для подальших експериментальних досліджень.

Магістерська робота складається з пояснювальної записки, яка викладена на 70 сторінках, містить 20 рисунків та 8 таблиць.

Ключові слова: фанера, армована фанера, армувальні матеріали, властивості фанери.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	7
1.1. Фанера. Загальна інформація	7
1.2. Армування фанери як спосіб покращення її властивостей...	9
1.3. Застосування армованої фанери.....	12
1.4. Висновок.....	15
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АРМУВАННЯ ФАНЕРИ.....	16
2.1. Класифікація матеріалів для армування фанери.....	16
2.2. Характеристика основних матеріалів, які можуть використовуватися для армування фанери.....	18
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ АРМОВАНОЇ ФАНЕРИ.....	41
3.1. Особливості армування фанери та його вплив на властивості фанери.....	41
3.2. Використання клеїв в процесі виготовлення армованої фанери.....	56
3.3. Висновок.....	63
ВИСНОВКИ.....	65
ЛІТЕРАТУРА.....	66

ВСТУП

Фанера – це шарувата клеєна деревина, яка складається із склеєних між собою трьох і більше листів луценого шпону, причому напрямок деревних волокон в суміжних шарах є взаємно перпендикулярним. Це важливий будівельний матеріал, який має широкий спектр застосування. Окрім традиційного застосування поряд з деревиною, такого як меблі та будівництво, фанера також знаходить широке застосування в галузях, які виграють від її унікального поєднання міцності, легкої ваги та низького коефіцієнта теплового розширення, зокрема як будівельний матеріал, як матеріал для вантажних автомобілів та резервуарів для зрідженого природного газу (ЗПГ) для газозовів. Попит на фанеру зростає, а альтернатив з точки зору характеристик матеріалів та вартості, щоб ефективно конкурувати з фанерою, немає, тому зростає потреба в якісній деревній сировині. З точки зору сучасних тенденцій «зелених» пріоритетів, фанера та інші композити на основі деревини є зразком ресурсоефективності, але все ж вони мають потенціал для подальшого покращення в цій категорії завдяки армуванню. Оскільки використання міцнішого і жорсткішого матеріалу із меншою вагою, сприятиме покращенню значення «оцінки життєвого циклу», збільшуючи міцність матеріалу, його стійкість та довговічність.

Фанеру можна додатково зміцнити за допомогою армування, яке розміщують між шарами. Армована фанера пропонує рішення, інтегруючи волокна для підвищення фізико-механічних властивостей та запобігання передчасному руйнуванню [1]. Наукова новизна даної роботи полягає в систематизації та аналізі матеріалів та підходів до армування, вивченні впливу різних клейових систем (термореактивних, термопластичних та модифікованих) та технологічних режимів пресування на ключові фізико-механічні характеристики фанери.

На сьогоднішній день існує величезна кількість видів волокон, промисловість створює нові матеріали, використовуються різні схеми розташування армування. Усе це вимагає вивчення та систематизації наявної

інформації в галузі виготовлення армованої фанери, як будівельного матеріалу, щоб краще зрозуміти потенційні переваги у її застосуванні, механічних властивостей фанери та економії сировини.

Мета роботи – комплексний аналіз матеріалів для армування фанери з метою покращення її властивостей та розширення сфер застосування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Визначити сутність фанери як матеріалу, проаналізувати її структурні обмеження та обґрунтувати необхідність армування.
2. Класифікувати матеріали, що використовуються для армування фанери, та оцінити їхній вплив на покращення фізико-механічних властивостей.
3. Проаналізувати технологічні особливості виготовлення армованої фанери.
4. Проаналізувати в'язучі речовини, які використовуються при виготовленні армованої фанери.
5. Оцінити ключові фізико-механічні властивості одержаної армованої фанери.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1. Фанера. Загальна інформація

Фанера є одним із найстаріших композиційних матеріалів на основі деревини, яка має шарувату структуру. Вона була розроблена для усунення недоліків масивної деревини, таких як анізотропія, біоруйнування та обмеження розмірів.

Фанера – це шарувата клеєна деревина, яка складається з склеєних між собою трьох і більше листів луценого шпону з взаємно перпендикулярним розташуванням волокон деревини в суміжних шарах. Фанера має кращі показники міцності, ніж вихідний матеріал.

Фанера, універсальний та цінний деревинний композиційний матеріал, який характеризується широким спектром механічних параметрів, які визначають її експлуатаційні властивості та придатність для різних сфер застосування. Фанера з твердих порід деревини широко використовується у різних галузях промисловості, бо саме порода деревини суттєво впливає на її властивості.

Породи береза та бук достатньо вивчені щодо їх економічних та технологічних властивостей у виробництві фанери [2]. Ці породи поширені в Європі та скандинавських країнах завдяки своїм характеристикам. Загалом, міцність і жорсткість фанери в поєднанні з її стійкістю та стабільністю розмірів роблять її незамінним матеріалом у будівництві, у порівнянні з найміцнішими альтернативами, такими як сталь. Крім того, порівняно зі сталевими листами, фанера вважається більш екологічною та економічно ефективнішою [3]. Порівняно з іншими деревинними матеріалами, фанера володіє кращими властивостями, будучи відносно однорідною за своїми властивостями міцності та жорсткості. Тобто навіть найнижчі властивості міцності та жорсткості фанери конкурентоспроможні з більшістю конструкційної деревини м'яких порід в поздовжньому (найміцнішому) напрямку. Крім того, вона характеризується стабільністю механічних властивостей у порівнянні з пиломатеріалами [3].

Відповідно до ДСТУ EN 313-1:2003 [4] (Фанера. Класифікація та термінологія) фанеру класифікують за критеріями поданими у табл.1.1.

Таблиця 1.1.

Класифікація фанери

Критерій	Вид
1. За загальним виглядом	
1.1. За структурою:	а) облицьована фанера; б) плити із серцевиною з масивної деревини: - блокові плити; - ламіновані плити; с) комбінована фанера.
1.2. За видом:	а) плоска; б) профільована.
2. За основними властивостями	
2.1. За стійкістю:	а) для зовнішнього використання, без покриття; б) для зовнішнього використання, з покриттям; с) для використання в сухих приміщеннях.
2.2. За механічними властивостями	
2.3. За виглядом поверхні	
2.4. За станом поверхні:	а) нешліфовані плити; б) шліфовані плити; с) ґрунтовані плити; д) плити з покриттям (декоративним шпоном, плівкою, просоченим папером).
3. За вимогами споживача	

1.2. Армування фанери як спосіб покращення її властивостей

Фанера є важливим багатошаровим матеріалом, що широко застосовується у будівництві, транспорті та меблевій промисловості, зокрема, завдяки високій міцності та стабільності розмірів. Проте, як деревинний композит, вона має низку обмежень, пов'язаних із природною анізотропією деревини та наявністю структурних дефектів (сучків, тріщин) у луценому шпоні. Ці дефекти стають концентраторами напружень, що знижує загальну структурну цілісність і довговічність матеріалу, особливо під високими статичними або циклічними навантаженнями.

Фанеру можна додатково зміцнити за допомогою армування, яке розміщують між шарами. Технологічно таке просте та економічно ефективне рішення широко використовується в багатьох традиційних матеріалах, таких як бетон, пластмаси тощо. Армована фанера пропонує рішення, інтегруючи волокна для підвищення фізико-механічних властивостей та запобігання передчасному руйнуванню.

Волокна технічно визначаються як витягнутий об'єкт із співвідношенням довжини до діаметра більше одиниці. Волокна можуть бути вбудовані безперервно або переривчасто всередину матриці, де їх можна орієнтувати або хаотично розміщувати. Волокна високої якості характеризуються малим діаметром, високою гнучкістю та високим співвідношенням довжини до діаметра.

Волокна, які використовуються для армування, можна поділити на два основні класи за походженням: синтетичні та натуральні волокна.

Матеріали, армовані натуральними волокнами, пропонуються як новий клас матеріалів і називаються композитами з натуральним волокном. Вони характеризуються легкістю та зниженим негативним впливом на довкілля. Натуральні волокна поділяються за походженням на рослинні, тваринні та мінеральні волокна.

Такі матеріали для армування, як скло, вуглець або базальт, які розташовані на поверхні деревинних плит, мають кілька серйозних недоліків: по-перше, високе енергоспоживання під час виробництва, по-друге, необхідність спеціальних столярних інструментів для подальшої обробки, і по-третє — обмежену кількість відповідних обробок поверхні, що звужує спектр застосування. Тканини з лігноцелюлозних волокон, такі як льон або целюлоза, можуть використовуватися як армування без цих недоліків.

Армування фанери полягає у введенні до її структури високоміцних волокон або волокнистих матеріалів, які сприймають частину зовнішніх навантажень і забезпечують перерозподіл напружень у композиті. В результаті формується багатоконпонентний матеріал, у якому деревинна складова та армувальний елемент працюють спільно, доповнюючи властивості один одного. Такий підхід дозволяє цілеспрямовано регулювати механічні характеристики фанери відповідно до умов експлуатації.

Залежно від конструктивного рішення армування може здійснюватися різними способами: шляхом розміщення волокон між шарами шпону, введення армувальних прошарків у зовнішні або внутрішні шари фанери, нанесення волокнистих матеріалів на поверхню плити або локального армування найбільш навантажених зон. Особливе значення має орієнтація волокон, оскільки їх розташування відносно напрямку прикладання навантаження істотно впливає на ефективність армування. Найвищий приріст міцності зазвичай досягається при орієнтації волокон уздовж напрямку головних напружень.

Для армування фанери використовують волокна різного походження: природні, синтетичні та мінеральні. Природні рослинні волокна (лляні, конопляні, целюлозні) привабливі з точки зору екологічності та відновлюваності ресурсів, однак характеризуються обмеженою вологостійкістю та варіабельністю властивостей. Синтетичні волокна (поліамідні, поліефірні, арамідні) забезпечують підвищену міцність і зносостійкість, але мають вищу вартість та меншу екологічну привабливість. Найбільшого поширення в

армуванні фанери набули мінеральні волокна, зокрема скляні, базальтові та вуглецеві, які вирізняються високими показниками міцності, модуля пружності та стабільністю властивостей.

Ефективність армування значною мірою визначається характером взаємодії між волокнами та деревинною матрицею. Надійне зчеплення армувального матеріалу зі шпоном забезпечується вибором відповідного клею, найчастіше на основі фенолформальдегідних або поліуретанових (ізоціанатних) смол. Якісна адгезія сприяє ефективній передачі напружень від матриці до волокон і запобігає їх висмикуванню або розшаруванню фанери під навантаженням.

Армування фанери дозволяє суттєво підвищити її основні експлуатаційні характеристики. Зокрема, спостерігається зростання міцності при згині та розтягу, підвищення модуля пружності, зменшення повзучості та покращення тріщиностійкості. Крім того, армована фанера демонструє підвищену стійкість до циклічних навантажень і ударних впливів, що є особливо важливим для конструкційного та транспортного застосування. У ряді випадків армування також сприяє зниженню анізотропії властивостей фанери та підвищенню стабільності її геометричних розмірів.

На сьогоднішній день армування фанери не є недавнім відкриттям, але воно не отримало широкого застосування у фанерній промисловості, оскільки не забезпечує необхідного співвідношення вигоди та вартості. Виробники б впроваджували армування, якби його можна було легко інтегрувати в існуючі виробничі лінії економічно ефективним способом, і це б забезпечило прибутковість. Однак з іншого боку, якщо для армування використати недорогі матеріали, то окрім збільшення міцності буде забезпечуватися економія деревинної сировини, що сприятиме зниженню витрат на такий вид фанери [1].

Таким чином, армування фанери є перспективним та ефективним способом покращення її властивостей, що дозволяє розширити сфери застосування цього матеріалу та підвищити його конкурентоспроможність. Поєднання традиційних

деревинних матеріалів із сучасними армувальними волокнами відкриває можливість створення нових видів високоефективних композиційних матеріалів із заданими експлуатаційними характеристиками, що відповідають сучасним вимогам будівельної та промислової практики.

1.3. Застосування армованої фанери

Армована фанера – це композиційний матеріал на основі деревини, який отримують шляхом склеювання шарів деревного шпону з розміщенням між ними одного або кількох шарів високоміцного армувального матеріалу. Вона є покращеною версією звичайної фанери, в якій армувальний наповнювач (зазвичай, у вигляді сіток, волокон, тканин або полотна) покращує її фізико-механічних властивості та компенсує недоліки деревини, головним чином, її анізотропію та низьку міцність на вигин і розтяг [5 – 7].

Армована фанера використовується у галузях, де потрібні висока міцність та довговічність. Вона застосовується для будівельних конструкцій, меблів, настилів, а також у нішових сферах, таких як транспорт та спортивне обладнання. Наприклад, фанера, армована вуглецевим волокном, може використовуватись для опалубки.

У *будівельній галузі* армовану фанеру використовують як конструкційний і облицювальний матеріал. Завдяки підвищеній міцності при згині та жорсткості вона ефективно застосовується для виготовлення опалубки багаторазового використання, настилів перекриттів, підлогових систем, стінових панелей і покрівельних елементів. Армування дозволяє зменшити товщину плит без втрати несучої здатності, що сприяє зниженню маси конструкцій і полегшенню монтажу. У сучасній *архітектурі* армована фанера також використовується в легких каркасних та модульних будівлях, де важливими є поєднання міцності, стабільності розмірів і екологічності [6, 8].

У несучих конструкціях, *як будівельний матеріал*, використання фанери є найефективнішим у місцях, де потрібна висока міцність у площині. Фанера

також використовується для облицювання, забезпечуючи необхідну жорсткість та міцність. Суттєвим обмеженням використання фанери є вигинання плити в зоні стиснення; вирішенням цього є збільшення товщини плити або додавання внутрішніх ребер для зменшення можливої площі вигину. У роботі [3] показано, що при навантаженні фанери під кутом до волокон міцність на стиск і розтяг значно знижується. Тому армування фанери діагональним армуванням створить можливість збільшити міцність у діагональному напрямку волокон і таким чином використовувати матеріал більш оптимально.

Ще одним важливим місцем є з'єднання між площиною матеріалу та рамою. Якщо кріплення має невелику відстань від краю, може виникнути ризик його відриву, особливо у випадку з'єднання зі сталевим каркасом. Локальне волокнисте армування зменшить цей ризик, розподілить концентрацію напружень та додатково збільшить міцність кріплення у з'єднанні. Це дозволить одержати з'єднання з вищою несучою здатністю. Автори досліджували показники міцності на зсув перехресно-клеєних з'єднань та виявили, що використання фанери, армованої скловолокном, сприяє збільшенню показників міцності [9].

У *транспортній галузі* армована фанера застосовується у виробництві елементів внутрішнього оздоблення та несучих конструкцій транспортних засобів. Зокрема, її використовують для виготовлення підлог, перегородок, бокових панелей і дахових елементів у вагонах залізничного транспорту, автобусах, вантажних автомобілях і контейнерах. Підвищена стійкість до динамічних та циклічних навантажень, а також до вібрації робить армовану фанеру придатною для умов інтенсивної експлуатації [5, 6, 10].

У *суднобудуванні* армована фанера використовується для виготовлення палубних настилів, перегородок, елементів корпусів маломірних суден, катерів і яхт. Завдяки армуванню та застосуванню вологостійких клеїв матеріал характеризується підвищеною вологостійкістю, біостійкістю та стабільністю геометричних параметрів, що є критично важливим в умовах постійного контакту з водою та змінних кліматичних факторів [6 – 8].

