

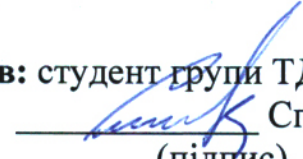
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

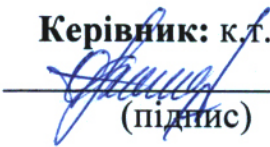
Навчально-науковий інститут деревообробних технологій та дизайну

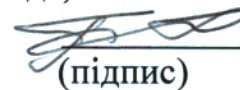
Кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів,
целюлози та паперу

УДК 630*816.2

Пояснювальна записка
до дипломної роботи магістра на тему:
**Аналіз сировинної бази для виготовлення
деревинно-полімерних матеріалів плоским
способом пресування**

Виконав: студент групи ТДКМ-61м
 Співак Б.А.
(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент ТДКМ
 Ортинська Г.Є.
(підпис)

Рецензент: к.т.н., доц. каф. ТЗНСД БТД
(посада, вчене звання, науковий ступінь)
 / Соляр Т.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

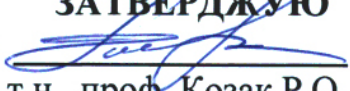
Львів – 2025

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 .

ЗАТВЕРДЖУЮ

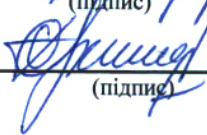
Завідувач 
д.т.н., проф. Козак Р.О.
“ 22 ” грудень 2025 року

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

Співаку Борису Анатоліовичу .

1. Тема роботи Аналіз сировинної бази для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів плоским способом пресування к.т.н., доцент ТДКМ Ортинська Галина Євгенівна затверджені наказом університету від “28” жовтня 2024 року № С-846 .
2. Термін подання студентом роботи 22.12.2025 р. .
3. Вихідні дані до роботи: Проаналізувати тенденції розвитку виробництва деревинних полімерних матеріалів; методи виготовлення деревинно-полімерних матеріалів. Розглянути сировину, що можна застосовувати для виготовлення ДПМ, а також проаналізувати їхній вплив на властивості ДПМ .
 1. Стан питання та завдання дослідження
 2. Сировинна база для виробництва деревинно-полімерних матеріалів
 3. Роль сировини у формуванні властивостей деревинно-полімерних матеріалів
 4. Висновки та рекомендації
5. Дата видачі завдання 25.07.2024 р. .

Студент  (підпис) Співак Б.А. .

Керівник роботи  (підпис) Ортинська Г.Є. .

АНОТАЦІЯ

У дипломній роботі магістра на тему «Аналіз сировинної бази для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів плоским способом пресування», наведено тенденції розвитку виробництва деревинних полімерних матеріалів, проаналізовано їх способи виробництва. Проаналізовано сировину, що може застосовуватися для виробництва деревинно-полімерних матеріалів та її вплив на властивості кінцевого продукту.

Дипломна робота магістра складається з трьох розділів.

У першому розділі проаналізовано стан та перспективи розвитку деревинно-полімерних матеріалів. Проаналізовано способи виготовлення ДПМ. Наведено їх основні переваги та недоліки.

У другому розділі наведено сировинну базу для виробництва деревинно-полімерних матеріалів, зокрема лігно-целюлозну сировину, термопласти та модифікувальні речовини для виготовлення ДПМ. Охарактеризовано їх основні властивості.

У третьому розділі приведено вплив сировини на властивості деревинно-полімерні властивості.

Також наведено висновки та рекомендації, список використаної літератури та додатки.

Загальний обсяг дипломної роботи складає 77 сторінки, з них 63 сторінок основного тексту, список літератури із 104 назв та 1 додатку.

Ключові слова: деревинно-полімерні матеріали, деревинна стружка, волокно, ізико-механічні властивості, сировина.

Матеріали магістерської роботи доповідались і обговорювались на 77-ій студентській науково-практичній конференції Навчально-наукового інституту деревообробних технологій і дизайну, м. Львів, 2025.

ЗМІСТ

		Стор.
	ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ		7
1.1.	Тенденції розвитку виробництва деревинних полімерних матеріалів	7
1.2.	Аналіз методів виготовлення деревинно-полімерних матеріалів	12
1.3.	Нормативна база для деревинно-полімерних матеріалів	20
1.4.	Висновки	23
РОЗДІЛ 2. СИРОВИННА БАЗА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ		25
2.1	Лігно-целюозна сировина для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів	25
2.2.	Термопласти як полімерна матриця деревинно-полімерних матеріалів	34
2.3.	Модифікувальні добавки у виготовленні деревинно-полімерних матеріалів	46
РОЗДІЛ 3. РОЛЬ СИРОВИНИ У ФОРМУВАННІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ		51
3.1.	Вплив наповнювача на властивості деревинно-полімерних матеріалів	51
3.2.	Стабілізування впливу ультрафіолетового випромінювання на деструкцію деревинно-полімерних матеріалів	59
3.3.	Шляхи підвищення вогнестійкості деревинно-полімерних матеріалів	60
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.		63
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ		65
ДОДАТКИ		77

ВСТУП

Деревинно-полімерні матеріали (ДПМ) є новим класом матеріалів, що привертають значну увагу на світовому ринку. Термін ДПМ охоплює широкий спектр композитів, у яких як полімерна матриця можуть використовуватися різні види полімерів – від поліпропілену до полівінілхлориду, а як наповнювачі та зв'язувальні компоненти – деревне борошно, льон та інші волокнисті матеріали. Ці композити розширюють традиційне розуміння “деревинних композитів” – від класичних пресованих матеріалів, таких як стружкові плити та MDF.

Зростання інтересу до безвідходних технологій та повторного використання полімерної й лігно-целюлозної сировини зумовило інтенсивний розвиток виробництва деревинно-полімерних матеріалів у Європі, Північній Америці та Азійсько-Тихоокеанському регіоні. На сучасному етапі ключовими напрямками розвитку галузі є підвищення частки вторинних полімерів у композиціях, застосування альтернативних наповнювачів, зокрема текстильних волокон і твердих відходів, а також оптимізація рецептур для покращення механічних властивостей, стабільності та довговічності матеріалів.

Окремі дослідження як українських науковців, так і зарубіжних фахівців підтверджують можливість створення полімерних композиційних деревинно-наповнених матеріалів на основі первинних і вторинних термопластів та їхню перспективність для застосування у народному господарстві. В Україні дослідження щодо отримання деревинно-полімерних матеріалів (ДПМ) на основі термопластів проводилися, зокрема у Національному лісотехнічному університеті України.

Розроблення таких матеріалів є актуальним завданням, оскільки дає змогу вирішити кілька важливих проблем: по-перше, отримати нові матеріали з комплексом цінних експлуатаційних властивостей; по-друге, забезпечити суттєву економію первинної сировини; по-третє, зменшити

забруднення довкілля завдяки залученню до виробництва полімерних і деревинних відходів, що має істотне економічне значення.

Завдяки глобальному усвідомленню екологічних проблем та необхідності мінімізації викидів шкідливих забруднювальних речовин промисловість деревинних композиційних матеріалів активно впроваджує більш екологічні рішення. Використання перероблених полімерів та відходів деревини робить виробництво деревинних полімерних матеріалів прикладом ресурсоощадної та екологічно орієнтованої технології.

Мета роботи – аналіз сировинної бази для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів плоским способом пресування.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розглянути перспективи розвитку виробництва деревинних полімерних матеріалів та провести аналіз різних способів їх виготовлення;
- проаналізувати сировину та її особливості для виготовлення ДПМ;
- розглянути вплив різних компонентів композиції на властивості ДПМ.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Тенденції розвитку виробництва деревинних полімерних матеріалів

Близько 6,5 мільярдів тонн пластикових та гумових відходів [1], які в основному складаються з полімерних пакетів, масок та пляшок для води, постійно виробляються [2] та викидаються по всьому світу щороку [3]. Як наслідок, харчовий ланцюг морських мешканців та наземних тварин був перерваний через труднощі розкладання цих відходів у природі [4,5].

Наразі існує кілька традиційних спроб вирішити проблему забруднення пластиком, включаючи неконтрольоване захоронення та спалювання або розробку біорозкладного пластику як замітника для використання в повсякденному житті [6–9]. Однак ці методи, ймовірно, спричинять вторинне забруднення або утворення залишків відходів під час виробництва біорозкладного пластику [10,11]. Отже, перетворення пластикових відходів на деревинно-полімерні матеріали (ДПМ) може бути однією з перспективних альтернатив для уникнення вторинного забруднення [12].

ДПМ являє собою різновид біокомпозиту з високою гідростабільністю, який отримують шляхом поєднання деревного волокна та пластикових відходів. Процес виробництва ДПМ включає лиття під тиском, екструзійне лиття, компресійне лиття та гаряче пресування, 3D друк [13].

Порівняно з традиційними клейовими біокомпозитами, ДПМ демонструє переваги відсутності клею та нульової емісії формальдегіду під час процесу виробництва [14, 15]. Ще в 1990-х роках багато країн почали використовувати відходи пластику у повсякденному житті для виробництва ДПМ [16, 17].

Завдяки глобальному усвідомленню екологічних проблем та необхідності мінімізації викидів шкідливих забруднювальних речовин

промисловість деревинних композиційних матеріалів активно впроваджує більш екологічні рішення. Використання перероблених полімерів та відходів деревини робить виробництво деревинних полімерних матеріалів (ДПМ) прикладом ресурсощадної та екологічно орієнтованої технології [18].

Концепція ДПМ не є новою: перші сучасні розробки з'явилися у 1970-х роках, а вже з 1990-х років у Північній Америці їхнє застосування стрімко зросло, насамперед завдяки виробництву настилових систем і перил [19]. У подальші десятиліття відбулося різке розширення сфери застосування та підвищення попиту на ці матеріали у світі.

Глобальний ринок деревинно-полімерних композитів (ДПК) демонструє стійке зростання, оцінюване у мільярди доларів (близько 7,5–8 млрд доларів у 2023–2024 роках). Така динаміка пов'язана зі зростаючим попитом на екологічно безпечні будівельні матеріали, зокрема для настилів, огорож, фасадних панелей, а також із використанням у автомобільному та меблевому секторах. Ключовими драйверами розвитку є екологічні переваги, довговічність, стійкість до біологічних пошкоджень, а також державні ініціативи щодо збільшення частки перероблених компонентів у матеріалах. Провідним регіоном за темпами зростання є Азійсько-Тихоокеанський ринок, тоді як найбільшим і технологічно зрілим залишається ринок Північної Америки, де інновації зосереджені на підвищенні експлуатаційних властивостей та зменшенні маси матеріалів для застосування в електромобілебудуванні.

Деревинні полімерні матеріали являють собою композити, виготовлені на основі рослинних (деревинних або недеревинних) борошен, волокон, тріски, стружки та термопластичних чи термореактивних полімерів із додаванням технологічних модифікаторів і стабілізаторів (рис. 1.1).

ДПМ характеризуються низкою важливих переваг: підвищеними механічними властивостями (міцністю та жорсткістю), меншою щільністю, зменшенням стирання порівняно з композитами з неорганічними наповнювачами [20-22], а також вищою водостійкістю, біостійкістю,

кращими акустичними характеристиками, меншою масою та нижчими виробничими витратами порівняно з масивною деревиною [23, 24]. Завдяки цьому ДПМ широко застосовуються в автомобільній, суднобудівельній та будівельній промисловості.



Рисунок 1.1. Загальний склад ДПМ

У будівельній сфері деревинні полімерні матеріали використовуються дедалі активніше. Вони слугують матеріалом для настилів і покрівельних елементів, а також застосовуються у виготовленні віконних профілів, дверей, меблів та інших конструктивних виробів (рис.1.2). У країнах, що розвиваються, ДПМ часто замінюють масивну деревину в покрівельних та огорожувальних системах завдяки поєднанню високої міцності, вологостійкості та довговічності.

Завдяки значним експлуатаційним і екологічним перевагам деревинно-полімерних матеріалів (ДПМ), обсяг світового ринку цих композитів у 2024 році оцінювався у 7,97 млрд доларів США. За прогнозами аналітичних агентств, ринок зберігатиме високі темпи розвитку, демонструючи середньорічне зростання близько 11,6% у період 2025–2032 років (рис. 1.2). Така динаміка обумовлена зростаючим попитом на стійкі будівельні матеріали, а також збільшенням масштабів реконструкцій і ремонтних робіт у житловому секторі по всьому світу [25-28].

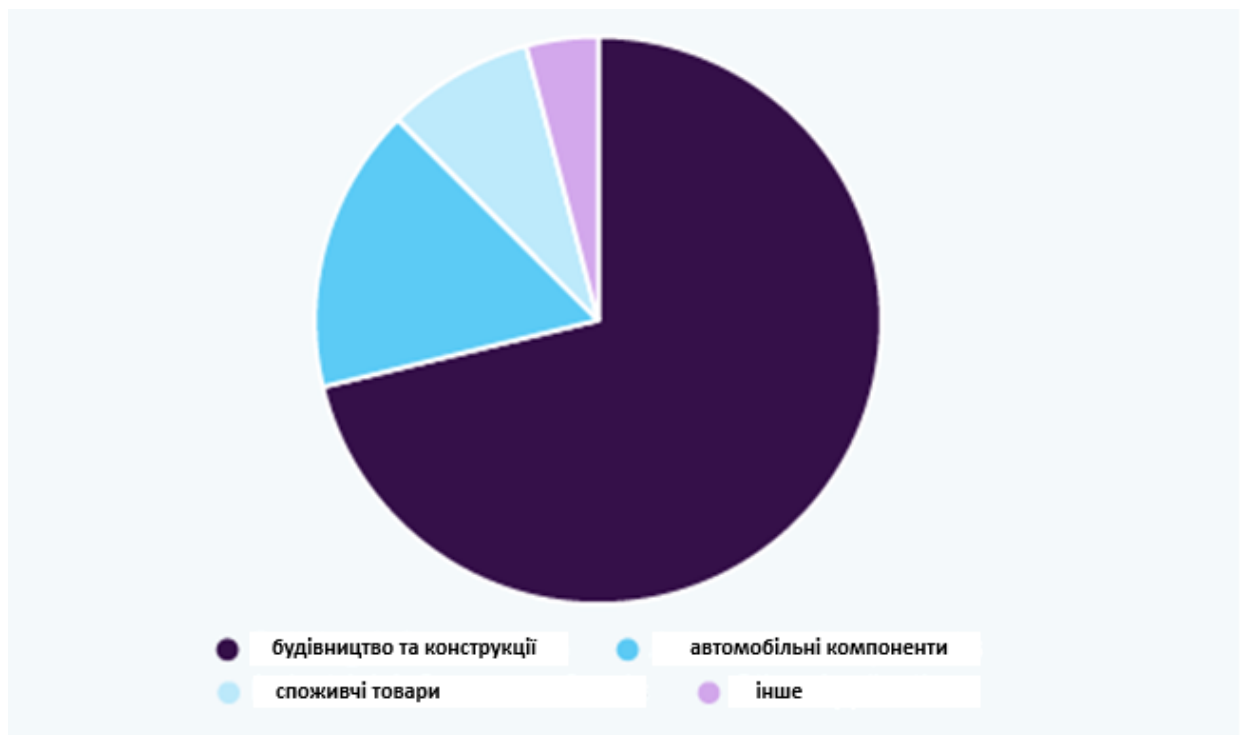


Рисунок 1.2. Сфери застосування ДПМ [28]

Класифікація ринку ДПМ здебільшого базується на типі полімерної матриці, до якої належать поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид та інші термопласти. Сегмент поліетиленових ДПМ привертає особливу увагу як у наукових, так і в промислово-технологічних колах, оскільки поліетилен забезпечує оптимальне поєднання природних властивостей деревини з

технологічністю, хімічною інертністю та достатньою механічною міцністю полімерної основи.