У *меблевому виробництві* армовану фанеру застосовують для виготовлення елементів, що зазнають підвищених навантажень: несучих каркасів, сидінь, спинок, стільниць і полиць. Армування дозволяє підвищити несучу здатність тонких плит і забезпечити довговічність меблів при інтенсивному використанні. Крім того, матеріал знаходить застосування в інтер'єрних рішеннях, де поєднуються конструкційна функція та декоративні властивості [5, 11, 12].

Армована фанера має також *промислове та спеціальне призначення*. Вона використовується у промисловості для виготовлення тари, пакувальних матеріалів, піддонів і платформ, призначених для транспортування важких або негабаритних вантажів. У таких умовах важливими є висока ударна в'язкість, стійкість до деформацій і багаторазового використання. Окремим напрямом є застосування армованої фанери в спеціальних конструкціях, зокрема захисних панелях, тимчасових спорудах та інженерних огорожах [6, 7, 10].

У *авіаційній промисловості та спортивній* індустрії армована фанера застосовується для виготовлення легких і міцних конструкцій, де вирішальне значення мають співвідношення міцності до маси та жорсткість матеріалу. Прикладами є елементи спортивного обладнання, тренажерів, сценічних конструкцій і тимчасових платформ. У цих галузях армування дозволяє досягти необхідних експлуатаційних характеристик за мінімальної маси матеріалу [5, 7, 12].

Перспективні напрями застосування

З розвитком технологій композиційних матеріалів зростає інтерес до використання армованої фанери у високотехнологічних та екологічно орієнтованих напрямках. Перспективними є застосування в модульному будівництві, енергоефективних будівлях, а також у виробництві конструкцій з підвищеними вимогами до міцності та довговічності. Поєднання відновлюваної деревинної сировини з сучасними армувальними матеріалами відповідає тенденціям сталого розвитку та ресурсоефективності [6, 7, 11].

1.4. Висновок

Розглянуто фанеру як багатошаровий деревинний композиційний матеріал, наведено її основні властивості та класифікацію відповідно до чинних нормативних документів. Встановлено, що, попри свої переваги, фанера має обмеження, зумовлені анізотропією деревини та наявністю дефектів у шпоні, що знижує її довговічність при навантаженнях.

Обґрунтовано доцільність армування як ефективного способу покращення фізико-механічних властивостей фанери. Армування забезпечує перерозподіл напружень у матеріалі, підвищує міцність, жорсткість і тріщиностійкість, а також розширює сфери її застосування. Проаналізовано сфери застосування армованої фанери.

Отже, використання армувальних матеріалів у виробництві фанери є перспективним напрямом удосконалення її властивостей. Це створює передумови для докладнішого аналізу матеріалів для армування фанери.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АРМУВАННЯ ФАНЕРИ

2.1. Класифікація матеріалів для армування фанери

Волокна технічно визначаються як витягнутий об'єкт із співвідношенням довжини до діаметра більше одиниці. Волокна високої якості характеризуються малим діаметром, високою гнучкістю та високим співвідношенням довжини до діаметра.

Волокна, які використовуються для армування, можна поділити на два основні класи за походженням: синтетичні та натуральні волокна. Натуральні волокна поділяються за походженням на рослинні, тваринні та мінеральні волокна.

Матеріали для армування фанери можна класифікувати за такими критеріями:

За походженням (хімічним складом)

Ця класифікація визначає основні механічні, термічні та хімічні властивості армувального волокна.

Мінеральні (неорганічні) волокна. Це найпоширеніша група, яка забезпечує найбільше зростання міцності та жорсткості.

- **Скловолокно:** Найбільш економічно виправданий варіант. Має високу міцність на розрив і хороший модуль пружності. Широко використовується у вигляді склотканин і склокилими.
- **Базальтове волокно:** Виготовляється з гірських порід. Перевершує скловолокно за термостійкістю та хімічною стійкістю. Ідеальне для фанери з підвищеними вимогами до вогнестійкості.
- **Вуглецеве волокно:** Високоміцний матеріал. Забезпечує найвищу міцність і жорсткість при мінімальній вазі. Використовується у високотехнологічних і дорогих виробках.

Органічні волокна. Ці матеріали відрізняються низькою густиною та високою ударною в'язкістю.

- **Арамідні волокна (наприклад, кевлар):** Мають виняткову ударну в'язкість та опір пробиванню. Застосовуються для виготовлення ударостійких панелей.
- **Натуральні волокна (льон, джут, кенаф):** Екологічна альтернатива. Забезпечують базове підвищення жорсткості.

Металеві матеріали. Використовуються переважно для зовнішнього захисту.

- **Металеві сітки (сталеві, алюмінієві):** Забезпечують високу стійкість до стирання та опір локальним ударам. Використовуються у зовнішніх шарах транспортної фанери.

За формою введення (структурою)

Форма, в якій матеріал вводиться у фанерний пакет, визначає орієнтацію волокон і, відповідно, характер покращення властивостей.

- **Тканини:** Волокна переплетені у вигляді сітки з чіткою орієнтацією (0°/90°). Забезпечують максимальне підвищення міцності у площині армування.
- **Килими:** Хаотично розташовані або прошиті короткі волокна (наприклад, склокилим). Забезпечують рівномірне (ізотропне) підвищення міцності у площині.
- **Сітки:** Структура з більшим кроком. Використовуються для контролю розтріскування і підвищення стійкості на зсув.
- **Волокна:** Короткі волокна, які додаються безпосередньо у клейову композицію. Забезпечують гомогенне, але невелике підвищення міцності.

За функціональним призначенням у фанері

- **Конструкційне армування:** Розміщується для сприйняття основних робочих навантажень (розтягу, вигину). Зазвичай це високоміцні тканини (скло, вуглець), розташовані ближче до зовнішніх шарів.
- **Захисне армування:** Націлене на захист від зовнішніх впливів, таких як стирання або пробивання. Зазвичай це металеві або скловолоконні сітки, розташовані безпосередньо під або в шарі лицьового шпону.

2.2. Характеристика основних матеріалів, які можуть використовуватися для армування фанери

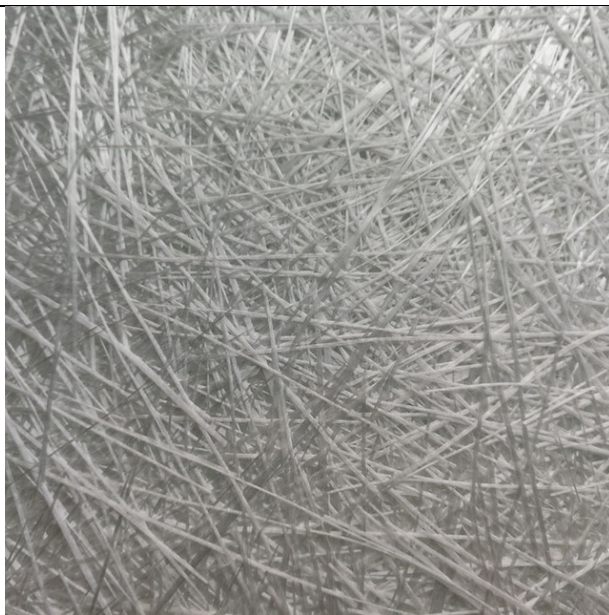
Скловолокно — штучне волокно чітко циліндричної форми з гладкою поверхнею, яке виготовляють витягуванням розплавленого скла (рис.2.1). У такій формі скло має незвичні для скла властивості: не ламається, не б'ється, а навпаки без руйнувань легко гнеться. Це дозволяє ткати з нього склотканину, виготовляти гнучкі світлопроводи та застосовувати в безлічі інших галузей техніки.

Види скловолокна

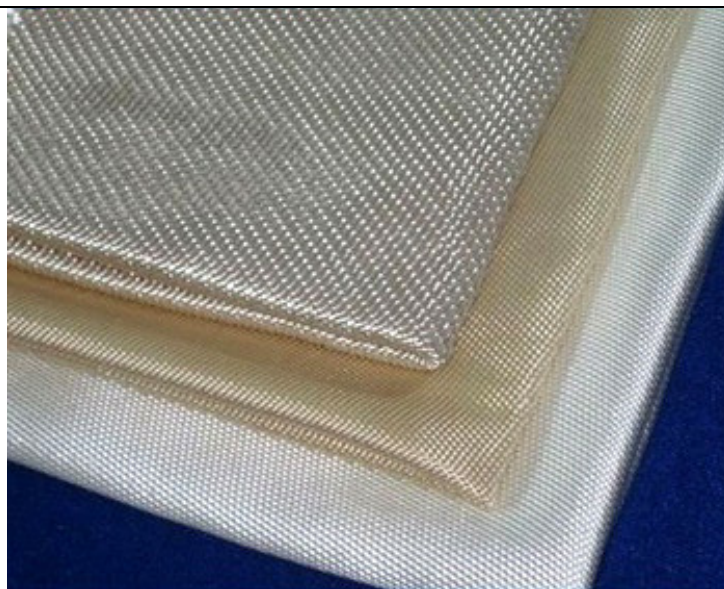
Скловолокно виготовляють з розплавленого скла у вигляді елементарних волокон діаметром 3—100 мкм і довжиною 20 км і більше (безперервне скловолокно) або діаметром 0,1—20 мкм і довжиною 1—50 см (штапельне скловолокно). За зовнішнім виглядом безперервне скловолокно нагадує нитки натурального або штучного шовку, штапельне — короткі волокна бавовни та вовни. Складне скловолокно, або скловолокно, — це армувальний елемент, який забезпечує більшу міцність і стійкість проти ударів. Скловолокно отримують з розплавленої скляної маси спеціального складу, яку протягують через дрібні отвори — фільтри. Воно має мікроскопічний діаметр близько 10 мкм, дуже високу міцність, що досягає 2000 МПа, і застосовується в рубаному або безперервному вигляді.

Рублене скловолокно — це короткі (до 50 мм) нарубані з безперервних, хаотично розташованих скловолокон у вигляді маси. Безперервне скловолокно — це волокна і нитки, джгути і тканини з нього необмеженої довжини.

Виробництво. Сировиною є розплавлена скляна шихта. Безперервне скловолокно (склотканину) формують витягуванням з розплавленої скломаси через фільтри (число отворів 200—2000) за допомогою механічних пристроїв, намотуючи волокно на бобіну. Діаметр волокна залежить від швидкості витягування і діаметра фільтри.



Скловолокно



Склотканина



Рис.2.1. Основні види матеріалів із скловолокна

Технологічний процес може бути здійснено в одну чи в дві стадії. У першому випадку скловолокно (склотканину) витягують з розплавленої скломаси (безпосередньо з склоплавильних печей), у другому використовують попередньо отримані скляні кульки, штабики або ерклези (шматочки оплавленого скла), які плавлять також у склоплавильних печах. Штапельне скловолокно формують одностадійним методом шляхом поділу струменя розплавленого скла паром, повітрям або гарячими газами та іншими методами.

Скловолокно є найбільш поширеним і економічно вигідним армувальним матеріалом для фанери. Його основні властивості:

- Висока міцність на розрив: Добре сприймає напруги розтягу та вигину.
- Відмінна хімічна стійкість: Стійке до води та більшості хімікатів.
- Добра адгезія: Легко просочується феноло-формальдегідними та епоксидними смолами, утворюючи міцний композит.
- Відносно низька вартість порівняно з іншими високоміцними волокнами.

Форми введення: Найчастіше використовується у вигляді склотканин (забезпечують високу орієнтовану міцність) або склокилимів (хаотичне розташування волокон для рівномірного зміцнення).

Застосування у виробництві фанери: Широко використовується у виробництві конструкційної та транспортної фанери для підвищення жорсткості та довговічності.

Базальтове волокно

Базальтове волокно — матеріал, який одержують з природних мінералів шляхом їх розплаву з наступним перетворення у волокно без використання хімічних добавок (рис.2.2).

Базальтове волокно виготовляють з різних гірських порід, близьких за хімічним складом — базальту, базанітів, амфіболітів, габродіабазів або їх сумішей.

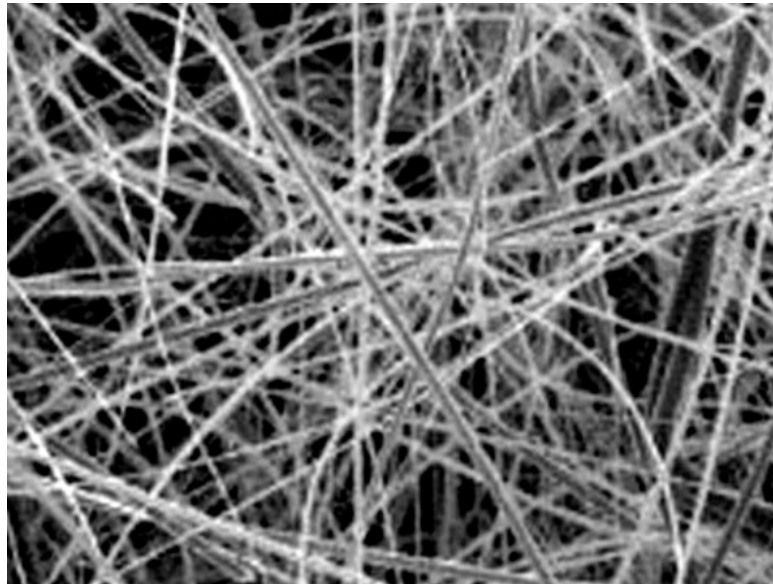


Рис.2.2. Базальтове волокно

Виробництво базальтових волокон полягає в отриманні розплаву базальту у плавильних печах і вільному його витіканні через спеціальні пристрої, виготовлені з платини чи інших жаростійких металів. Плавильні печі можуть бути електричними, газовими або обладнані мазутними пальниками. Базальтове волокно одержують методом одностадійної витяжки з базальтового розплаву з одночасною обробкою первинної нитки спеціальними замаслювальниками, для

надання нитки еластичності та сумісності з різними видами смол: епоксидними, епоксифенольними, фенолформальдегідними.



Рис.2.3. Базальтове волокно

Базальтове волокно є екологічною альтернативою скловолокну, що має поліпшені теплові та хімічні характеристики (рис.2.3).

Сировина: Розплавлені базальтові гірські породи (екологічно чистий процес).

Основні властивості:

- Вища термостійкість: Зберігає міцність при температурах, вищих, ніж скловолокно (~ 600 °C), покращуючи вогнестійкість фанери.
- Вища хімічна стійкість: Базальтові безперервні волокна мають високу корозійну і хімічну стійкість і стійкість до впливу агресивних середовищ: розчинів солей, кислот і особливо лугів.
- Хороші механічні властивості: Питома міцність базальтового волокна в 2,5 рази перевищує міцність легованої сталі і в 1,5 рази міцність скловолокну.