Ринок деревинно-полімерних матеріалів у Сполучених Штатах Америки переживає сильне зростання, зумовлене зростанням тенденцій до ремонту будинків, розширенням житлових приміщень на відкритому повітрі та зростанням споживчої переваги міцних, невибагливих альтернатив традиційній деревині. Виробники інвестують у передові технології екструзії та інтегрують перероблені пластики, дотримуючись цілей сталого розвитку та будівельних норм, що розвиваються. Попит також підтримується швидким впровадженням терас, огорож, поручнів та сайдингу з ДПМ як у житлових, так і в комерційних приміщеннях. Крім того, сильні мережі дистрибуції, інновації продукції та присутність провідних виробників ДПМ продовжують позиціонувати США як домінуючого учасника регіонального ринку (рис. 1.3).

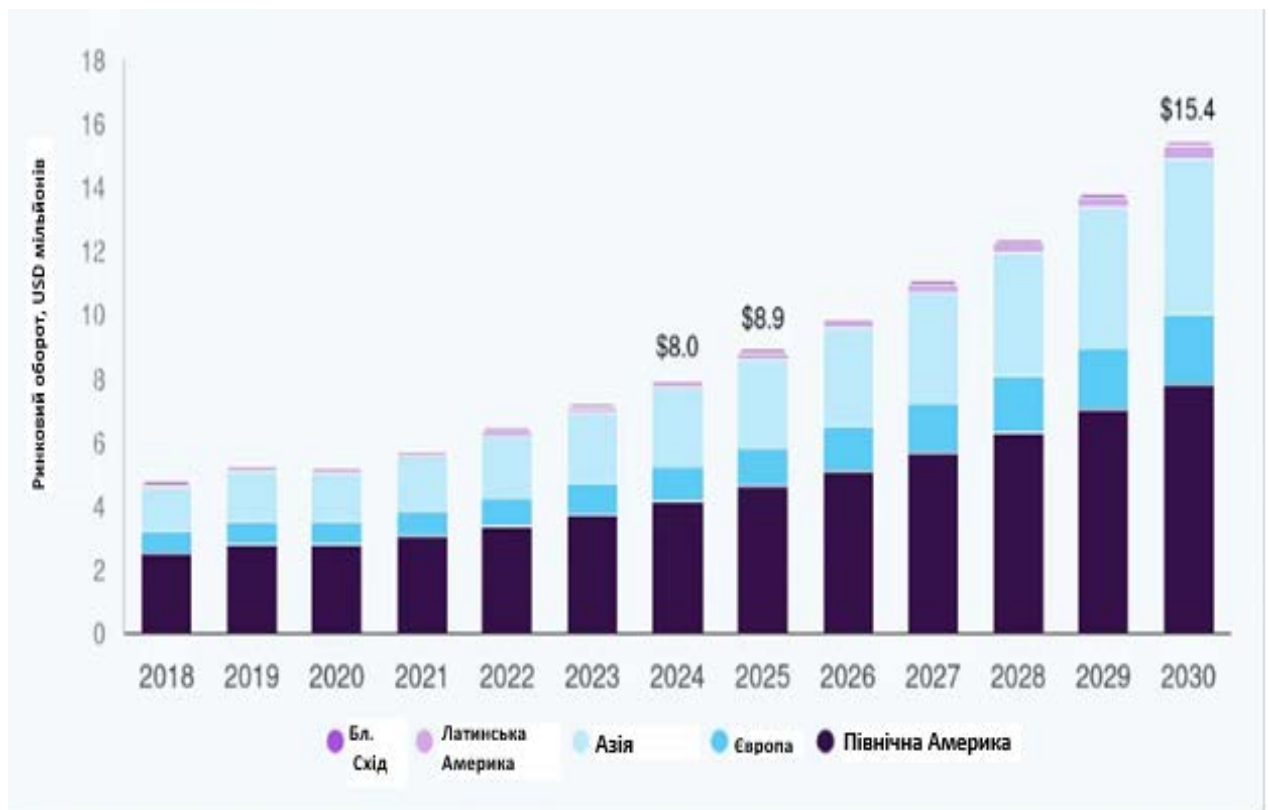


Рисунок 1.3. Прогнозування ринку ДПМ [28]

Тенденції європейського ринку деревинно-полімерних матеріалів

У 2024 році європейський ринок деревинно-полімерних матеріалів оцінювався в 1,12 мільярда доларів США. Очікується, що зростання автомобільної промисловості в регіоні, яка використовує цей продукт для виробництва внутрішньої та зовнішньої обробки, підвищить попит на продукт протягом прогнозованого періоду. Однак даний період досяг стадії зрілості, і, отже, очікується повільне зростання протягом прогнозованого періоду [27, 28].

У 2024 році попит на німецький ринок деревних пластикових композитів склав 247,9 млн доларів США. Очікується, що зростання поширеності електромобілів у Німеччині підвищить попит на продукцію WPC, включаючи декоративні елементи та додаткові полиці, що сприятиме зростанню ринку на позитивній ноті.

Чинники, що сприяють цьому потужному зростанню, включають екологічно чисті властивості матеріалу, його переваги перед традиційними деревинними композиційними матеріалами та зростаючий ринок товарів для зовнішнього застосування. Крім того, ремонт та реконструкції житлових приміщень у поєднанні з широким зростанням будівництва та розвитку інфраструктури в усьому світі просунули ринок ДПМ вперед [18, 28].

Деревинні полімерні матеріали мають дуже високий потенціал і є екологічно чистими матеріалами для досягнення довговічності без надмірного використання токсичних хімічних речовин. У порівнянні з іншими волокнистими матеріалами, рослинні волокна, як правило, придатні для армованого пластику завдяки їх відносно високій жорсткості та міцності, низькій вартості, здатності до біологічного розкладання, низькій щільності, низьким викидам CO₂ та сировині, що щорічно відновлюються.

1.2. Аналіз методів виготовлення деревинно-полімерних матеріалів

Вибір технології виготовлення деревинно-полімерних матеріалів є ключовим етапом виробничого процесу, оскільки він визначається геометричною конфігурацією виробу, його функціональними характеристиками та умовами майбутньої експлуатації. Найбільш поширеними методами отримання ДПМ є (рис. 1.4):

Екструзія. Застосовується для виготовлення погонажних виробів, таких як панелі, плінтуси та профільні елементи. Технологія передбачає пропускання композиції через формувальну фільтру з подальшим охолодженням і стабілізацією геометрії виробу.

Пресування. Використовується для виробництва плитних матеріалів – меблевих щитів, підлогових покриттів та конструкційних плит. Метод забезпечує високу щільність, однорідність структури і стабільність розмірів отриманих виробів.

Лиття під тиском. Дозволяє виготовляти пустотілі вироби або деталі складної форми, зокрема корпусні елементи, контейнери, декоративні деталі. Високий тиск забезпечує точність відтворення форми та можливість інтеграції дрібних структурних елементів.

Термоформування. Підходить для формування виробів із розвиненою поверхнею або деталей із заданими конструктивними особливостями. Метод ефективний для отримання легких, але достатньо міцних елементів складної конфігурації [29, 30].

Новіші виробничі методи для виготовлення ДПМ включають *адитивне виробництво шляхом моделювання шарами плавлення та лазерного спікання, тобто використання для 3D друку.* Важливим обмеженням для полімерів, що використовуються в ДПМ, є вимога до умов процесу (температура плавлення, тиск), які не призводять до термічної деградації деревного наповнювача. Деревина деградує приблизно за 220 °С; таким

чином, для виробництва ДПМ зазвичай використовуються полімери загального призначення, такі як поліетилен та полівінілхлорид.