Залежно від діаметра волокно має різне використання:

- мікротонке — для фільтрів дуже тонкого очищення газоповітряного середовища і рідин, виготовлення тонкого паперу і спеціальних виробів;

- ультратонке — для виготовлення теплоізоляційних і звукопоглинальних надлегких матеріалів, паперу, фільтрів тонкого очищення газоповітряних і рідинних середовищ;

- супертонке — для виготовлення прошивних теплозвукоізоляційних і звукопоглинальних виробів, картону марки ТК-1..4, багат шарового нетканого матеріалу, в'язально-прошивного матеріалу для теплоізоляції, довгих смуг і джгутів (БТШ-8, БТШ-20, БТШ-30), м'яких гідрофобізованих теплоізоляційних плит, фільтрів. Спеціальна термічна обробка базальтових супертонких волокон дозволяє отримати мікрокристалічний матеріал з властивостями, відмінними від звичайних волокон. Мікрокристалічні волокна перевершують звичайні за температурою застосування на 200 °С, по кислотостійкості — в 2,5 рази, а їхня гігроскопічність в 2 рази нижча. Основною перевагою цього виду базальтового волокна є відсутність усадки при його експлуатації. З мікрокристалічного волокна виготовляють високотемпературостійкі теплоізоляційні матеріали, а також фільтри для фільтрації агресивних середовищ при високих температурах.

- тонкі волокна з гірських порід є килимом хаотично розташованих волокон діаметром 9-15 мкм і завдовжки 3-1500 мм;

- потовщені волокна – діаметр 15-25 мкм і довжина 5-1500 мм. Одержують їх як методом вертикального роздування струменя розплаву повітрям, так центробіговаликовим та центробігодутим способами. Виробляють у вигляді полотен, килимів, плит. Потовщені волокна знаходять широке застосування як фільтрувальна основа дренажних систем гідротехнічних споруд;

- товсті волокна є хаотично розташованими і мають розміри – довжина 5-3000 мм, діаметр 25-150 мкм, міцність на розрив 120—650 МПа;

- грубі волокна є відносно сипкою дисперсно-волоконною масою з довжиною волокон 3-15 мм, діаметром 150—500 мкм. Мають питому поверхню 28-280 см²/г та міцність на розрив 200—350 МПа. Волокна є корозійно-стійкими і можуть використовуватися замість металу для армування матеріалів.

Застосування у виробництві фанери: Для виробництва фанери з підвищеними вимогами до пожежної безпеки та експлуатації в умовах коливання температур.

Форми введення: Волокно, тканини, сітки (рис.2.4).



Рис. 2.4. Базальтова сітка

Вуглецеве волокно – (вуглеволокно, графітове волокно) — штучне волокно, яке складається з вуглецю; при чому атоми вуглецю вишикувані в тонкі довгі графітові волокна (рис.2.5). Вуглецеве волокно належить до класу високоефективних матеріалів, що забезпечують максимальне співвідношення міцності до ваги. Вуглецеві волокна є дуже жорсткими відносно їхньої маси і використовуються, зокрема, для конструкцій, які виготовлені як композиційний матеріал, в якому вуглецеві волокна поєднані з матеріалом матриці (в'язучим).

Вуглецеве волокно є вуглецем майже в чистому вигляді. Його виготовляють методом піролізу, тобто розкладанням молекул сполуки під впливом високої температури без окислення та горіння. Вуглеволокно отримують складною термічною обробкою (400—3000 °С) поліакрилонітрилу.

Кожне волокно за будовою кристалічної ґратки близьке до графіту, проте створює лише плоскі просторові структури. Безліч графітових полотен, переплітаючись, утворюють волокно.

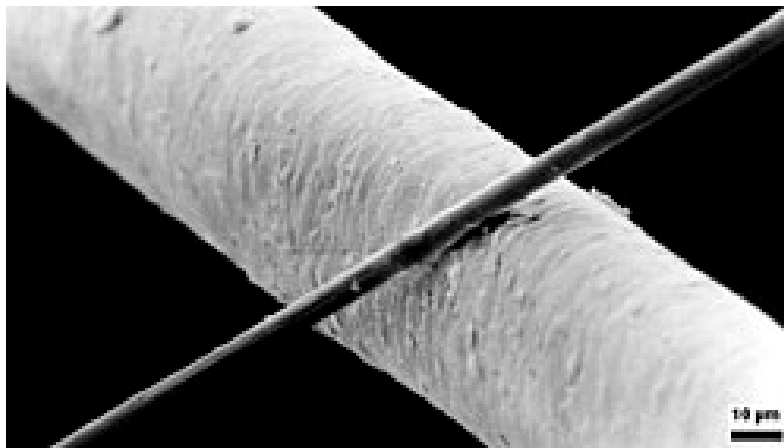


Рис. 2.5. 6 мкм вуглеволокно у порівнянні з людською волосиною 50 мкм

Отримання

Існують такі способи отримання вуглеволокна:

- хімічне осідання вуглецю на філамент (носій, наприклад, скловолокно);
- вирощування волоконноподібних кристалів (графіт) в світловій дузі;
- побудова органічних волокон в реакторі.

Найпоширенішим є останній спосіб. Спочатку з хімічних розчинів отримують поліакрилонітрильну нитку білого кольору. При високій температурній обробці вона переробляється у вуглецеве волокно — поліакрилонітрид нагрівається до 260 °С, оксидується і кетонні молекулярні з'єднання стабілізуються. Потім оксидований матеріал нагрівається до 1300 °С в інертному газі. При цьому відбувається обвуглювання матеріалу (карбонізація) і відторгнення невуглецевих з'єднань, так звана суха дистиляція. Таким чином отримують HF-волокна, які після цього обробляються хімічно для використання в композитних сполуках. З волокон виготовляють тканину. Далі, в результаті декількох технічних стадій вуглеволокна перетворюють в препреги, з яких отримують вуглепластик. Якщо потрібне волокно ще більшої міцності, то HF-волокно проходить ще одну ступінь — графітізацію при температурі 2000—3000 °С в інертному газі. Найміцніше вуглеволокно — uhm, проходить додатково ще декілька ступенів графітування в інертному газі при тій же температурі з подальшим фінішем. Процес це дуже енергоємний і складний, тому вуглеволокно набагато дорожче за скловолокно.

Основні властивості вуглеволокна (табл.2.1) [13]:

- Висока пружність: Екстремально високий модуль пружності (жорсткість): Значно підвищує жорсткість фанери при мінімальній доданій вазі.
- Висока механічна міцність: Найвища міцність на розрив серед усіх волокон.
- Стійкість до дії високих температур
- Стійкість до дії хімічних реагентів
- Стійкість до дії ультрафіолетового випромінювання
- Висока вартість: Обмежує його масове застосування.

Під впливом високої температури волокна змінюють свої механічні властивості.

Таблиця 2.1.

Типові властивості вуглецевих волокон

Типові властивості вуглеволокна	HT-вуглеволокно	UMS-вуглеволокно
1	2	3
Густина	1,8 г/см ³	1,8 г/см ³
Перетин волокна	7 мкм	7 мкм
Міцність вздовж волокон	3530 МПа(Н/мм ²)	4560 МПа(Н/мм ²)
Повздовжній модуль Юнга	230 ГПа	395 ГПа
Усадка	1,5 %	1,1 %

Вуглецеві волокна згортаються в нитку. Нитки переплітаються у вуглецеві тканини, полотна, стрічки різного плетіння (рис.2.6).

Ці матеріали застосовуються для створення вуглепластів (вуглепластиків) та інших композиційних матеріалів (як армуючий матеріал для вуглепластику на основі епоксидних смол). Використовують вуглецеві волокна і як хороший фільтрувальний матеріал, а також для виготовлення електронагрівальних елементів.

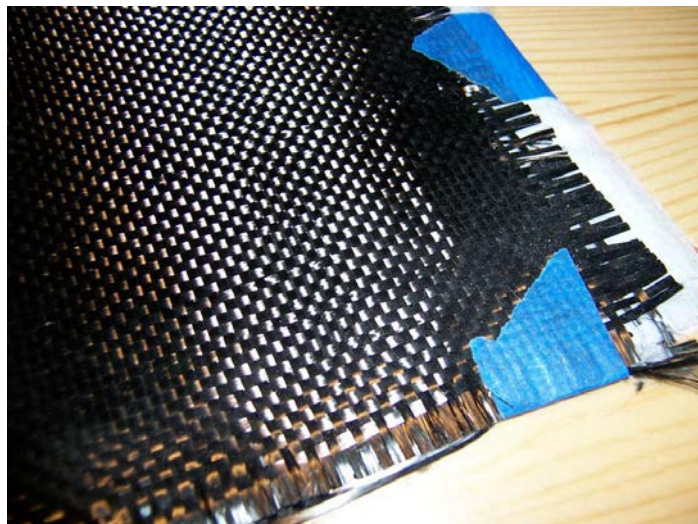


Рис. 2.6. Вуглецева тканина що застосовується для виготовлення композитних вуглепластиків

Вуглецеве волокно в комбінації з епоксидною смолою часто застосовується для армування ділянок, де необхідна підвищена міцність і жорсткість. Вуглеволокно за міцністю на розрив поступається кевлару, але перевершує його при роботі на стиск. Однак вуглецеве волокно має дуже низьку стійкість до ударних навантажень. Для компенсації слабких місць обох, їх часто застосовують у вигляді «гібрида». Вуглеволокно потребує для свого захисту іншого матеріалу типу склотканини.

Крім малої міцності при ударних навантаженнях, вуглеволокно погано переносить навантаження на зсув, тому його необхідно захищати зверху від абразивних дій. З вуглеволокна можна виготовити тканину в звичайному або «гібридному» вигляді, але потрібно враховувати, що вуглецеві волокна (як і інші) в процесі переплетення втрачають міцність. Якщо необхідно одержати максимальну міцність матеріалу, то вуглеволокна повинні бути абсолютно прямими, без звивини і згинів. Враховуючи високу вартість вуглеволокна недоцільним є його використання в тканому вигляді, де порушена прямолінійна орієнтація ниток.

Існують деякі розбіжності з приводу смол, придатних для застосування з вуглеволокном. З чисто технічної точки зору поліефірні, вінілефірні і епоксидні смоли добре просочують даний матеріал, однак для досягнення якнайкращих результатів доцільно застосовувати еластичніші смоли типу вінілефірних або

епоксидних. З точки зору міцності клейового з'єднання, коли вуглеволокно використовується поверх матеріалу-основи, якнайкращим варіантом будуть епоксидні смоли.

Матеріали з вуглеволокна мають чорний колір, зберігаючи його та гарну фактуру і після просочення смолою. Тому вуглеволокно часто використовується тільки для поліпшення зовнішнього вигляду, тобто для «косметичних» цілей, наприклад, для виготовлення корпусів приладових панелей або глушників тощо.

Однак варто зауважити, що вуглеволоконний пил небезпечний при вдиханні, тому при роботі з ним потрібно використовувати респіратор. При контакті з металами в солоній воді вуглепластик викликає сильну корозію, тому потрібно уникати таких контактів.

Застосування у виробництві фанери: Для виготовлення аерокосмічної та спортивної фанери або високоміцних конструкційних елементів, де критичною є мінімізація ваги при максимальній міцності. Дуже низька густина: Істотно не збільшує масу фанери.

Форми введення: Високоякісні тканини або односпрямовані стрічки.

Металеві сітки є унікальним класом армувальних матеріалів, що використовуються у виробництві фанери. На відміну від скловолокна чи вуглецевого волокна, які головним чином підвищують міцність і жорсткість всього об'єму матеріалу, металеві сітки застосовуються переважно для надання фанері **поверхневих захисних властивостей та локальної міцності.**

Сировина: Тонкий сталевий, алюмінієвий або мідний дріт.

Металеве армування фанери зазвичай представлене тонкими сітками, які забезпечують баланс між міцністю, вагою та технологічністю (табл.2.2).

Таблиця 2.2.

Характеристика різних типів металевого армування

Тип матеріалу	Характеристика	Застосування
Низьковуглецева сталь	Найпоширеніший, економічний матеріал. Може бути оцинкований для корозійної стійкості.	Підлоги транспортних засобів, промислові покриття.

Нержавіюча сталь	Висока корозійна стійкість і міцність. Використовується в агресивних середовищах.	Спеціальна фанера для хімічної промисловості або морського застосування.
Алюміній	Низька густина, легкість. Застосовується, коли важливе зниження ваги.	Авіаційна або спеціальна легка фанера.

Форми введення:

- Просічно-витяжні сітки (ПВС) (рис.2.7): Створюються шляхом просікання та витягування металевого листа. Вони мають об'ємну структуру, яка забезпечує кращу механічну фіксацію (анкерування) в клейовому шарі та покращує адгезію.

- Зварні сітки: Виготовляються з дротів, з'єднаних точковим зварюванням. Мають високу жорсткість, але можуть мати проблеми з адгезією, якщо клітинка завелика.



Рис. 2.7. Просічно-витяжна металева сітка з об'ємною структурою

- Ткані сітки: Дроти переплітаються, як нитки в тканині. Вони більш гнучкі та добре лягають на шпон.

Основна функція металевого армування – це не загальне підвищення модуля пружності, а покращення специфічних експлуатаційних характеристик фанери.

Висока стійкість до стирання (зносостійкість) є найважливішою перевагою. Коли сітка розташована у верхніх шарах або безпосередньо під покриттям (наприклад, ламінатом), вона сприймає основне тертя та запобігає швидкому зносу деревини. Що стосується опору локальному удару та продавлюванню, то сітка ефективно розподіляє точкове навантаження на більшу площу фанерного пакета, запобігаючи продавлюванню та утворенню вм'ятин від гострих предметів або важких вантажів. Використання сітки позитивно впливає на стійкість до розтріскування та зсуву. Так сітка виступає як "замок", обмежуючи рух шпону і запобігаючи розтріскуванню фанери при екстремальних навантаженнях або різких перепадах вологості. Також сітка може характеризуватися антивандальними та захисними властивостями. Вона може забезпечувати захист від прогризання (гризунами) або використовуватися як елемент антивандального захисту.

Технологічні особливості та розміщення металевих сіток

Введення металевої сітки вимагає точного контролю, оскільки метал і деревина мають різні коефіцієнти термічного розширення. Металеві сітки переважно розміщуються у зовнішніх шарах фанерного пакета (у клейовому шарі між двома зовнішніми шарами шпону). Це забезпечує максимальний ефект для захисту поверхні. Що стосується адгезії, то для надійної фіксації необхідне використання високоміцних та водостійких смол, таких як фенолоформальдегідні або епоксидні. Важливо забезпечити повне проникнення смоли через комірки сітки.

Режими пресування (тиск і температура) можуть бути скориговані для забезпечення щільного контакту та уникнення пошкодження шпону від металевих країв.

Сфери застосування: Армована металевими сітками фанера найбільш затребувана там, де матеріал піддається жорсткій механічній експлуатації:

- Транспортна фанера: Підлога вантажних автомобілів, причепів, морських контейнерів. Металева сітка надійно захищає від пошкоджень під час вантажно-розвантажувальних робіт та переміщення вантажів.

- Спеціальна опалубка: Використовується для виготовлення елементів багаторазової опалубки, де важлива стійкість до ударів та абразивного впливу бетонної суміші.
- Промислові підлоги та платформи: Використовується для настилів у складських приміщеннях, на робочих платформах та естакадах.

Арамідні волокна (Кевлар, Тварон), є високотехнологічними органічними полімерними волокнами, які використовуються для армування фанери у випадках, коли необхідно досягти виняткової ударостійкості та високої питомої міцності (міцності на одиницю ваги) [14].

Тканина з арамідного волокна має кращу пластичність, ніж вуглецеве волокно. Сам матеріал легкий, вільний і гнучкий. Це ідеальний армуючий матеріал (рис.2.8).