Адитивне виробництво або 3D-друк складається з трьох загальних кроків: використання системи автоматизованого проектування (CAD) для моделювання деталі, обробка моделювання в 3D-просторі за допомогою програмного забезпечення для нарізки, а також з друком G-кодів і виробництвом деталі [31]. У промислових масштабах промисловість, яка виробляє ДПМ, або сама з'єднує всю сировину, тобто деревний наповнювач, полімери, добавки.

Даний метод має ряд переваг: 3D-друк дає змогу створювати деталі, які практично неможливо отримати традиційними методами (екструзія, пресування); процес керується комп'ютерними алгоритмами, що забезпечує стабільну якість та точність розмірів; матеріал наноситься локально і лише там, де це потрібно – технологія є майже безвідходною; підходить для прототипування, персоналізованих деталей та малотиражного виробництва без необхідності у дорогих прес-формах; гнучкість у виборі рецептури; можливість варіювати співвідношення полімеру та деревного наповнювача або додавати модифікатори без зміни обладнання; процес високо автоматизований, потребує мінімального втручання оператора.

Однак 3D-друк є значно повільнішим і менш продуктивним для масового виробництва. Суміші ДПМ повинні мати стабільну гранулометрію, рівномірний розподіл волокна та низький рівень вологи; інакше можливі дефекти друку, а через шарову структуру матеріалу знижується міцність у напрямку, перпендикулярному до шарів (анізотропія).

Промислові принтери для композитів є дорогими, вимагають спеціального програмного забезпечення та кваліфікованого персоналу. Розміри деталі визначаються робочою камерою принтера; великогабаритні вироби виготовити складно.

На рисунку 1.4 наочно показано, як різні методи виготовлення ДПМ відповідають різним типам виробів, враховуючи їхні форми, структуру та

функції. Кожен метод має свої переваги та обмеження, які залежать від властивостей використовуваних матеріалів та специфічних вимог до готових виробів [30].

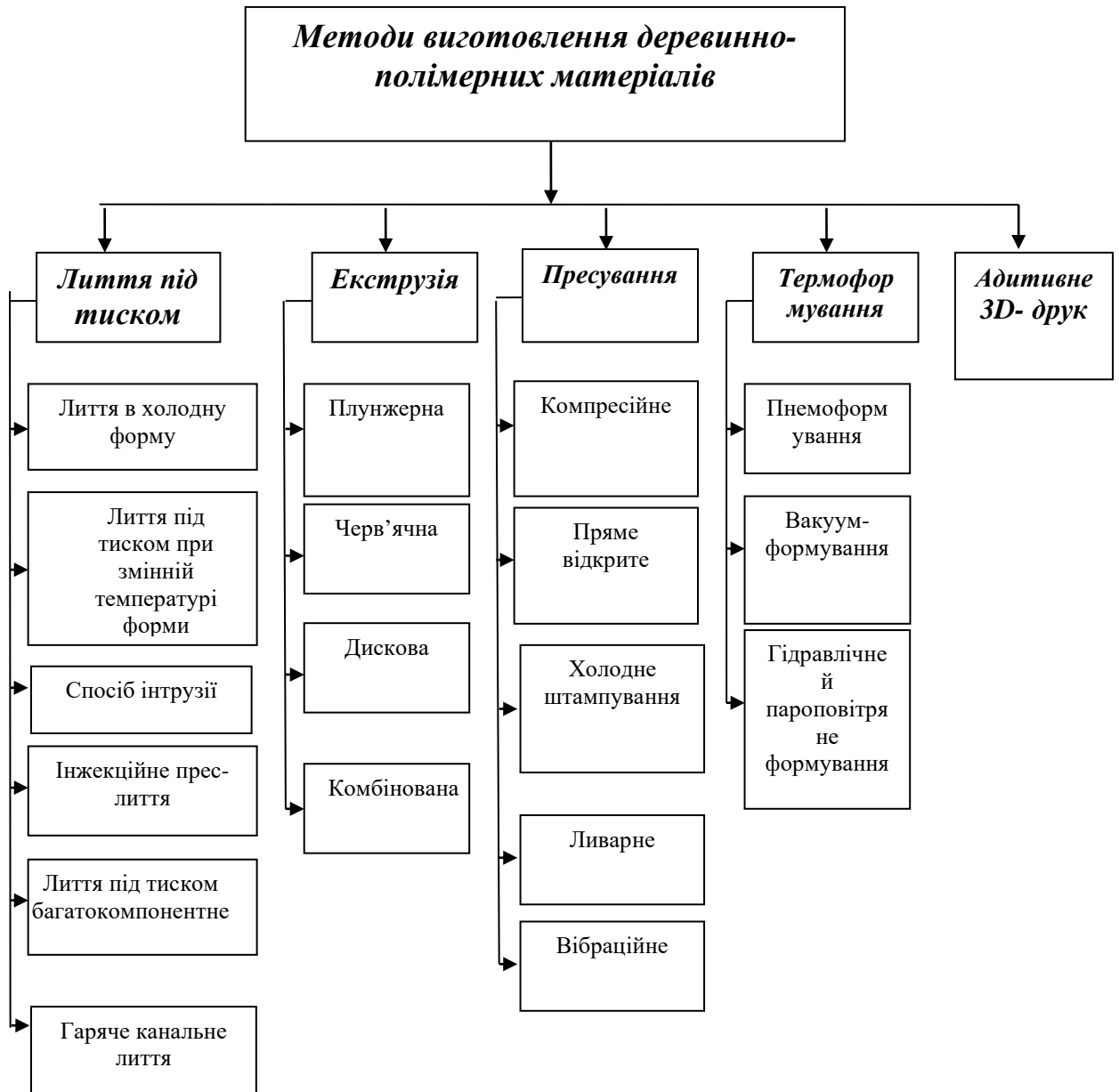


Рисунок 1.4. Методи виготовлення деревинних композиційних матеріалів на основі термопластів

Метод лиття під тиском є одним із найпоширеніших способів виготовлення ДПМ, завдяки його численним перевагам і широкому

застосуванню. Відбувається шляхом видавлювання пластифікованої суміші ДПМ у прес-форму під високим тиском. Основні етапи процесу: плавлення полімерної матриці, розплавлення та текучість суміші під тиском, ущільнення в прес-формі, застигання готового виробу.

Метод лиття під тиском характеризується високою продуктивністю, можливістю швидкого виготовлення великої кількості виробів, широким варіативним рядом форм, а також високою точністю розмірів без потреби у додатковій механічній обробці. Технологія забезпечує раціональне використання матеріалів та мінімізацію виробничих відходів.

Лиття під тиском придатне для повністю автоматизованих виробничих ліній, що значно зменшує витрати на ручну працю. Водночас дана технологія має певні обмеження: обладнання є високовартісним, а використання прес-форм обмежує максимальні розміри готових виробів. Незважаючи на це, метод широко застосовується для виготовлення деталей складної геометрії, що потребують високої точності, однорідної структури та стабільних механічних властивостей.

Екструзія є одним із найпоширеніших і найбільш ефективних способів виготовлення композиційних матеріалів на основі термопластичних полімерів. Її популярність у виробництві деревинно-полімерних матеріалів (ДПМ) зумовлена універсальністю, можливістю неперервного формування та широким спектром доступних профілів.

Екструзія – це неперервний процес формування, який передбачає продавлювання пластифікованої суміші термопласту та деревинного наповнювача через профільний отвір спеціальної конфігурації з подальшим охолодженням та стабілізацією форми виробу [23, 30, 32].

Основні стадії процесу екструзії включають:

- завантаження та транспортування матеріалу у робочу зону шнека;
- плавлення композиції під дією температури та зсувних напружень;

- дозування суміші, що забезпечує точний контроль кількості матеріалу, який надходить у формувальну зону;
- продавлювання через профільний отвір, у результаті чого формується поперечний переріз виробу;
- охолодження та фіксація геометрії виробу у калібрувальних пристроях.

Основні способи екструзії

Плунжерна екструзія передбачає пряме механічне натискання на суміш за допомогою плунжера, який проштовхує матеріал через формувальний канал. Метод забезпечує стабільний тиск, однак використовується рідше через нижчу неперервність процесу.

До інших різновидів екструзійних процесів належать:

- *черв'ячна екструзія* – найпоширеніший метод, у якому матеріал переміщується й одночасно пластифікується за допомогою обертового черв'яка;
- *дискова екструзія* – переміщення матеріалу здійснюється завдяки обертанню дисків, що створюють необхідний тиск у формувальній зоні;
- *комбінована екструзія* – поєднує принципи декількох екструзійних систем з метою підвищення ефективності процесу та покращення однорідності суміші.

Метод екструзії є оптимальним для виготовлення погонажних виробів, таких як профілі, панелі та труби, забезпечуючи їхню стабільну якість і повторюваність параметрів.

Екструзія має низку переваг, серед яких: висока продуктивність, можливість формування виробів необмеженої довжини, стабільна якість продукції, гнучкість та здатність швидко адаптуватися до виготовлення різних форм навіть у невеликих партіях, високий рівень автоматизації, а також енерго- та трудоощадність.

Попри значні переваги екструзійного методу – високу продуктивність, можливість виготовлення профільних виробів необмеженої довжини,

стабільну якість продукції, гнучкість переходу між різними формами навіть у малих серіях, високий рівень автоматизації, а також енерго- та трудоощадність – технологія має низку обмежень. Зокрема, вона придатна лише для виробів із невеликим поперечним перерізом і не підходить для масивних деталей; потребує використання дрібнодисперсної сировини (деревинного борошна або дрібної тирси); характеризується високою вартістю обладнання та складністю налаштування процесу, що вимагає високої кваліфікації персоналу.

Метод пресування є одним із найпростіших та найпоширеніших способів виготовлення деревинно-полімерних матеріалів. Він реалізується на різних типах обладнання, зокрема гідравлічних і багатопверхових пресах, прес-автоматах та роторних лініях [30, 32]. Підготовлену суміш термопласту та деревинних частинок завантажують у прес-форму, де під дією тиску здійснюється ущільнення матеріалу. Після охолодження композиційний матеріал стабілізується та зберігає надану форму. Основні методи плоского пресування включають:

- компресійне пресування – традиційний спосіб формування, що забезпечує рівномірне ущільнення матеріалу під дією тиску та дозволяє отримувати вироби стабільної якості.
- пряме відкрите пресування – застосовується для виготовлення виробів нескладної геометрії; характеризується простотою реалізації та економічністю процесу.
- холодне штампування – метод формування без попереднього нагрівання, що дає можливість суттєво знизити енерговитрати.
- ливарне пресування – передбачає попереднє розплавлення композиції з подальшим заливанням у прес-форму та її затвердінням, забезпечуючи високу точність відтворення форми.

- вібраційне пресування – ґрунтується на поєднанні тиску та вібрацій, що сприяє інтенсивному ущільненню суміші та отриманню виробів з підвищеною щільністю.

Слід зазначити, що для плоского пресування можливе використання переважно дрібнодисперсної сировини, зокрема деревинного борошна або дрібної тирси. В таблиці 1.1 наведено порівняльну характеристику різних методів виготовлення ДПМ.

Таблиця 1.1

Переваги та недоліки методів виготовлення ДПМ

Метод	Переваги	Недоліки
Лиття під тиском	Висока продуктивність; виготовлення виробів складної конфігурації; точність розмірів; відсутність додаткової обробки	Обмеженість форми виробів прес-формою, дороге обладнання, складність налагодження
Екструзія	Висока продуктивність; виготовлення профільних виробів необмеженої довжини; точність розмірів; висока якість поверхні	Невеликі поперечні розміри виробів; використання тільки дрібнодисперсних частинок; висока вартість обладнання; складність налагодження процесу
Пресування	Простота; економічність; висока продуктивність; можливість одночасного виготовлення великої кількості виробів	Обмежена форма і розмір виробів; потреба в охолодженні.
Термоформування	Виготовлення об'ємних виробів з відкритим вільним об'ємом; недороге та нескладне обладнання; економічність; низька трудомісткість	Низька продуктивність; використання високого тиску; неоднорідне формування; необхідність обробки внутрішніх поверхонь виробів; мала точність
3D друк	Можливість виготовлення виробів складної геометрії; висока точність і повторюваність; мінімальна кількість відходів; можливість виробництва малих серій та індивідуалізованих виробів; гнучкість у виборі рецептури; зменшення трудових витрат.	Обмеження за температурою процесу; нижча швидкість виробництва порівняно; потреба в ретельній підготовці матеріалу; нижчі механічні властивості матеріалу; висока вартість обладнання та обслуговування; обмежені розміри виробів.

Проаналізувавши різні методи виготовлення деревинно-полімерних матеріалів, можна відзначити, що найбільш поширеним і технологічно розвиненим залишається метод екструзії. Водночас пресування також займає провідні позиції завдяки високій продуктивності, економічності та універсальності застосування. Перевага цієї технології полягає в тому, що потрібен лише відносно низький рівень тиску, порівняно з екструзією та литтям під тиском. Як наслідок, зберігається природна структура деревини, що призводить до значного зниження щільності матеріалу. Продуктивність технології пресування набагато вища, ніж у екструзії та лиття під тиском. Плоскопресовані ДПМ, виготовлені методом сухого змішування, мають явну перевагу у вартості. Останніми роками зроблено важливі кроки у напрямі використання плоского пресування для виготовлення ДПМ. Такий підхід відкриває можливість адаптації технології під процеси виробництва традиційних композиційних матеріалів, зокрема деревостружкових плит, що сприятиме розширенню номенклатури виробів та оптимізації технологічних рішень.

1.3. Нормативна база для деревинно-полімерних матеріалів

Деревинно-полімерні матеріали поєднують натуральні волокна, зокрема деревину, з різними видами полімеру. Для цієї групи продукції встановлено міжнародний стандарт ISO 16616, розроблений International Organization for Standardization. ДПМ широко застосовуються як у зовнішніх конструкціях (тераси, фасадні панелі, жалюзі), так і у внутрішніх елементах будівель, зокрема для виготовлення дверей і підлогових покриттів [33, 34].

З метою глобального захисту довкілля важливим є стимулювання перероблення пластмас. ДПМ, у яких використовуються вторинні полімери, належать до композитів з переробленої сировини. Водночас якість перероблених полімерів зазвичай нижча порівняно з первинними

полімерними матеріалами, а також існують ризики наявності шкідливих речовин. Це може викликати обґрунтовані сумніви у споживачів щодо безпечності ДПМ на основі вторинної сировини. З іншого боку, дедалі більше споживачів зацікавлені у придбанні екологічно безпечних продуктів із високим коефіцієнтом переробки, що потребує надання достовірної та зрозумілої інформації про такі матеріали.

Стандарт ISO 20819-1 встановлює методи розрахунку коефіцієнта переробки, вимоги до маркування та процедури випробувань на безпеку. Проведення випробувань щодо вмісту небезпечних речовин є необхідним для зменшення занепокоєння споживачів, пов'язаного з можливим забрудненням продукції під час використання перероблених матеріалів. Стандарт ISO 20819-2, своєю чергою, визначає методи оцінювання довговічності виробів, виготовлених із застосуванням перероблених полімерів. До його впровадження не існувало стандарту ISO, спеціально орієнтованого на оцінку експлуатаційних характеристик продукції з вторинних полімерів. Крім того, цей стандарт охоплює методи випробувань для виробів, які не розглядаються в ISO 16616 [33].

Загалом, розроблення цього документа спрямоване на зменшення споживчих ризиків шляхом стандартизованих випробувань та створення умов для усвідомленого вибору екологічно безпечної і надійної продукції з використанням перероблених пластмас.