Рис.2.8. Тканина з арамідного

Вони відрізняються від скловолокна та вуглецевого волокна унікальною поведінкою під навантаженням.

Властивості арамідних волокон у фанері

Головна перевага арамідних волокон у композиційних матеріалах (включно з фанерою) полягає в їхній високій міцності на розтяг у поєднанні з здатністю до поглинання енергії удару. Такі волокна характеризуються високою міцністю на розрив. Волокна Кевлару у 5 разів міцніші за сталь при однаковій вазі. Арамідні волокна володіють винятковою ударною в'язкістю: Вони

проявляють механізм руйнування, при якому вони не ламаються крихко, як скло чи вуглець, а зазнають серії мікроруйнувань. Це розсіює кінетичну енергію удару на велику площу, запобігаючи пробиттю (наприклад, кулею або уламками).

Такі волокна мають низьку густину (легкість). Вони значно легші за скловолокно, що ідеально підходить для конструкцій, де вага має критичне значення.

Арамідні волокна характеризуються високою термостійкістю. Зберігають свої властивості при нагріванні до ~ 450 °C і не плавляться, що підвищує вогнестійкість фанери. Що стосується теплового розширення, то вона має негативний коефіцієнт. Уздовж волокна арамідну мають від'ємне розширення, що дозволяє робити композит більш термічно стабільним [15].

Вплив на механічні властивості фанери

Дослідження показують, що включення арамідного волокна у клейовий шов фанери значно покращує її характеристики. Статична міцність на згин збільшується, особливо при застосуванні з епоксидними смолами (зафіксовано приріст до 60-80% порівняно з неармованою фанерою). Модуль пружності (жорсткість) значно зростає, особливо при динамічному згині. Динамічна міцність на згин суттєво покращується, що безпосередньо пов'язано з високою ударною в'язкістю. Так, приріст динамічної міцності може становити понад 120% у тришарових плитах з двома шарами арамідну.

Технологічні аспекти та обмеження

Використання арамідну вимагає врахування певних особливостей. Щодо адгезії та використання смоли, необхідно врахувати, що арамідні волокна чутливі до вологи та ультрафіолетового випромінювання. Для ефективного армування та запобігання поглинанню вологи їх слід поєднувати з високоякісними вологостійкими смолами, найкраще епоксидними, оскільки вони забезпечують кращу адгезію до полімерної структури арамідну, ніж феноло-формальдегідні.

При роботі з композиційними матеріалами із вмістом арамідних волокон виникають складнощі обробки. Арамід дуже важко різати і механічно обробляти через його високу міцність і абразивність.

Композиційні матеріали з арамідом мають відносно нижчу міцність на стиск, ніж матеріали з вуглецевим волокном, тому їх зазвичай розміщують у зонах, де переважають напруги розтягу.

Висока вартість обмежує застосування арамиду спеціальними та високотехнологічними виробами.

Застосування арамиду для армування фанери

✓ Фанера, армована арамідом, використовується там, де інші матеріали не можуть забезпечити необхідний рівень захисту та легкості:

✓ Військова та захисна промисловість – виготовлення легких балістичних панелей або захисних елементів для транспортних засобів.

✓ Транспорт та авіабудування – елементи конструкцій, які потребують високої стійкості до вібрації та ударів при мінімальній вазі.

✓ Спортивний інвентар – виробництво надміцних, але легких елементів, де матеріал піддається сильним динамічним навантаженням.

Волока кенафу

Кенаф або Гібіск конопляний (*Hibiscus cannabinus*) — однорічна трав'яниста прядильна рослина родини (рис.2.9).



Рис.2.9. Волокна кенафу

Волокно кенафу використовують для виготовлення мішкових тканин, а також для скатертин та килимів, корабельних тросів. Костриця (деревина стебла) використовується для виготовлення паперу та картону. Волокно кенафу складається з 65% целюлози і 35% домішок. У волокні 23% припадає на лігнін і пектинові речовини, тому волокна грубі, ламкі, гігроскопічні й міцні.

Жорсткість і міцність волокна висока (поступається льону, але значно вища, ніж у джуту). Це дає змогу ефективно підвищувати модуль пружності фанери. Характеризується низькою щільністю $1,45\text{г/см}^3$. Це дозволяє виробляти легку фанеру з кращим співвідношенням міцності до ваги. Висока відновлюваність та швидкий ріст сприяє екологічності (зниження вуглецевого сліду). Має низьку вартість у порівнянні з синтетичними волокнами (скловолокно, вуглецеве волокно). Термічна стабільність волокна дозволяє застосовувати його при температурах до $200\text{ }^\circ\text{C}$, що сумісно з більшістю клеїв для фанери (як ФСФ, так і ФК).

Кенаф може вводиться в структуру фанери у різних формах. Неткані шари або сітки розташовуються як армуючий шар між шарами шпону, щоб забезпечити двонаправлене армування. Довгі волокна, орієнтовані в одному напрямку використовуються для посилення жорсткості фанери вздовж осі максимального навантаження. Короткі (подрібнені) волокна змішуються безпосередньо з клеєм, утворюючи волокнонаповнений клейовий шар, який підвищує міцність склеювання. Клітини кенафу діють як арматура для геміцелюлозної та лігнінової матриць. Таким чином, клітинна стінка являє собою композитну структуру лігноцелюлозного матеріалу, армованого спіральними мікрофібрилярними смугами целюлози [9].

Ляне волокно або льоноволокно — текстильне волокно рослинного походження, одержане з стебел льону-довгунця (рис.2.10).



Рис.2.10. Ляне волокно

Є одним із найміцніших рослинних волокон. За міцністю на розрив значно перевершує бавовну, вовну, джут, поступаючись лише рамі і кендірю. Міцність лляної пряжі на розрив при однаковій товщині майже вдвічі вища бавовняної і втричі вища за шерстяну. З підвищенням вологості лляного волокна до певної межі збільшується його міцність. Ляне волокно є одним із найкращих натуральних армуючих матеріалів для створення високоміцних та екологічних деревинних композитів, включно з фанерою. Воно має високі механічні характеристики і може конкурувати із скловолокном.

Ляне волокно характеризується високою питомою міцністю, має один із найвищих показників модуля пружності серед усіх натуральних волокон. Завдяки цьому, при введенні в структуру фанери, значно підвищує її межу міцності на згин. Ляне волокно легше за скловолокно, що дозволяє створювати легші композити з відмінним співвідношенням міцності до ваги. Фанера, армована льоном, має кращі вібропоглинальні та шумоізоляційні характеристики, що є перевагою для транспортної фанери.

Це екологічно чистий та відновлюваний ресурс.

Недоліком лляних волокон, як і усіх натуральних, є гідрофільність. Це створює проблему слабкої адгезії та набрякання волокна під впливом вологи, що може спричинити зниження міцності фанери при експлуатації з часом.

Щодо використання, то транспортна галузь є одним із ключових споживачів фанери, армованої натуральними волокнами. Завдяки низькій вазі та відмінним вібропоглинальним властивостям, армована лляним волокном фанера або панелі з її використанням застосовуються для внутрішнього оздоблення та елементів кузова, таких як внутрішня обшивка, перегородки та підлога.

У будівництві лляні композити використовуються для нетрадиційних конструкцій та внутрішніх елементів (ненавантажені стінові та перегородкові панелі, де потрібна хороша звукоізоляція та легкість монтажу. Висока якість поверхні та екологічність роблять ці матеріали придатними для виготовлення меблів, стільниць та високоякісного інтер'єрного оздоблення, де важливий естетичний вигляд натурального матеріалу. Лляні волокна можуть також застосовуватися як армуючий шар, який є легший та менш крихкий у порівнянні із скловолокном для корпусів та внутрішніх елементів невеликих човнів та каяків у суднобудуванні, а також у виготовленні сноубордів, лиж, шоломів та інших виробів, де цінуються ударостійкість та віброгасіння.

Волокна бамбуку

Волокна бамбуку є одними з найбільш ефективних натуральних волокон для армування композиційних матеріалів, зокрема фанери, завдяки своїй високій міцності, жорсткості та екологічності (рис.2.11). Бамбук має дуже високий вміст целюлози, яка забезпечує значну міцність, що є ключовим для армування. Його міцність може конкурувати з деякими видами скловолокна.

Волокна бамбуку є дуже жорсткими. Це допомагає значно підвищити модуль пружності фанери, роблячи її менш схильною до прогину під навантаженням. Бамбук має низьку щільність, завдяки чому армована фанера зберігає невелику вагу при підвищеній міцності.



Рис.2.11. Волокна бамбуку

При армуванні фанери бамбукові волокна можуть розміщуватися між шарами деревинного шпону у вигляді спресованих тонких шарів або волокон, сплєтених в сітки. Армуючий шар бамбуку зазвичай розташовують ближче до зовнішніх шарів фанери, оскільки саме там виникають максимальні напруження при згині. Короткі або подрібнені бамбукові волокна можуть безпосередньо додаватися до фенолформальдегідних (ФСФ) або інших клеїв для підвищення міцності клейових шарів та покращення адгезії.

Недоліком таких волокон є гігроскопічність, яка призводить до поглинання вологи, набрякання волокон та зменшення довговічності фанери. Для уникнення цього використовують хімічну обробку лугами (NaOH) (видаляються нецелюлозні компоненти та покращується поверхнева адгезія) чи силановими агентами (створюється хімічний "місток" між бамбуковим волокном і органічною смолою, роблячи композит більш стійким до вологи).

Волокна коноплі

Завдяки своїй екологічності, доступності та відмінним механічним характеристикам знаходяться на рівні з льоном (рис.2.12).



Рис.2.12. Волокна коноплі

Характеризується високим вмістом целюлози (близько 70-75%) та низьким вмістом лігніну. Висока міцність та гнучкість. Має низьку густину (близько 1,47-1,55 г/см³), що дозволяє виробляти легкі композити та текстиль. Довжина технічних волокон (до 2-3 м у стеблі), елементарних волокон — 25–50 мм, тому добре підходить для прядіння та створення міцних нетканих килимів для армування. Гігроскопічність волокон висока (вбирає вологу до 8-12% від сухої ваги), що є недоліком для армування фанери (потрібна хімічна обробка для покращення вологостійкості).

Конопляні волокна відомі своєю високою механічною міцністю. Міцність на розрив до 600-900 МПа. Модуль пружності до 70 ГПа. Завдяки цьому армований ними композит має високу межу міцності на згин, що важливо для конструкційних елементів.

Характеризується відновлюваністю. Є однією з найшвидше зростаючих сільськогосподарських культур та потребує мінімального використання пестицидів. Що стосується термостійкості, то температура до 200 °С, які використовуються для затвердіння стандартних смол у виробництві фанери є прийнятною.

Волокна джуту

Джут, як армуючий матеріал, найбільше цінується за його низьку собівартість і здатність створювати легкі композити. Щільність волокна порівняно низька 1,3-1,4 г/см³. Вміст лігніну високий (близько 12–15%), що є недоліком, бо лігнін робить волокно жорсткішим і погіршує термічну стабільність.

Не забезпечує такої високої жорсткості (модуля Юнга) та міцності на згин фанери, як льон чи бамбук. Дуже висока гігроскопічність джуту є найбільшим недоліком. Джут сильно вбирає вологу, що призводить до набрякання, погіршення зв'язку "волокно-клей" і зниження механічних властивостей композиту у вологому середовищі.

Через високий вміст лігніну та гігроскопічність, волокна джуту потребують попередньої обробки для застосування при армуванні фанери. Хімічне модифікування (мерсеризація, обробка силанами) є обов'язковою для поліпшення адгезії та для зниження водопоглинання. Без такої обробки армована фанера буде швидко руйнуватися під впливом вологи.

При армуванні волокна джуту зазвичай використовується у вигляді нетканих полотен або рогожі (плетених килимів), які розташовуються як прошарок у пакеті шпону.

Загалом при використанні для армування фанери волокон натурального рослинного походження потрібно враховувати їх переваги та недоліки (табл. 2.3).

Таблиця 2.3.

Переваги та недоліки натуральних волокон рослинного походження

Волокно	Переваги для армування	Недоліки для армування
Льон	Висока питома міцність (співвідношення міцності до ваги). Висока жорсткість (модуль пружності). Гарна амортизація та вібростійкість. Дуже хороша сумісність із полімерними матрицями (клеями).	Високе водопоглинання (потрібне модифікування). Значне зменшення міцності у вологому середовищі.

Коноплі	Висока доступність і швидкість росту. Порівняно висока міцність на розрив. Легкість, що робить фанеру легшою. Стійкість до гниття краща, ніж у деяких інших волокон.	Висока гігроскопічність
Бамбук	Висока міцність і висока жорсткість (схожа на скловолокно). Відновлюваність та швидкий ріст. Використовується у вигляді волокна, подрібнені чи у вигляді килиму.	Високе водопоглинання через порожнисту структуру. Низька термічна стійкість порівняно зі синтетичними волокнами.
Джут	Низька вартість та висока доступність. Гарна міцність на розтягнення. Легко піддається обробці та плетінню в мати чи сітки.	Низький модуль пружності (не такий жорсткий, як льон). Дуже високе водопоглинання (найбільш гідрофільний).
Кенаф	Висока жорсткість і порівняно хороша міцність. Екологічність та швидкість росту. Добре підходить для заміни скловолокна у ненавантажених елементах.	Низька довговічність під впливом УФ-випромінювання. Потребує хімічної обробки для кращої адгезії з клеями.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ АРМОВАНОЇ ФАНЕРИ

3.1. Особливості армування фанери та його вплив на властивості фанери

Основною причиною армування є необхідність надання фанері нових функціональних властивостей, які неможливо досягти за рахунок лише деревини та стандартних клеїв. Армування застосовується для підвищення стійкості до деформацій, забезпечення захисту від поширення тріщин та запобігання передчасному руйнуванню. Принципи армування фанери аналогічні до тих, що застосовуються для зміцнення інших будівельних матеріалів, таких як газобетонна кладка, де мета полягає у підвищенні стійкості до навантажень, збереженні форми та функціональності конструкції в складних умовах експлуатації.

Армування створює високоміцний, неперервний каркас (як правило, з композитного шару), який ефективно перебирає на себе основне навантаження на розтяг. Це є критично важливим, оскільки деревина природно має високу міцність на стиск, але є слабкою на розтяг паралельно волокнам. Таким чином, композитний шар компенсує структурну слабкість шпону, викликану як анізотропією, так і наявністю дефектів (сучків чи тріщин). Наслідком успішного армування є можливість використання фанери у конструкціях, де необхідна гарантована довговічність та стабільність.

Виробництво армованої фанери передбачає необхідність забезпечення міцного зчеплення на кількох гетерогенних поверхнях (шпон-клей, клей-армуючий шар, армуючий шар-шпон). Нестабільна адгезійна здатність може призвести до місцевого спінювання та непроклеювання.

На адгезію впливають такі фактори:

1. Якість обробки шпону – низька якість обробки луценого шпону, включаючи товсті сліди від ножа або відсутність прямого кута, створює неоднорідну силу зчеплення.

2. Вологість – занадто високий вміст вологи у шпоні суттєво зменшує адгезію.