Міжнародні стандарти ISO встановлюють загальні вимоги до ДПМ, включно з показниками безпеки, довговічності та вмісту вторинної сировини. Окремі документи регламентують властивості деревинно-полімерних матеріалів на основі перероблених полімерів, що є особливо актуальним з огляду на екологічні аспекти виробництва.

Стандарти ASTM широко застосовуються для оцінювання експлуатаційних характеристик настилів і огорожувальних систем із ДПМ, визначаючи методики випробувань на міцність, жорсткість, довговічність та стійкість до атмосферних чинників [34].

Європейські нормативи, своєю чергою, зосереджені на випробуваннях матеріалів в умовах підвищеної вологості та температури, тривалого УФ-опромінення, а також на оцінюванні вітрових навантажень для зовнішніх конструкцій, зокрема у будівельних системах (наприклад, EN 14351-1).

Ключовими критеріями експлуатаційних характеристик ДПМ є водостійкість, що визначає стабільність розмірів і міцності при тривалому зволоженні, ультрафіолетова стабільність, яка забезпечує збереження кольору та структури матеріалу під дією сонячного випромінювання, а також механічна міцність, що характеризує несучу здатність. Окремий блок вимог стосується безпеки та екологічності, зокрема відсутності небезпечних речовин і можливості повторної переробки матеріалу.

Підвищення вогнестійкості деревинно-полімерних матеріалів можливе за рахунок матеріалознавчих, технологічних і конструктивних рішень, які повинні узгоджуватися з чинними нормативними вимогами та принципами екологічної безпеки. ISO (міжнародні), Європейські стандарти (EN), які використовуються в Європейському Союзі та гармонізовані з ISO), американські стандарти ASTM, національні та регіональні норми, приклад для України: ДБН В.1.1-7:2016 — Пожежна безпека об'єктів будівництва Встановлює загальні вимоги до реакції матеріалів на вогонь у будівництві; ДСТУ EN 13501-1 — Національна адаптація європейської класифікації [33-36].

Для визначення фізико-механічних властивостей деревинно-полімерних матеріалів, виготовлених методом плоского пресування, можна використовувати комплекс стандартизованих випробувань, що дозволяють оцінити міцнісні, деформаційні та експлуатаційні характеристики матеріалів. Зокрема, таких властивостей як для визначення щільності, набрякання за товщиною, межі міцності на статичний згин зосередженні європейські стандарти EN 323, EN 317, EN 310, тощо. Дані стандарти є впроваджені в Україні, згідно вимог національних стандартів ДСТУ, гармонізованих з європейськими та міжнародними нормативними документами [36, 37, 38].

Таким чином, система стандартів для ДПМ забезпечує відповідність продукції визначеним рівням експлуатаційних властивостей, безпеки та екологічної відповідальності. Протоколи випробувань адаптуються до конкретних умов використання й кліматичних чинників, що дозволяє застосовувати деревинно-полімерні матеріали у широкому діапазоні виробів — від терасних покриттів до елементів автомобільних інтер'єрів.

1.4. Висновки

Ознайомлення із ринком ДПМ здебільшого базується на типі полімерної матриці, до якої належать поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид та інші термопласти. Сегмент поліетиленових ДПМ привертає особливу увагу як у наукових, так і в промислово-технологічних колах, оскільки поліетилен забезпечує оптимальне поєднання природних властивостей деревини з технологічністю, хімічною інертністю та достатньою механічною міцністю полімерної основи.

Деревинні полімерні матеріали мають дуже високий потенціал і є екологічно чистими матеріалами для досягнення довговічності без надмірного використання токсичних хімічних речовин. У порівнянні з іншими волокнистими матеріалами, рослинні волокна, як правило, придатні для армованого пластику завдяки їх відносно високій жорсткості та міцності, низькій вартості, здатності до біологічного розкладання, низькій щільності, низьким викидам CO₂ та сировині, що щорічно відновлюються.

Проте у даних матеріалах наявні певні недоліки: значна несумісність полімерної матриці та природних наповнювачів, що призводить до нерівномірного диспергування та зниження показників механічних властивостей (додаванням відповідних модифікувальних речовин можна сприятливо змінити властивості);

Для отримання ДПМ із високими фізико-механічними властивостями пропонується використовувати деревинне борошно, тирсу або стружку як наповнювач та вторинний поліетилен, поліпропілен або

поліетиленметакрилат як полімерну матрицю. Оптимальний вміст полімеру становить 40-60%. Оскільки, саме вміст полімеру та вид деревинного наповнювача впливають на властивості ДПМ.

Плоскопресовані ДПМ, виготовлені методом сухого змішування, мають явну перевагу у вартості. Останніми роками зроблено важливі кроки у напрямі використання плоского пресування для виготовлення ДПМ. Такий підхід відкриває можливість адаптації технології під процеси виробництва традиційних композиційних матеріалів, зокрема деревостружкових плит, що сприятиме розширенню номенклатури виробів та оптимізації технологічних рішень.

ДПМ, які характеризуються низкою переваг над деревинними композиційними матеріалами на основі термореактивних смол, зокрема: підвищеною водостійкістю, нетоксичністю, хімічною стійкістю та можливістю їх повторного використання.

Нормативна база деревинно-полімерних матеріалів забезпечує комплексний підхід до оцінювання якості, безпечності та екологічної ефективності ДПМ. Її застосування сприяє гармонізації вимог до продукції на міжнародному рівні, зниженню екологічних ризиків та формуванню умов для сталого розвитку виробництва і використання деревинно-полімерних матеріалів.

Мета роботи – аналіз сировинної бази для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів плоским способом пресування.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розглянути перспективи розвитку виробництва деревинних полімерних матеріалів та провести аналіз різних способів їх виготовлення;
- проаналізувати сировину та її особливості для виготовлення ДПМ;
- розглянути вплив різних компонентів композиції на властивості ДПМ.

РОЗДІЛ 2. СИРОВИННА БАЗА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Лігно-целюлозна сировина для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів

Деревинно-полімерні матеріали виготовляються з широкого спектру сировини, включаючи полімери від поліпропілену до полівінілацетату та натурального наповнювача (деревина, натуральні волокна, ітд.), а також може містити різного виду модифікувальні добавки (лініни, танін, малеїновий ангідрид, ітд.) рис. 2.1.



Рисунок 2.1. Сировина для ДПМ

Лігноцелюлозні волокна містять складні молекули, такі як целюлоза, геміцелюлози, лігнін та пектин [40], які фізико-хімічно відрізняються від термопластичних полімерів. Ці складні молекули багаті на полярні гідроксильні (–ОН) та карбонільні групи, які слабо з'єднуються з неполярними гідрофобними матричними полімерами, що призводить до слабкої міжфазної взаємодії [41, 42]. Отже, покращення міжфазної сумісності між двома різними фазами ДПМ є критичним аспектом рецептур ДПМ. Ці методи здебільшого включають використання сполучних агентів, силанізацію, контрольоване вільнорадикальне щеплення та щеплення полімеризації [43, 44, 45, 46].

Деревина є природною біополімерною системою зі складною та багатокомпонентною хімічною будовою. Основу її складу становлять органічні полімерні сполуки, зокрема целюлоза, геміцелюлози та лігнін, які формують структурний каркас деревинної тканини. Окрім цього, до складу деревини входять екстрактивні речовини — терпени, смоляні кислоти, жири, камеді, дубильні речовини та інші низькомолекулярні сполуки.

До складу деревини входить близько 45-60% целюлози, 15-35% лігніну і 15-25% геміцелюлози. Кількість екстрактивних речовин значною мірою залежить від породи і є неоднаковою в заболоні і ядрі деревини.

Відповідно, подрібнена деревина є складним матеріалом як за хімічним складом, так і за фізичними властивостями.