Для досягнення високої міцності зчеплення в гібридних композитах необхідно застосовувати інтегровану систему підготовки поверхонь. Для полярної деревини можна застосовувати хімічну активацію поверхні шпону (наприклад, модифікування пероксидом водню) з метою підвищення адгезійної здатності клею. Водночас, для забезпечення міцного зчеплення з неполярними армуючими волокнами (наприклад, скловолокном або вуглецевим волокном), використання спеціальних ґрунтовок є критично необхідними. Ґрунтовки на основі епоксидної смоли часто використовуються як проміжні шари, що покращують зчеплення між основою (армуючим матеріалом) та клеєм. Успішне виробництво армованої фанери залежить не тільки від вибору одного клею, а від комплексної системи, оптимізованої для кожного виду гетерогенних поверхонь.

Завдяки армуванню фанери волокнами, можна значно покращити її фізико-механічні властивості:

міцність: фанера, армована волокном, більш стійка на згин, розтяг та стиск [17 – 22];

жорсткість: зменшення прогину та підвищення загальної структурної цілісності [23 – 26];

ударостійкість: витривалість до ударів та поштовхів [24, 26, 27];

стійкість: підвищена довговічність при багаторазових циклах напружень без руйнування [25, 26];

опір повзучості: підвищена здатність протистояти деформації з часом під постійними навантаженнями [27];

опір витягуванню гвинта: сильніший опір гвинта під час витягування, що робить кріплення надійнішим [18, 19, 22, 28, 29];

вологостійкість та стабільність розмірів: додавання певних типів волокон може покращити стійкість фанери до вологи та стабільність її розмірів, що є важливими властивостями для багатьох сфер використання [23, 28].

Ступінь, до якої армування волокнами покращує механічні властивості фанери, може значно варіюватися залежно від кількох факторів, включаючи тип використовуваних волокон (наприклад, скляні, вуглецеві, натуральні), спосіб включення (переплетення, поверхнєве склеювання або просочення), орієнтацію волокон та конкретні механічні властивості (наприклад, міцність на розтяг, міцність на вигин, ударостійкість). У таблиці 3.1 наведено дані щодо характеристик міцності на розтяг та міцності на згин для фанери, армованої волокнами.

Таблиця 3.1

Міцність фанери на розтяг та згин, армованої волокном, порівняно з неармованою фанерою.

Волокнистий матеріал	Міцність на розтяг	Міцність на згин	Примітка
Базальт	+20–30% [30]	+15.7% [30] 10.4–99.5% [30]	Невелике додавання 10 мас.% загальної кількості волокон призвело до значного зменшення усадки та коефіцієнта теплового розширення [25, 26]. Значне збільшення співвідношення міцності до ваги [30]. Вища стійкість до термічної деструкції з найменшою втратою ваги [25]. Базальтові сітки забезпечують вищу міцність на згин без впливу на внутрішню міцність з'єднання [30]. Жорсткість збільшується на +9–42% [31].

Вуглець	+17% [19]	20% [19]	Збільшення модуля на розрив коливалося від 57,6% до 102,9%.
Скло	+20% [32]	118% and 50% [33]	Твердість фанери, армованої скловолокном, збільшилася на 36,4% [34].
Мідь		+40% [24]	Збільшення модуля розриву спостерігалось для всієї фанери, виготовленої з додаванням мідних волокон та шпону з отворами [24].
Конопля		20% [22]	Натуральне конопляне волокно та лігнін-фенольні клеї [17].
Кенаф		90% [16]	Використання наповнених (армованих) клеїв [16].
Льон	+19% [17]		Вплив целюлозної тканини можна прирівняти до тканини з льняного волокна [17].

Схеми армування фанери волокном

Досліджували вплив різних типів волокнистого армування на характеристики фанери (рис.3.1) [35].

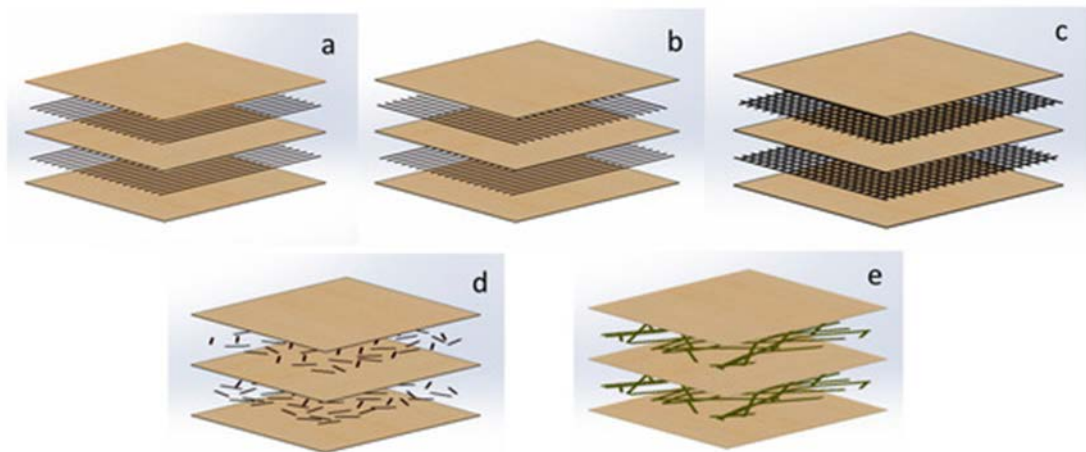


Рис.3.1. Можливі схеми армування фанери волокнами: а – паралельно вирівняні шари волокон розташовані в одному напрямку для покращення міцності в одному напрямку; б – паралельно вирівняні шари волокон перпендикулярні для однорідного розподілу навантаження. с – використання волокнистого шару для контрольованого технологічного використання. d – подрібнені волокна між шарами шпону для широкого застосування. e – біологічні волокна між шпоном для підтримки енергоефективного життєвого циклу продукту та управління відходами.

Додавання у структуру фанери синтетичного волокна покращує властивості фанери. Вуглецеве волокно збільшує як модуль розриву (MOR), так і модуль пружності (MOE) фанери [19]. Аналогічно армування скловолокном значно збільшує MOR та MOE фанери, виготовленої із шпону тополі, одночасно зменшуючи набрякання за товщиною та водопоглинання [33]. Автори відзначили на перевагах армування вуглецевим волокном та порошком відходів гуми для покращення механічних властивостей, підвищення стійкості фанери та довговічності [36]. У роботі [37] також підтверджено ефект армування скловолокном фанери, виготовленої із шпону тополі, особливо при його розташуванні близько до поверхневого шару.

Подальші дослідження були проведені щодо армування натуральними волокнами як альтернативи синтетичним волокнам. Підтверджено ефективність натуральних волокон, таких як кенаф, у покращенні фізичних та механічних властивостей фанери [38]. Також досліджувалися механічні та фізичні властивості букової фанери, армованої льоном, підкреслюючи важливість клейових систем для оптимізації її механічних властивостей [18]. У роботі [21] вивчали, як армування та температура впливають на міцність на розрив фанери, армованої базальтовим волокном. Показано, як використання між листами шпону попередньо розтягнутих базальтових волокон може призвести до отримання фанери підвищеної міцності. Це узгоджується з висновками, поданими у роботі [20], у якій досліджували покриття фанери з армуючим ефектом базальтовим волокном. При цьому збільшується міцність фанери залежно від питомої ваги та положення армування. Також досліджувалися покриття для фанери на основі полівінілацетатної смоли, армованої базальтовим волокном. Це вказує на потенціал для створення екологічно чистих армованих деревинних композиційних плит [23].

Були проведені дослідження з вивчення фанери, армованої волокнами, та впливу вирівнювання волокон, форми та розмірів на властивості фанери. У роботі [19] показано, що армування фанери вуглецевими волокнами збільшує міцність на згин та модуль пружності. Перпендикулярна орієнтація армування

покращує силу різання, а водопоглинання та набрякання за товщиною основного шару фанери зменшується. Також показано, що довжина та орієнтація волокон впливають на еластичність фанери, армованої волокнами. Це підкреслює важливість оптимальних характеристик волокон для досягнення високих результатів армування.

Автори [39] дійшли висновку, що хаотичне розміщення волокон призводить до покращення модуля пружності та міцності фанери на згин.

Ткані полотна із підготовленого волокна мають кращі механічні властивості у композитах, ніж рубані волокна [40]. Коли йдеться про армовані композиційні матеріали, то можна використовувати рубані волокна та ткані полотна із підготовленого волокна. У армуванні з рубаного волокна самі волокна розташовані хаотично і скріплені в'язучою речовиною. Таке армування надає приблизно однакові механічні властивості в усіх напрямках. Воно підходить для використання, де важливими є еластичність, економічна ефективність та поглинання смоли. Ткані полотна із підготовленого волокна складаються з довгих волокон, сплетених у сітчасту структуру. Ткані полотна забезпечують високу міцність та жорсткість в обох напрямках. Їх застосовують переважно, коли важливими є висока міцність та жорсткість в обох напрямках. Якщо потрібні однорідні властивості в усіх напрямках, то армування з рубаного волокна є хорошим вибором. Однак, якщо потрібна висока міцність та жорсткість, особливо в обох напрямках, перевага надається тканим полотнам. Деякі дослідження показали, що поєднання тканих полотен та рубаного волокна у композитах покращує властивості ламінованого композиту за рахунок збільшення кількості шарів. Дослідження показують, що армування фанери волокнами, за допомогою таких матеріалів, як льон, базальт, вуглецеві або скляні волокна, покращує механічні властивості, довговічність, міцність та інші властивості фанери.

Зрозуміло, що довжина, діаметр та кількість (г/м^2) волокон також впливають на ступінь армування, як і клей, який використовують для

склеювання. Якість та характеристики базової фанери також відіграють значну роль у загальних характеристиках армованого виробу. Згідно з літературними даними, зазвичай фанера, армована волокном, приблизно на 10–40% міцніша за звичайну фанеру, залежно від вищезазначених змінних.

Щодо потенційного покращення екологічності завдяки армуванню волокном, слід враховувати тип волокна. Волокна, такі як базальт, скловолокно, вуглецеве волокно та кевлар завдяки своїй міцності та довговічності, зазвичай використовуються для виготовлення високоякісної армованої фанери. Однак ці волокна не існують у природі, а це означає, що для їх виробництва необхідно витратити енергію. Наприклад, процес виготовлення базальтових волокон включає кілька етапів: видобуток та підготовку сирової базальтової породи, плавлення базальтової породи (при температурі $\sim 1400\text{--}1600\text{ }^{\circ}\text{C}$), екструзування волокон, нанесення зміцнюючого агента, охолодження та упаковка. Однак загальні витрати на енергію повинні бути збалансовані з перевагами, які пропонують ці волокна. Як правило, вміст волокна у фанері, армованій волокном, залишається в межах $50\text{--}200\text{ г/м}^2$ на шар, що є незначним за вагою порівняно з вагою самої фанерної панелі. З іншого боку, з концепції сталого розвитку доцільніше використовувати натуральні волокна, такі як коноплі, льону, кокосу тощо. Виробництво конопель та льону зараз розвивається і може конкурувати та співіснувати зі штучними волокнами, з огляду на якість, сталий розвиток, економіку та виробництво [41]. Такі волокна мають набагато нижчі витрати на обробку, ніж синтетичні, крім того, є відновлюваними та сталими ресурсами, а у деяких випадках (наприклад, кокосове волокно) їх вважають відходами, для яких необхідно знайти відповідне застосування. За своїми характеристиками фанера, армована натуральними волокнами, може прирівнюватися до фанери, армованої синтетичними волокнами. Так у роботі [17] порівняли механічні властивості березової фанери, армованої льоном та склотканиною, з неармованою фанерою та виявили, що кожен досліджуваний параметр (тобто міцність на розрив, міцність на зсув при розтягуванні, модуль пружності, модуль розриву та опір витягуванню гвинта) показав збільшення як

для льону, так і для склотканини лише з незначними відмінностями. Загалом, використання для армування натуральних волокон для виробництва фанери, забезпечує більшу екологічність, порівнюючи з фанерою, армованою синтетичними волокнами, при одержанні подібних механічних властивостей. Також натуральні волокна мають додаткову перевагу перед синтетичними – ідеальну сумісність з існуючими для фанери клеями.

У дослідженні [17] використовувався буковий шпон товщиною 2,2 мм, щільністю 0,72 г/см³. Для армування використовували тканини *LENZINGTM Lyocell* на основі целюлози та льняна тканина *Lineo FlaxTape 50* з питомою масою 50 г/м². Тканину Lyocell варіанту А попередньо не обробляли, а варіант В обробляли для надання гідрофобних властивостей. *Lineo Flaxtape* (варіант С) мав орієнтовну щільність 1,31 г/см³ і товщину 0,1 мм. Варіанти А, В і С визначаються типом армувальної тканини (А = необроблена целюлоза, В = гідрофобна попередньо оброблена целюлоза і С = льон).

Як клей використовували карбамідо-формальдегідний клей (UF) *1274 Akzo Nobel* та затверджувач *2545 Akzo Nobel* з щільністю відповідно 1,3 і 1,45 г/см³, в'язкістю 1,5–3,5 Па·с/2,0–10,0 Па·с і співвідношенням смоли до затверджувача 100:20 г. Склеювали п'ятишарову фанеру – контрольну без армування та досліджувану – із шарами армування під зовнішніми листами шпону. Витрата клею для з'єднання дерева/дерева становила 160 г/м². Для з'єднання дерева/армувальна тканина застосовувалося дві витрати 160 і 200 г/м². Фанеру виготовляли товщиною 10,0 мм у пресі *Höfler HLOP 280* – час пресування 12,75 хв, питомий тиск 3 Н/мм² і температура 110 °С.

Середня щільність варіанту фанери А становить 0,874 г/см³ і на 2,70% вища порівняно з контрольним зразком з щільністю 0,851 г/см³. Застосування вищого вмісту смоли в з'єднанні клею дерева-тканина у варіанті фанери А+ дає на 3,64% більшу щільність, ніж у контрольній формі. Середня щільність варіанту В збільшилася на 3,17%, а середня щільність варіанту В+ — на 4,58%. Щільність

варіанту С зменшилася на 2,47% і 4,47% для середньої щільності С+. У таблиці 3.2 наведено товщину одержаної фанери та спресування.

Таблиця 3.2.

Товщина та спресування п'ятишарової фанери

Варіант	Армування	Товщина , мм	Спресування, %
неармована	-	10,02	8,91
А	А	9,96	9,45
А+		9,83	10,64
В	В	9,78	11,09
В+		9,96	9,45
С	С	10,34	6,00
С+		10,45	5,00

На рис.9 зображено скануючу електронну мікроскопію (SEM) для клеючої матриці та армувальних волокон. На основі зображень SEM помітно, що тканину А/А+ чітко видно всередині лінії клею (рис. 3.2.а), як і для тканини С/С+ (рис.3.2.с). Для порівняння, тканину В/В+ майже не помітно у межах клеючої лінії, що свідчить про краще проникнення клею всередину тканини (рис. 3.2.б).

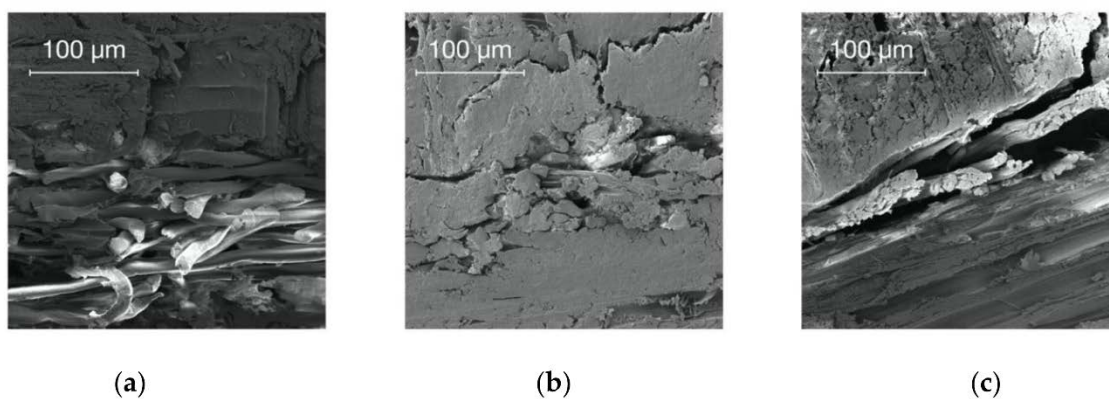


Рис 3.2. (а) SEM-зображення целюлозної тканини А, (б) SEM-зображення целюлозної тканини В та (с) SEM-зображення льняного волокна.

Що стосується модуля пружності, то для варіанту А він становив 11 845 Н/мм², більший на 2,59% порівняно з контрольним зразком – 11 546 Н/мм². Середній модуль пружності для А+ збільшився на 0,49%. Натомість середнє значення пружності за варіантами В і В+ зменшилися на 3,07% та на 2,22% відповідно. Середній модуль пружності для С збільшився на 1,63%, а варіант С+ зменшився на 2,71% (рис.3.3).

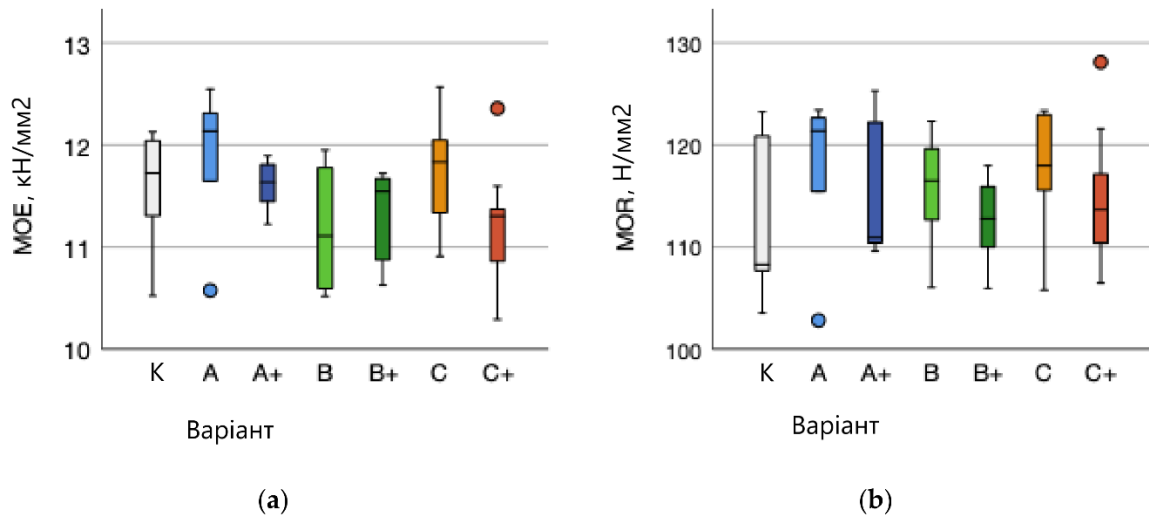


Рис.3.3. (а) Модуль пружності (МОЕ) та (б) модуль розриву (MOR) для неармованої фанери (К) та армованих варіантів А, В і С, а також варіантів з більшою кількістю клею А+, В+ і С+.

Армування, як правило, негативно впливає на модуль пружності, але покращує модуль розриву.

Можна зафіксувати незначущі тенденції щодо впливу кількості клею на модуль пружності. Для необробленого варіанту целюлози А та армування льняним волокном С, виявлено негативну тенденцію до збільшення кількості клею. Натомість варіант В демонструє позитивний вплив більшої кількості клею на модуль еластичності. Цього не можна стверджувати щодо модуля розриву. Для А/А+, В/В+ та С/С+ виявлено тенденцію негативного впливу більшої кількості клею на модуль розриву. Що стосується впливу типу армування, то кращі показники демонструє необроблена целюлоза (А/А+) та льняне волокно (С/С+) порівняно з контрольними зразками та попередньо обробленою

целюлозою (В/В+). Ці дані підтверджують припущення, що кількість клею можна зменшити до 120 г/м² без суттєвого впливу на механічні властивості.

Діаграма напруження–деформації не показує покращення показників при використанні волокна в лінійній пружній області. Це змінюється пізніше в нелінійній пружній області, де армовані волокном зразки мають кращі показники порівняно з контрольним зразком. У межах пружно-пластичної області зразки, армовані волокном здатні витримувати руйнування внаслідок перенесення напружень у шар армування, що базується на вищій міцності тканини на розтяг. Помітна різниця між варіантами А/А+ і С/С+ щодо кількості клею. Менша кількість клею, як у А і С, покращує поведінку в нелінійній пружній області. Зворотна картина спостерігається для попередньо гідрофобного обробленого варіанту В/В+. Варіанти А/А+ і С/С+ мають довшу довжину тріщини вздовж зовнішньої лінії клею на стороні натягу. Це свідчить про порушення через перенос напруги всередині тканини.

Міцність на розтяг вважається важливим фактором для застосування фанери у несучих конструкціях. Значення міцності варіанту А становить 81,76 Н/мм², для контрольного зразка цей показник становить 92,43 Н/мм². Середня міцність на розтяг варіанту А+ збільшилася на +18%. Середні значення міцності варіанту В є вищими на 10% та для варіанту В+ на 11% відповідно. Варіант С показав кращі результати на 19%, а С+ — на 10% (рис. 3.4).

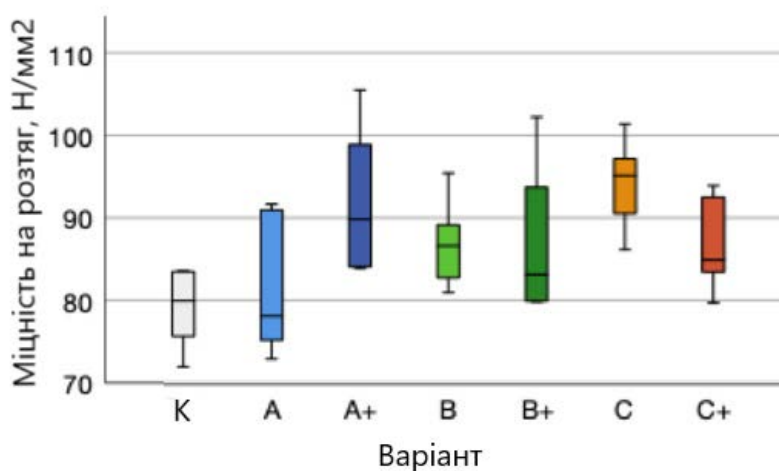


Рис.3.4. Міцність на розтяг для контрольної фанери та армованої варіантами А, В і С, а також варіантами з більшою кількістю клею А+, В+ і С+.

Виявлено загальну тенденцію до покращення міцності на розрив при застосуванні армування волокном. Із збільшенням кількості клею відзначається позитивна тенденція до підвищення міцності на розтяг. У целюлозі А/А+ та В/В+ середня міцність на розрив зростає завдяки більшій кількості клею. Однак цього не відбувається при використанні льняного волокна С/С+.

Що стосується міцності на зріз, то вона значною мірою залежить від зчеплення клею, який використовується для з'єднання окремих шарів шпону. Армування не відіграє суттєвого впливу на міцність на зріз та внутрішній зв'язок. Зсувна міцність зменшується при підсилюванні, тоді як внутрішній зв'язок збільшується у посилених зразків (рис.3.5).

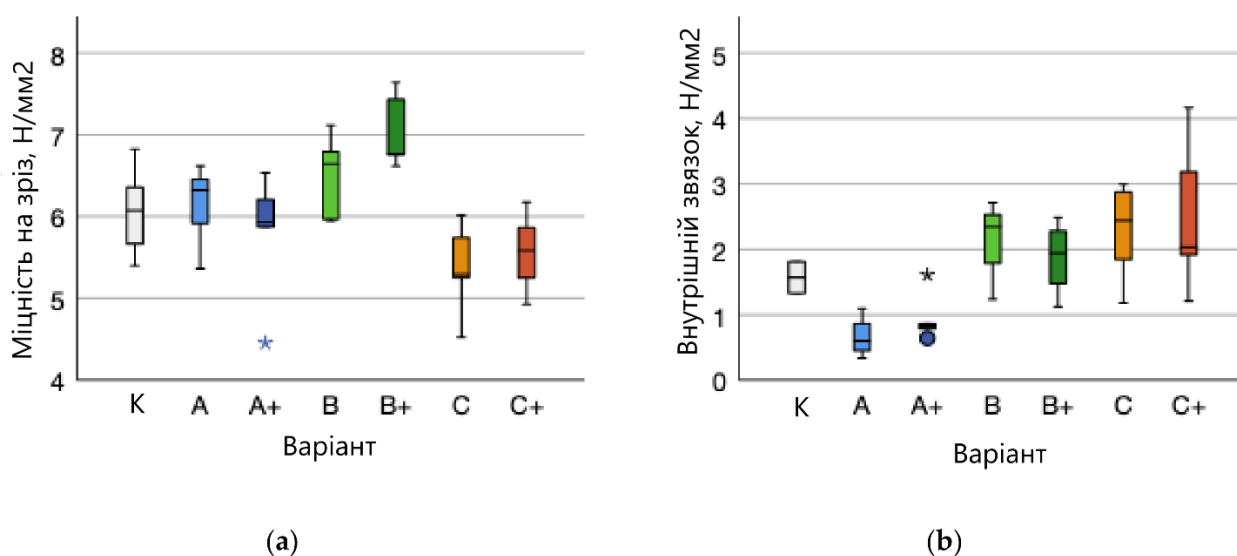


Рис. 3.5. а) міцність на зріз та (b) внутрішній зв'язок контрольної фанери та фанери, армованої варіантами А, В і С, а також варіантами з більшою кількістю клею А+, В+ і С+.

Як видно з рисунку тип армування суттєво впливає на показники внутрішнього зв'язку. Целюлоза А має найнижчі показники внутрішнього зв'язку, за нею йде целюлоза В і льон — найвищий. Кількість клею, як правило, незначно збільшує цей показник.

Міцність на зріз не залежить від типу армування та кількості клею. Тенденція показників внутрішнього зв'язку щодо впливу армування відрізняється від міцності на зріз. Для зразків із льоном характерна найнижча міцність на зріз, найвища – для целюлоза В. Більша кількість клею, як правило, підвищує міцність на зріз. Міцність на зріз для варіанту А становить $6,14 \text{ Н/мм}^2$. Значення міцності на зріз для А+ зменшилося на 4,45%. Для порівняння, середні значення міцності на зріз варіантів В і варіанту В+ зросли відповідно на +6,92% та 15,98% порівняно з контрольними зразками. Варіант з льняним волокном С показав зниження міцності на зріз на 11,86%, а С+ — на 8,24%.

Що стосується характеру руйнувань зразка під час випробування, то типи А та А+ показали руйнацію у тканині, вбудованій у лінію клею 1. Натомість типи В і В+ руйнувалися переважно в межах клею 2. Тріщина всередині лінії клею 1 була виявлена лише у двох зразків варіанту В. Варіанти С і С+ зруйнувалися по дерев'яному поверхневому шарі. Це вказує на вплив різних тканин для армування на міцність на зріз. Показник внутрішнього зв'язку для зразків із варіанту А становить $0,66 \text{ Н/мм}^2$, що на $0,91 \text{ Н/мм}^2$ (–57,96%) нижчий порівняно з контрольним зразком $1,57 \text{ Н/мм}^2$. Показник внутрішнього зв'язку для А+ менший на –39,49%. Для порівняння, ці показники для варіантів В і варіантів В+ зросли відповідно на 33,76% та 19,75% порівняно з контрольним.

Існують відмінності щодо характеру руйнувань зразків. Варіанти А та А+ показали руйнування у тканині. Варіанти В і В+ не зазнали поєднання тріщини деревини та тканини. Варіант С руйнувався переважно по тканині, як і варіант С+. Різний характер руйнування, виявлений візуальним аналізом, підтверджується значним впливом тканини на внутрішній зв'язок. Внутрішній зв'язок згідно з EN 319 призначений для тестування матеріалів на основі деревинних частинок. Вважається простим тестом і може використовуватися для оцінки перпендикулярної міцності на розрив фанери. Оцінено можливості використання армованої фанери, використовуючи меншу підготовку до тестування порівняно з EN 314. Не можна було вказати кореляції між міцністю на зріз і внутрішнім зв'язком. Порівняння схеми розриву при визначенні міцності

на зріз і внутрішнього зв'язку виявило схожість за режимом руйнування. Але варто врахувати вплив на досліджуваний зразок під час підготовки та тестування. По-перше, вплив температури (>200 °C) під час склеювання зразків до алюмінієвого металевого блоку, що спричиняє напруження в поверхневих шарах через різкі температурні перепади. По-друге, накладання клею на зовнішній стороні зразка в напрямку розтягу. Це два потенційні моменти, які можуть викликати упередження стосовно результатів тесту, поряд з іншими факторами.

Основним з'єднуючим елементом для конструктивних деревинних матеріалів, таких як фанера, є шурупи. Тому стійкість до витягування шурупів є одним із важливих факторів для деревинних матеріалів, що використовуються у будівництві. Середнє значення опору витягу шурупа варіанту А становило 263,70 Н/мм, що є вищим на 23,52 Н/мм (+9,79%) порівняно з контрольним варіантом середнім показником 240,18. Варіант А+ показав збільшення цього показника на 9,80%. Середнє значення опору витягу шурупа для В і В+ збільшилося на 4,81% та 14,87% відповідно порівняно зі середнім опором витягу гвинта контрольного зразка. Варіант С має зростання на 2,99%, а варіант С+ — на 4,92% (рис.3.6).