Характеристики деревинного наповнювача – його форма, розміри та вологість – значною мірою визначають властивості кінцевого композиційного матеріалу. У виробництві деревинно-полімерних матеріалів можуть використовуватися різні види наповнювачів. Так, у літературі [32] рекомендується застосовувати: деревинне борошно з дисперсністю 0,01–1 мм, тирсу розміром 1–10 мм, рідше стружку 10–20 мм, деревинні волокна (рис. 2.2).



Рисунок 2.2. Загальний вигляд деревних частинок

Рекомендовано для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів плоским способом пресування застосовувати деревинну стружку з фракційним і породним складом, аналогічним тому, що використовується у виробництві стружкових плит (СП). Для хвойних порід оптимальними є такі геометричні параметри стружки: довжина 3–30 мм, ширина 0,3–30 мм та товщина 0,5–1,8 мм. Перед використанням стружку необхідно висушувати до вологості 2–3%, оскільки підвищена вологість деревинного наповнювача погіршує його просочування полімерним в'язучим у процесі пресування. Крім того, надлишкова волога спричиняє нерівномірний розподіл внутрішніх напружень, що негативно впливає на фізико-механічні властивості готового матеріалу.

Експериментальні дослідження показали, що при вологості композиційного матеріалу на основі подрібненої деревини та полівінілхлориду (ПВХ) понад 1,5% експлуатаційні характеристики виробів істотно погіршуються.

Для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів також допускається використання тирси з такими розмірами частинок: довжина 3–8 мм, ширина 1–3 мм та товщина 0,1–0,25 мм. Оптимальним вважається

співвідношення деревних порід у складі наповнювача на рівні 60–70% хвойних та 30–40% листяних порід [47, 48, 49].

Зі збільшенням довжини частинок деревинного наповнювача спостерігається зростання міцності при статичному згині та ударної в'язкості матеріалу. Максимальні значення міцності при статичному згині досягаються за використання частинок довжиною до 40 мм.

Породний склад деревини чинить відносно незначний вплив на властивості деревинно-полімерних композицій. Натомість визначальними чинниками є форма та розміри частинок наповнювача, які безпосередньо впливають на структуру та фізико-механічні характеристики кінцевого матеріалу.

Варто зазначити, що збільшення розміру частинок наповнювача сприяє підвищенню шорсткості поверхні готового матеріалу, а також супроводжується зростанням водопоглинання та набрякання композиційного матеріалу, хоча це й підвищує його міцність на згин і розтяг.

Значна кількість наукових досліджень [50-54] присвячена застосуванню деревинного борошна як наповнювача з розмірами частинок у межах 0,1–1 мм. Водночас отримання такого наповнювача потребує використання спеціалізованого подрібнювального та класифікаційного обладнання, що ускладнює технологічний процес і призводить до зростання собівартості продукції. Крім того, вміст деревинного борошна у складі деревинно-полімерних матеріалів, як правило, не повинен перевищувати 50 мас. %, оскільки подальше збільшення частки наповнювача може негативно впливати на фізико-механічні та експлуатаційні характеристики кінцевого матеріалу. Крім того, із аналізу літературних джерел найбільше деревинне борошно рекомендують застосовувати під час виготовлення деревинно-полімерних матеріалів екструзійним методом, оскільки воно забезпечує більш рівномірний розподіл наповнювача в матриці. Проте застосування дрібнодисперсних частинок значно збільшує витрати термопластичного

полімеру та технологічних добавок через різке зростання питомої поверхні частинок із підвищенням дисперсності наповнювача.

У зв'язку з цим широкого застосування набуло використання відходів деревообробних виробництв, зокрема тирси [32, 50, 51, 54, 55]. У роботі [56] як наповнювач було використано соснову тирсу, яку розподіляли на три фракції за розмірами частинок: до 2 мм (середній розмір близько 1 мм), від 2 до 5 мм (середній розмір близько 3 мм) та понад 5 мм (середній розмір близько 6 мм). Як полімерну матрицю застосовували вторинний поліпропілен (ВПП), отриманий шляхом подрібнення пакувальних стрічок із середнім розміром частинок близько 5 мм. Ступінь наповнення композиції змінювали в межах 30–60 мас. %.

Результати досліджень [50, 57–61] свідчать, що використання деревного волокна як наповнювача є більш ефективним порівняно з тирсою з точки зору покращення фізико-механічних властивостей деревинно-полімерних матеріалів (ДПМ). Залежно від геометричних характеристик деревні волокна поділяють на три основні типи:

I тип — волокна довжиною 10–20 мм;

II тип — волокна довжиною 2–15 мм;

III тип — дрібнодисперсні волокнисті відходи з розмірами частинок 0,2–2 мм та відношенням довжини до товщини в межах 5–25.

Найвищі показники міцності при статичному згині забезпечують волокна I типу. Водночас максимальні значення ударної в'язкості, водостійкості та мінімальне водопоглинання (близько 3%) досягаються при використанні суміші волокон II та III типів у співвідношенні 1:1. Таким чином, застосування деревного волокна, особливо за оптимального фракційного складу, істотно підвищує міцність і водостійкість композиту та знижує його водопоглинання порівняно з матеріалами, наповненими тирсою.

Переробка деревинно-полімерних композицій на основі крупнодисперсної подрібненої деревини (зокрема фрагментів шпону) у поєднанні з дрібнодисперсними порошкоподібними в'язучими, такими як

емульсійний або суспензійний полівінілхлорид (ПВХ), ускладнюється через схильність суміші до розділення. Оптимальні результати отримують при змішуванні дрібнодисперсної та крупнодисперсної фракцій деревини у співвідношенні 35–75%, що забезпечує формування прес-композицій із задовільними фізико-механічними властивостями.

Для зменшення розшарування компонентів до складу композиції доцільно вводити 0,5–2,5% тонковолокнистих добавок. З метою підвищення ударної в'язкості матеріалу можливе додаткове введення капронового корду як армувального компонента.

Під час плоского пресування композицій з подрібненої деревини оптимальна вологість матеріалу повинна становити 2–6%. Для екструзійного формування вміст води у деревинних частинках не має перевищувати 1,5%, оскільки утворення водяної пари в процесі переробки спричиняє формування мікропор і мікротріщин, що істотно погіршує фізико-механічні властивості готових виробів із ДПМ.

Наведені рекомендації дозволяють мінімізувати негативний вплив технологічних чинників і забезпечити високу якість деревинно-полімерних композитів.

З економічної точки зору використання деревинних частинок великих розмірів є вигідним, оскільки вони дешевші у виробництві. Однак їх використання може призвести до підвищення шорсткості поверхні виробу, нерівномірності властивостей та зниження продуктивності обладнання через меншу насипну щільність таких частинок. Експериментально встановлено, що оптимальний розмір деревинних частинок для досягнення бажаних властивостей матеріалу становить 3–6 мм.

У деяких європейських, особливо південно-європейських країн, наявну кількість деревини для виробництва плит є вкрай низьким [62]. Збільшився попит на ринку целюлозно-паперової промисловості, а також більш широке використання деревних паливних гранул в промисловості призводить до високої вартості і браку в поставках деревообробного та

переробних компаній. Для забезпечення достатньої кількості сировини в композиційних матеріалах деревинних промисловості, використовується низькосортна деревина, а також однорічні та багаторічні рослини. Придатність сільськогосподарських сировини для виробництва деревинних панелей вже були досліджені раніше і опубліковані в різних публікаціях [63-69].

Використання дешевшої, недефіцитної агросировини потребує менших енергетичних затрат. Зокрема, використання кострецю і насінних відходів значно спрощує технологічний процес, оскільки вдається уникнути таких операцій як подрібнення і сушіння.

За останні роки активізувалися дослідження щодо застосування термопластичних полімерів для виготовлення деревинних плит на основі вторинної агросировини; такі композити мають екологічні й технологічні переваги над матеріалами на основі термореактивних полімерів. Зокрема, створено матеріали, які містять 70% кострець льону і 25% термопластичного полімеру [68].