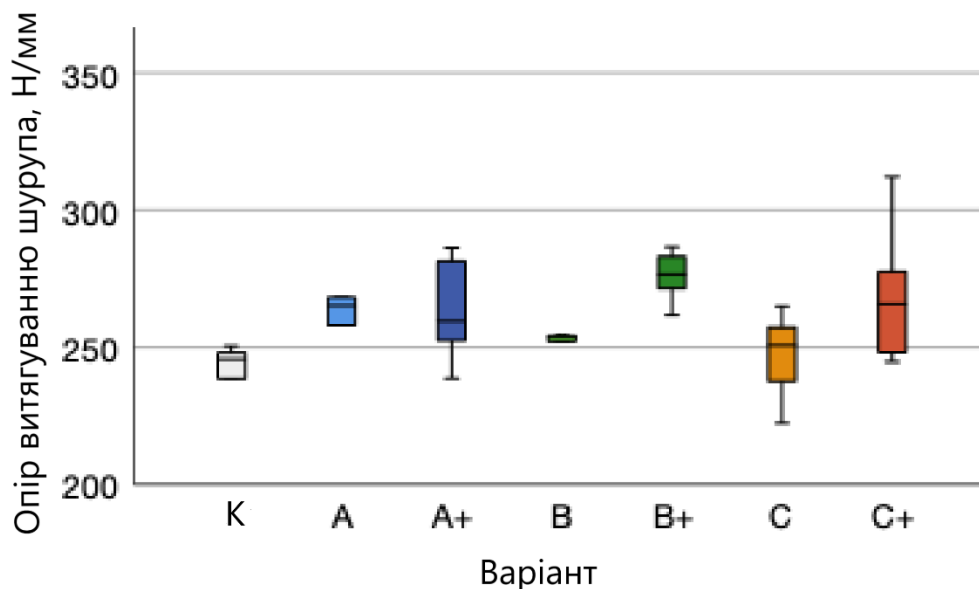


Рис. 3.6. Стійкості до витягування шурупа згідно з EN 320 контрольної фанери та армованої варіантами А, В і С, а також варіантами з більшою кількістю клею А+, В+ і С+

Опір витягуванню шурупа не залежить від виду армування. Збільшення кількості клею підвищує опір витягуванню шурупа. Що стосується типу армування, то помітне незначне покращення показника для льонової тканини порівняно з целюлозою А і В. Порівнюючи різні види армування, можна виявити незначну тенденцію щодо покращення опору витягуванню шурупа із збільшенням кількості клею. Попередня обробка целюлозної тканини впливає на ефективність опору витягуванню шурупа. Додаткова кількість клею збільшує щільність, що позитивно позначається на цьому показнику.

Загалом поведінка целюлозної тканини А схожа з тканиною з льону. Це пов'язано з вищим вмістом целюлози в льоні та подібною гідрофільною поведінкою, а також із в'язучою дією карбамідоформальдегідної смоли. Гідрофобна попередня обробка покращує міцність на розрив (10–11%), міцність на зріз (7–16%), опір витягуванню шурупа (11–15%) та модуль розриву (2–0%), але знизила модуль пружності (3–2%) целюлозної тканини В порівняно з контрольними зразками.

Запатентовано винахід створення фанери, яка має ударостійкість, значно більшу, ніж у відомої, звичайної фанери [42], тому підходить для будівництва яхт. Між листами шпону 5 та 7 розташована тканина (шар 6 та 8), виготовлена з армованого поліетиленового волокна, бажано Dyneema або подібної тканини. Щільність тканини Dyneema SK 60 – 160 г/м² (рис.3.7).

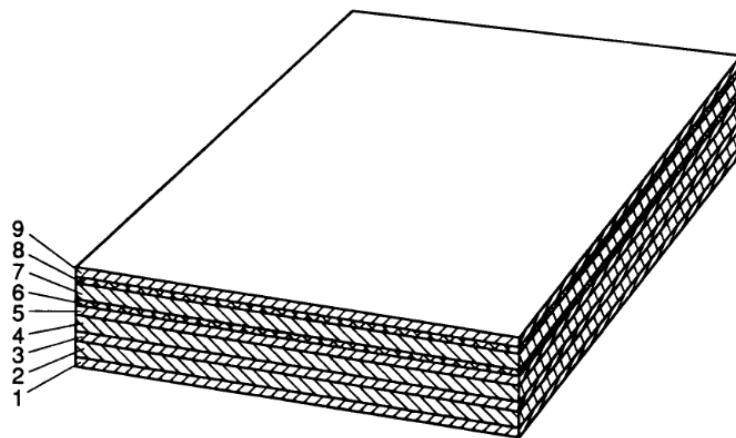


Рис.3.7. Схема розташування шарів у армованій фанері

Для склеювання тканини використовували комбінацію полівінілацетатного клею, який комерційно доступний під торговою маркою Vylok 1026, з ізоціанатним затверджувачем. Відсоток використаного затверджувача становив приблизно 6%, а кількість клею – приблизно 150 г/м². Коли шар тканини розміщували між двома листами шпону, клей наносили на сторони шпону, звернені до тканини, а потім тканину приклеювали до обох листів під тиском стискання 10 кг/м². Для склеювання листів шпону, які безпосередньо прилягають один до одного, тобто без проміжного шару тканини, використовували звичайну техніку склеювання для виготовлення фанери. За таких параметрів досягається найбільша ударостійкість фанери. Якщо збільшити витрату клею з 150 г/м² до 200 г/м², ударостійкість зменшується з 5,6 Нм до 4,6 Нм за інших рівних умов, що показує, що висока ударостійкість досягається лише при використанні найменшої можливої кількості клею, достатньої саме для отримання належного зчеплення тканини з сусідніми шарами деревини.

3.2. Використання клеїв в процесі виготовлення армованої фанери

У роботі [18] досліджено вплив стандартних промислових клеїв, таких як карбамідоформальдегідний, меламінокарбамідоформальдегідний, поліуретановий, ізоціанатний преполімер на основі метилендифенілдіізоціанату (МДІ) (PU-AN) та епоксидної смоли на механічні властивості (модуль пружності, модуль пружності на розрив, міцність на згин, міцність на розтяг, міцність на зріз, опір витягуванню гвинта) фанери з бука (*Fagus sylvatica* L.), армованої тканиною із лляного волокна та скловолокном.

Виготовляли п'ятишарову фанеру. Товщина букового шпону становила 2,2 мм. Для армування використовували лляну тканину та скловолокно. Лляна тканина – товщиною 0,4 мм, щільністю 1,27 г/см³ та витрата 200 г/м². Скловолокно – товщиною 0,5 мм та витрата 200 г/м². На рис.3.8 подано вигляд лляної тканини та скловолокна, які використовувалися у дослідженні, а також схему укладання шарів у пакеті.



а

б

Рис.3.8. а – лляне волокно та скловолокно; б – схема укладання шарів у пакеті

У таблиці 3.2 подано витрати при застосуванні різних клеїв для виготовлення фанери.

Таблиця 3.2.

Витрата клею

Клей	Тип армування	Витрата клею
		(г/м ²)
Епоксидний	без армування тканина із лляного волокна скловолокно	200
Карбамідоформальдегідний		160
Меламінокарбамідоформальдегідний		300
Ізоціанатний преполімер на основі метилендифенілдіізоціанату (МДІ) PU-AN		200
Поліуретановий PUR		150

Для склеювання шпону та лляної та скловолокнистої тканини використовували п'ять різних комерційно доступних та промислово застосовуваних клеїв. Використовували епоксидну смолу *SR GreenPoxy 56* із

затверджувачем SD 7561. Технічні характеристики: щільність 1,198 г/см³ та 0,971 г/см³ відповідно, в'язкість 0,7 Па·с та співвідношення смола/затверджувач 100:36 г (час пресування 13 год, температура 20 °С). Кількість нанесення клею на одну клейову лінію 200 г/м².

Поліуретановий клей (PUR) *Polyurethan 501 Kleiberit* щільністю 1,13 г/см³ та в'язкістю 7,50 Па·с (час пресування 1 год, температура 20 °С, тиск 0,6 Н/мм²). Витрата клею 150 г/м².

Використовувався преполімерний клей на основі ізоціанатного MDI *PUR system 2010 AkzoNobel* (PU-AN) щільністю 1,160 г/см³ та в'язкістю від 6,0 до 19,0 Па·с (час пресування 22 хв, температура 20 °С, тиск 2 Н/мм²). Витрата клею 200 г/м².

Карбамідоформальдегідний клей (UF) *1274 Akzo Nobel* із затверджувачем 2545 Akzo Nobel щільністю 1,300 г/см³ та 1,450 г/см³ відповідно, в'язкість 1,5 – 3,5 Па·с/ 2,0 – 10,0 Па·с. Співвідношення смола/затверджувач 100:20 г (час пресування 10 хв, температура 90 °С, тиск 1,8 Н/мм²). Витрата клею 160 г/ м².

Меламінсечовиноформальдегідний клей (MUF) *1247 Akzo Nobel* із затверджувачем 2526 Akzo Nobel, щільністю 1,270 г/см³ відповідно 1,070 г/см³, в'язкістю 10 – 25 Па·с/1,7 – 2,7 Па·с та співвідношенням смола/затверджувач 100:50 г (час пресування 12 хв, температура 65 °С, тиск 2 Н/мм²). Витрата клею 300 г/ м².

Товщина одержаної фанери становила: звичайної – 10 мм, армованої - 11,2 мм. властивості фанери подано у таблиці 3.3.

Як видно з таблиці 3.3 межа міцності на розтяг при застосуванні тканини льону вища лише для епоксидної смоли. Для усіх решта клеїв цей показник менший, ніж при виготовленні фанери без армування.

Що стосується межі міцності на зріз армованої фанери льоном, то вищі за звичайну фанеру показники показали зразки, склеєні епоксидним, карбамідоформальдегідним та меламінокарбамідоформальдегідним клеями.

Зразки, армовані льоном, склеєні епоксидним клеєм, мають міцність більшу на 8,4% та відповідно на 3,7%, армовані скловолоком порівняно із середнім значенням для контрольних зразків. Фанера, армована льоном, склеєна карбамідоформальдегідним клеєм, має вищу міцність на зріз на 17,0%. Армована льоном та склеєна меламінокарбамідоформальдегідним клеєм фанера має міцність вищу на 2,5%. Середнє значення міцності на зріз фанери, армованої льоном, склеєної ізоціанатним MDI-преполімерним клеєм (PU-AN), 7,20 Н/мм², зменшилося на 5,4% порівняно із середнім значенням для неармованого контрольного зразка 7,61 Н/мм².

Таблиця 3.3.

Властивості одержаної фанери

Клей	Армування	Щільність (г/см ³)	Вологість, %	Межа міцності на розтяг, Н/мм ²	Межа міцності на зсув (зріз), Н/мм ²	Модуль пружності (MOE), Н/мм ²	Модуль на розрив (MOR), Н/мм ²	Опір витягуванню шурупа, Н/мм	Максимальне зусилля витягування шурупа, кН
Епоксидний	без армування	0,80	9,83	76,47	6,28	11738	99,30	241,78	2,643
	льон	0,84	9,46	83,50	6,81	12071	113,57	266,28	3,173
	скловолоконно	0,87	8,03	88,81	6,51	11772	109,99	274,36	3,058
Карбамідоформальдегідний	без армування	0,78	10,27	93,16	5,47	11259	114,84	217,53	2,322
	льон	0,81	10,33	90,51	6,40	11056	112,15	232,79	2,627
Меламінокарбамідоформальдегідний	без армування	0,79	11,85	86,78	6,29	10917	99,44	213,04	2,292
	льон	0,84	11,42	79,64	6,45	11620	105,58	233,37	2,665

Клей	Армування	Щільність (г/см ³)	Вологість, %	Межа міцності на розтяг, Н/мм ²	Межа міцності на зсув (зріз), Н/мм ²	Модуль пружності (MOE), Н/мм ²	Модуль на розрив (MOR), Н/мм ²	Опір витягуванню шурупа, Н/мм	Максимальне зусилля витягування шурупа, кН
Метилендіфенілдіізоціанату (МДІ) PU-AN	без армування	0,77	10,45	94,47	7,61	9530	95,65	229,14	2,444
	льон	0,82	9,75	85,32	7,20	9384	97,50	228,36	2,638
Поліуретановий PUR	без армування	0,79	10,04	95,46	6,74	11962	110,87	241,56	2,605
	льон	0,79	8,84	78,25	6,39	10477	91,64	211,56	2,488

Міцність склеювання шпону головним чином визначається властивостями клеїв. Усі зразки перевищили граничне значення 1 Н/мм² для середнього значення міцності на зріз, зазначеного в EN 314-2 [43]. Наприклад, середнє значення міцності на зріз неармованої волоконною букової фанери, склеєної карбамідоформальдегідним клеєм становило 5,47 Н/мм², що є досить високим значенням. Карбамідоформальдегідний клей виявився задовільним для склеювання фанери, армованої лляним волокном. Меламінокарбамідоформальдегідний та клей на основі метилендіфенілдіізоціанату (МДІ) PU-AN продемонстрували прийнятні покращення. Карбамідоформальдегідний клей широко використовується для виробництва фанери завдяки низькій ціні, високій міцності склеювання та бажаній водостійкості. Порівняння між льоном та скловолокном при використанні епоксидної смоли вказує на те, що льон добре підходить для армування. Один із методів покращення продуктивності склеювання між лляним волокном та епоксидною смолою наведено у роботі [44], де запропоновано

використання наностержнів оксиду цинку (ZnO). Зниження міцності при використанні поліуретанового клею PUR може вказувати на проблеми із нанесенням клею під час виробничого процесу і потребує подальшого дослідження щодо його придатності із армуванням льняним волокном. Це пов'язано з тим, що клеї на основі поліуретану зазвичай використовуються для різних видів застосування завдяки відмінній міцності зчеплення, швидкому затвердінню та стійкості до впливу навколишнього середовища [45]. Одним із пояснень слабкої ефективності склеювання може бути те, що на зв'язування натуральних волокон сильно впливає їхнє лігноцелюлозне походження та властивий їм гідрофільний характер, що спричиняє слабке зв'язування між волокном та полімерним клеєм [46]. Це узгоджується зі зниженням вологості після виробництва на 15% для поліуретанового клею порівняно з неармованою фанерою, демонструючи найнижче значення вологості – 8,84% для зразків, армованих льняним волокном.

На модуль пружності MOE та модуль на розрив MOR суттєво впливає тип клею, який використовується, тоді як волокнисте армування загалом не мало суттєвого впливу.

Порівнюючи модуль пружності, то при армуванні льняним волокном він збільшився на 2,6% і відповідно на 0,3% для зразка, армованого скловолокном при використанні епоксидної смоли. Середнє значення MOE для фанери, армованої льняним волокном, склеєної карбамідоформальдегідним клеєм, зменшилося на 2,3%. Зразок, армований льняним волокном, склеєний меламінокарбамідоформальдегідним клеєм, показав збільшення модуля пружності на 6,5%. Модуль пружності фанери, армованої льняним волокном, склеєної PU-AN, збільшився на 8,9%, а модуль пружності зразка, армованого льняним волокном і склеєного поліуретаном, зменшився на 11,2%.

Модуль на розрив (MOR) зразка, армованого льняним волокном, склеєного епоксидною смолою, збільшився на 16,65% відповідно та на 11,09% для зразка, армованого скловолокном. MOR для зразка, армованого льняним волокном, з

використанням карбамідоформальдегідної смоли, знизився на 2,91%. Фанера, армована льняним волокном на основі меламінокарбамідоформальдегідної смоли, показала збільшення MOR на 4,65%. Зразок, армований льняним волокном на основі ізоціанату MDI, мав кращі показники MOR на 8,20%, а для зразків із поліуретановим клеєм – гірші на 14,72%.

Вплив волокнистого армування, тип клею, а також взаємодія цих факторів мають значний вплив на опір витягуванню шурупа (ОПШ).

Середнє значення ОПШ для зразків, склеєних епоксидною смолою та армованих льоном становило 266,28 Н/мм, що збільшилося на 10,13% та армованих скловолокном – на 13,48% порівняно з контрольним значенням 241,78 Н/мм. Середнє значення ОПШ для зразків, армованих льоном, склеєних карбамідоформальдегідною смолою становило 232,79 Н/мм, що є більшим на 7,02% порівняно з контрольним значенням 217,53 Н/мм. Середнє значення ОВШ для зразків, армованих льоном і склеєних меламінокарбамідоформальдегідною смолою становило 233,37 Н/мм, що є більшим на 9,54% порівняно з контрольним значенням 213,04 Н/мм. Для зразків на основі ізоціанатного MDI (PU AN) армованих льняним волокном середнє значення ОВШ становило 228,36 Н/мм², що є меншим на 0,34%. Середнє значення ОВШ для зразка, армованого льняним волокном, склеєного поліуретановим клеєм, становило 211,56 Н/мм². Це значення на 12,42% менше порівняно з контрольним середнім значенням 241,56 Н/мм².

Максимальне зусилля витягування шурупа F_{max} (МЗВШ), яке спостерігалось для фанери, армованої льоном та склеєної епоксидною смолою, збільшилося на 20,05%, а для фанери, армованої скловолокном – на 15,70%. Для фанери, армованої льоном і склеєної клеями карбамідоформальдегідним та меламінокарбамідоформальдегідним, цей показник збільшився на 13,14% та 16,27% відповідно. При використанні ізоціанатного MDI (PU AN) максимальне зусилля витягування шурупа є вищим на 7,94%, тоді як при використанні поліуретану – меншим на 4,49%.

Між щільністю та опором витягуванню шурупа існує залежність – із збільшенням щільності та покращується опір витягуванню шурупа.

Загалом, міцність на витягування шурупа залежить від довжини проникнення шурупа, його діаметра, кута між напрямком шурупа та деревинного волокна, породи деревини, вологості деревини та температури. Це демонструє, що ОВШ, який розміщений перпендикулярно відносно деревинного волокна, має найвищі значення.

Загалом, для шаруватих композитних конструкцій на основі деревини, розташування волокнистого армування впливає на ОВШ, яке можна комбінувати і розміщувати як поблизу серцевинних шарів фанери, так і в поверхневих шарах [47]. Це також підтверджується результатами максимального зусилля витягування шурупа F_{max} у інших роботах. Так, цей показник збільшується на 14%, якщо волокнисте армування розташоване на поверхні в межах зовнішніх клейових шарів п'ятишарової (товщина шпону 2,7 мм) фанери з тополі, склеєної фенолоформальдегідним клеєм і армованої склотканиною.

Збільшення щільності не є єдиним фактором, що впливає на ОВШ. Необхідно враховувати якість клейового шва. Так зразки з використанням поліуретану показали менші значення ОВШ та максимального зусилля витягування шурупа F_{max} , що є наслідком поганої якості клейового шва. Потрібно також враховувати характеристику волокон та тканин, а також звертати увагу на поведінку шурупа під час витягування всередині матриці волокно-клей та навколишніх шарів шпону.

3.3. Висновки

Армування фанери волокном є універсальним та ефективним способом покращення її механічних властивостей та експлуатаційних характеристик, що робить її придатною для широкого спектру використання у різних галузях промисловості. Отриманий композиційний матеріал краще підходить для

застосування у конструкціях, де потрібна вища міцність та жорсткість. Він більш стійкий до зовнішніх сил, таких як удари важких предметів або механічні навантаження. Це особливо корисно в тих сферах застосування, де довговічність та стійкість до пошкоджень є важливими, наприклад, у будівництві, транспорті або морській промисловості. Додавання армуючих волокон подовжує термін експлуатації та довговічність фанери, зробивши її більш стійкою до факторів навколишнього середовища, таких як вологість та коливання температури. Це може продовжити термін служби матеріалу та зменшити потребу в частій його заміні або ремонті. Крім того, армування волокном дозволяє виробляти легку фанеру із співрозмірною міцністю та жорсткістю порівняно зі звичайною фанерою. Це може бути перевагою в тих сферах, де вага є критично важливою, наприклад, в аерокосмічній, автомобільній або транспортній промисловості. Змінюючи тип, орієнтацію та об'ємну частку армуючих волокон, можна оптимізувати такі характеристики, як міцність, жорсткість, гнучкість та ударостійкість, відповідно до цільового використання. Це дозволяє адаптувати властивості фанери до конкретних вимог до експлуатаційних характеристик для різних сфер застосування. Що стосується сталого використання деревинної сировини, то збільшення використання фанери, армованої натуральним волокном, у різних сферах зробило б значний внесок у досягнення цієї мети.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу літературних джерел можна зробити такі висновки.

У роботі розглянуто фанеру як багат шаровий деревинний композиційний матеріал, наведено її основні властивості та класифікацію відповідно до чинних нормативних документів. Показано, що завдяки перехресному розташуванню шарів шпону фанера характеризується підвищеною міцністю, стабільністю розмірів і більш однорідними механічними властивостями порівняно з масивною деревиною.

Встановлено, що, попри свої переваги, фанера має обмеження, зумовлені анізотропією деревини та наявністю дефектів у шпоні, що знижує її довговічність при складних навантаженнях. Обґрунтовано доцільність армування як ефективного способу покращення фізико-механічних характеристик фанери. Армування забезпечує перерозподіл напружень у матеріалі, підвищує міцність, жорсткість і тріщиностійкість, а також розширює сфери її застосування.

Проаналізовано та класифіковано матеріали, що застосовуються для армування фанери, за походженням, формою введення та функціональним призначенням. Показано, що використання армувальних матеріалів є ефективним способом підвищення міцності, жорсткості, зносостійкості та довговічності фанери.

Встановлено, що синтетичні та мінеральні волокна (скловолокно, базальтове, вуглецеве, арамідне) забезпечують найбільше покращення механічних властивостей, тоді як металеві сітки переважно виконують захисну функцію. Натуральні рослинні волокна (льон, коноплі, бамбук, кенаф, джут) є екологічною альтернативою, проте потребують додаткової обробки через високу гігроскопічність.

Зроблено висновок, що вибір армувального матеріалу та способу його введення повинен здійснюватися з урахуванням умов експлуатації та вимог до властивостей армованої фанери, що є основою для подальших експериментальних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tautenhain F.; Rinberg R.; Kroll L. Novel lightweight semi-finished products made of poplar veneer plywood with basalt fibre reinforcement. *Key Eng. Mater.* 2019, 809, 645–649.
2. Cakiroglu E.O.; Demir A.; Aydin I. Comparison of birch and beech wood in terms of economic and technological properties for plywood manufacturing. *Drv. Ind.* 2019, 70, 169–174.
3. Wang T.; Wang Y.; Crocetti R.; Wålinder M. In-plane mechanical properties of birch plywood. *Constr. Build. Mater.* 2022, 340, 127852.
4. ДСТУ EN 313-1:2003 «Фанера. Класифікація та термінологія. Частина 1. Класифікація» // Національний стандарт України. — К. : Держспоживстандарт України, 2003. — https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSTU3/dstu_EN_313-1-2003.pdf.
5. Bodig J., Jayne B. A. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. — New York : Van Nostrand Reinhold, 1982. — 712 p.
6. Forest Products Laboratory. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. — Madison : U.S. Department of Agriculture, 2010. — 508 p.
7. Rowell R. M. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. — 2nd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2013. — 703 p.
8. Dinwoodie J. M. *Timber: Its Nature and Behaviour*. — 2nd ed. — London : E & FN Spon, 2000. — 257 p.
9. Song Y.-J.; Lee I.-H.; Hong S.-I. An evaluation of strength performance of the edge connections between cross-laminated timber panels reinforced with glass fiber-reinforced plastic. *Bioresources* 2019, 14, 7719–7733.
10. Maloney T. M. *Modern Particleboard and Dry-Process Fiberboard Manufacturing*. — San Francisco : Miller Freeman Publications, 1993. — 689 p.
11. Niemz P., Sonderegger W. *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. — München : Carl Hanser Verlag, 2017. — 560 p.

12. Xu H., Nakao T., Tanaka C., Yoshinobu M., Katayama H. Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood // Journal of Wood Science. — 1998. — Vol. 44, No. 4. — P. 343–347.

13. Копей Б.В.; Юй Шуанжуй; Стефанишин А.Б. Перспективи застосування вуглепластикових та гібридних насосних штанг. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ 2017. № 4(65). – ст. 40-46.

14. Які є різновиди тканини з арамідного волокна / <https://ua.carbonfabriczd.com/news/what-are-the-varieties-of-aramid-fiber-fabric-71769482.html>.

15. Арамід: історія створення та використання в бронежилетах / <https://balistyka.ua/articles/aramid-istoriya-stvorenniya-ta-vykorystannya-v-bronezhyletakh>.

16. Omrani P.; Abdolzadeh H.; Roshan F.; Ganjkhani M. Applicational properties of reinforced plywood with nanomaterials and kenaf fiber. Bioresources 2023, 18, 7054–7065.

17. Jorda J.; Kain G.; Barbu M.-C.; Köll B.; Petutschnigg A.; Král P. Mechanical properties of cellulose and flax fiber unidirectional reinforced plywood. Polymers 2022, 14, 843.

18. Jorda J., Kain G., Barbu M.-C., Petutschnigg A., Kral P. Influence of adhesive systems on the mechanical and physical properties of flax fiber reinforced beech plywood // Polymers. – 2021, 13(18), 3086; <https://doi.org/10.3390/polym13183086>.

19. Auriga R.; Gumowska A.; Szymanowski K.; Wronka A.; Robles E.; Ocipka P.; Kowaluk G. Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers. Compos. Struct. 2020, 248, 112533.

20. Kramár S.; Král P. BFRP plywood coating. Bioresources 2019, 14, 2062–2078.

21. Lohmus R.; Kallakas H.; Tuhkanen E.; Gulik V.; Kiisk M.; Saal K.; Kalamees T. The effect of prestressing and temperature on tensile strength of basalt fiber-reinforced plywood. Materials 2021, 14, 4701.

22. Karri R.; Lappalainen R.; Tomppo L.; Yadav R. Bond quality of poplar plywood reinforced with hemp fibers and lignin-phenolic adhesives. *Compos. Part C Open Access* 2022, 9, 100299.
23. Kramár S.; Trcala M.; Chitbanyong K.; Král P.; Puangsin B. Basalt-fiber-reinforced polyvinyl acetate resin: a coating for ductile plywood panels. *Materials* 2019, 13, 49.
24. Sankar A.; Sajan S. Manufacturing of high strength plywood composites reinforced with copper fibers. *Mater. Today Proc.* 2021, 47, 5255–5259.
25. Jamshaid H.; Mishra R.K.; Chandan V.; Nazari S.; Shoaib M.; Bizet L.; Jirku P.; Muller M.; Choteborsky R. Hybrid thermoplastic composites from basalt- and kevlar-woven fabrics: comparative analysis of mechanical and thermomechanical performance. *Polymers* 2023, 15, 1744.
26. Kufel A.; Kuciel S. Basalt/wood hybrid composites based on polypropylene: morphology, processing properties, and mechanical and thermal expansion performance. *Materials* 2019, 12, 2557.
27. Wdowiak-Postulak A.; Gocál J.; Bahleda F.; Prokop J. Load and deformation analysis in experimental and numerical studies of full-size wooden beams reinforced with prestressed frp and steel bars. *Appl. Sci.* 2023, 13, 13178.
28. Bal B.C. screw and nail holding properties of plywood panels reinforced with glass fiber fabric. *Cerme* 2017, 23, 11–18.
29. Liu Y.; Guan M. Selected physical, mechanical, and insulation properties of carbon fiber fabric-reinforced composite plywood for carriage floors. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2019, 77, 995–1007.
30. Mayer A.K.; Mai C. Basalt grid reinforcement of wood-based panels. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2024, 82, 669–681.
31. Núñez-Decap M.; Barra-Rodríguez Y.; Opazo-Carlsson C.; Moya-Rojas B.; Vidal-Vega M.; Opazo-Vega A. Use of carbon and basalt fibers with adhesives to improve physical and mechanical properties of plywood. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5114.
32. Ramkumar V.R.; Anand N.; Prakash V.; Sujatha D.; Murali G. Experimental study on the performance of fiber-reinforced laminated veneer lumber

produced using melia dubia for structural applications. *Constr. Build. Mater.* 2024, 417, 135325.

33. Bal B.C.; Bektaş İ.; Mengeloğlu F.; Karakuş K.; Ökkeş Demir H. Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric. *Constr. Build. Mater.* 2015, 101, 952–957.

34. Popovska V.J.; Iliev B. Janka hardness of plywood reinforced with fiberglass prepregs. *Int. J.—Wood Des. Technol.* 2022, 11, 48–54.

35. Saal K.; Kallakas H.; Tuhkanen E.; Just A.; Rohumaa A.; Kers J.; Kalamees T.; Lohmus R. Fiber-Reinforced Plywood: Increased Performance with Less Raw Material. *Materials* 2024, 17, 3218. <https://doi.org/10.3390/ma17133218>.

36. Ashori A.; Ghofrani M.; Rezvani M.H.; Ayrilmis N. Development and material properties of reinforced plywood using carbon fiber and waste rubber powder. *Polym. Compos.* 2018, 39, 675–680.

37. Mei C.; Zhou D. Study on glass fiber reinforced poplar plywood used for concrete form. *China For. Sci. Technol.* 2009, 23, 79–82.

38. Moezzi-pour B.; Ahmadi M.; Moezzi-pour A. Physical and mechanical properties of reinforced plywood with natural fibers. *J. Indian Acad. Wood Sci.* 2017, 14, 70–73.

39. Xu H.; Nakao T.; Tanaka C.; Yoshinobu M.; Katayama H. Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood. *J. Wood Sci.* 1998, 44, 343–347.

40. Kumar H.; Dutt M. Investigational study and valuation of mechanical properties of woven and chopped basalt fibre strengthen composites. *J. Mater. Sci. Manuf. Technol.* 2019, 4, 23–37.

41. Muzyczek M. The use of flax and hemp for textile applications. In *handbook of natural fibres*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; pp. 147–167.

42. EP0564044A1. European Patent Office. Impact-resistant plywood and method for the manufacture thereof. Pieter Hubert Van Den Berg; 1993-03-30 Application filed by BRUYNZEEL MULTIPANEL BV; 1993-10-06 Publication of

EP0564044A1.<https://patents.google.com/?inventor=Pieter+Hubert+Van+Den+Berg&peid=6437e25c31c60%3Aae%3Af65ee68>.

43. EN 314-2: 1993. Plywood–Bonding Quality–Part 2: Requirements. [Published 1993-15-04]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization, 1993. 12 p.

44. Sbardella F.; Lilli M.; Seghini M.; Bavasso I.; Touchard F.; Chocinski-Arnault L.; Rivilla I.; Tirillò J.; Sarasini F. Interface tailoring between flax yarns and epoxy matrix by ZnO nanorods. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2021, 140, 106156.

45. Dodangeh F.; Dorraji M.S.; Rasoulifard M.; Ashjari H. Synthesis and characterization of alkoxy silane modified polyurethane wood adhesive based on epoxidized soybean oil polyester polyol. *Compos. Part B Eng.* 2020, 187, 107857.

46. Martínez L.M.T.; Kharissova O.V.; Kharisov B.I. (Eds.) *Handbook of Ecomaterials*; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2019.

47. Liu Y.; Guan M. Selected physical, mechanical, and insulation properties of carbon fiber fabric-reinforced composite plywood for carriage floors. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2019, 77, 995–1007.