З огляду на географічні особливості Європи основними джерелами коротких целюлозних волокон є деревина, льон і коноплі. Аналіз наукових публікацій, присвячених можливості використання коротких волокон конопель, льону та деревини як наповнювачів у матриці PHBV, показав обмежену кількість даних щодо технології виготовлення, методів перероблення та властивостей таких композитів [70].

Бавовна - це натуральне волокно, яке отримують із поверхні насіння рослини бавовнику. Макро- та мікроструктура бавовняного волокна значною мірою залежать від ступеня його зрілості. Елементарне волокно бавовни являє собою окрему рослинну клітину, витягнуту вздовж осі: один її кінець є загостреним, а інший рваним.

Зовнішній шар волокна називають первинною стінкою або кутикулою. Вона має товщину менше 1 нм і виконує захисну функцію завдяки особливостям своєї будови та наявності у складі, крім целюлози,

восково-пектинових речовин. Під кутикулою розташована вторинна стінка, склад і структура якої безпосередньо визначають основні фізико-механічні властивості бавовняного волокна [71].

Основною складовою речовиною бавовняного волокна є целюлоза, вміст якої становить приблизно 92–95 %. Целюлоза є лінійним полімером і полідисперсною речовиною; середній ступінь її полімеризації коливається від 5–6 до 14–15 тисяч. До інших складових волокна належать геміцелюлози та пентозани, жирно-воскові речовини, а також забарвлені компоненти, які впливають на технологічні та експлуатаційні властивості бавовни. У більшості досліджень використовували волокна відносно великої довжини з широким розподілом за розмірами, що може призводити до значної варіабельності властивостей отриманих композитів. Крім того, надмірна довжина волокон ускладнює процеси перероблення, зокрема під час екструзії та лиття під тиском, спричиняючи технологічні проблеми.

Перспективним напрямом є використання порошкоподібного PNBV як полімерної матриці у поєднанні з короткими волокнами довжиною близько 1 мм із вузьким розподілом за розмірами. Такий підхід може забезпечити вищий ступінь гомогенізації композиції та більш стабільні властивості біокомпозитів. Водночас слід зазначити, що в окремих роботах застосовувалися лабораторні методи формування, які не передбачали використання стандартних екструдерів. У зв'язку з цим отримані результати можуть не повною мірою відображати технологічні особливості та можливі проблеми масштабування процесу до промислового рівня.

Додатковою перевагою використання коротких волокон є можливість зменшення вмісту дорогої полімерної матриці в складі біокомпозиту, що сприяє зниженню собівартості матеріалу та підвищує його економічну доцільність.

Кількість целюлози в рослинах може суттєво змінюватися залежно від виду та віку рослини. Хоча хімічна будова целюлози, отриманої з різних природних волокон, є однаковою, її ступінь полімеризації може істотно

відрізнятися [70]. Геміцелюлоза, у свою чергу, є гетерогенним біополімером із групи полісахаридів, який характеризується нижчою стійкістю до дії розбавлених кислот. Лігнін заповнює міжволоконний простір між полісахаридами, виконуючи цементувальну функцію. Наявність цього компонента зумовлює підвищену жорсткість клітинних стінок і забезпечує їх захист від хімічних та фізичних ушкоджень [72]. Співвідношення целюлози, геміцелюлози та лігніну для окремих видів рослинних волокон наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Масова частка окремих компонентів рослинних волокон (на основі [72])

Тип волокна	Целюлоза, % мас.	Геміцелюлоза, % мас.	Лігнін, % мас.	Інші компоненти, % мас.
Льон	71	18,6–20,6	2,2	1,5
Коноплі	68	15	10	0,8
Бавовна	92-95	~ 1	~5	1
Деревина листяних порід	44–53	18–24	32–35	0,2–0,8
Деревина хвойних порід	51-55	10-15	24-25	1,9-5,4

Полімерні матриці виявляють різну спорідненість до рослинних волокон, що зумовлено відмінностями в їх хімічній структурі. Для підвищення адгезії волокон до полімерної матриці, зменшення водопоглинання, збільшення відносного вмісту целюлози та підвищення ступеня кристалічності широко застосовують методи поверхневої модифікування волокон [73, 74].

Модуль Юнга та міцність на розрив натуральних волокон, зокрема сизалю, джуту, кенафу, конопель і льону, зазвичай є нижчими порівняно зі скловолокном, яке традиційно використовують у композиційних матеріалах. Водночас щільність скловолокна є значно вищою і становить близько 2500

кг/м³, тоді як щільність натуральних волокон зазвичай не перевищує 1500 кг/м³. Ця відмінність є суттєвою у випадках, коли маса композитних виробів відіграє визначальну роль і потребує мінімізації [70].

Слід зазначити, що властивості натуральних волокон істотно залежать від умов вирощування, строків збирання врожаю, а також способів їх оброблення та зберігання, що зумовлює значну варіабельність їхніх характеристик і ускладнює прогнозування поведінки композитів. Так, у роботі Боса та співавторів [75] показано, що волокна льону, зібрані вручну, мають приблизно на 20% вищі механічні показники порівняно з волокнами, отриманими механізованим способом.

Аналізуючи результати попередніх досліджень, можна зробити висновок, що для виготовлення деревинно-полімерних композицій доцільно використовувати деревинні наповнювачі з об'ємною густиною, близькою до густини термопластів. Такими наповнювачами можуть бути деревинне борошно, тирса та стружка.

Як полімер для таких композицій рекомендується використовувати порошкоподібний або гранульований вторинний поліетилен (ВПЕ), поліпропілен (ПП) або поліетиленметакрилат (ПММА) з вмістом полімеру в межах 40-60%. Така пропорція полімеру забезпечує отримання композиційного матеріалу з хорошими фізико-механічними властивостями.

2.2. Термопласти як полімерна матриця деревинно-полімерних матеріалів

Полімерами називають речовини, утворені в результаті з'єднання великої кількості однакових або подібних низькомолекулярних сполук (мономерів) у вигляді повторюваних структурних ланок. Таким чином, полімери складаються з макромолекул, що містять від декількох до кількох тисяч елементарних молекул.

Залежно від особливостей просторової будови макромолекул полімери поділяються на лінійні, розгалужені та просторові (сітчасті). Лінійні полімери характеризуються ланцюговою структурою макромолекул, у якій структурні ланки послідовно з'єднані в один напрям. Такі полімери, як правило, добре плавляться та розчиняються.

Розгалужені полімери мають додаткові бічні ланцюги, приєднані до основного макромолекулярного ланцюга. Наявність розгалужень ускладнює переміщення макромолекул відносно одна одної, що зумовлює гіршу здатність до плавлення та розчинення.

Просторові (тривимірні) полімери утворюють розгалужену сітчасту структуру, у якій макромолекулярні ланцюги з'єднані між собою в різних напрямках, формуючи об'ємну будову. На відміну від лінійних і розгалужених полімерів, такі матеріали не плавляться та не розчиняються, а під час нагрівання зазнають термічного руйнування або необоротних хімічних перетворень [76, 77].

За походженням полімери поділяють на природні та синтетичні. До природних належать полісахариди (целюлоза, крохмаль), протеїни та натуральний каучук, тоді як синтетичні полімери представлені смолами, пластмасами, волокнами, каучуками та лаками. Синтетичні полімери отримують переважно шляхом полімеризації або поліконденсації. За агрегатним станом полімерні матеріали можуть бути рідкими (розчини, емульсії, в'язкі маси) або твердими (гранули, порошки, кускові матеріали).

Виробництво полімерів характеризується високим рівнем автоматизації, мінімальною участю людини та практично безвідходними технологічними процесами, що відповідає сучасним вимогам до промислового виробництва. За обсягами виробництва полімерних матеріалів провідні позиції займають США, Японія та Німеччина. Полімери широко використовують як сировину для виготовлення пластичних мас, плівок, волокон, каучуків, клеїв і лакофарбових матеріалів.

Найдешевшими та найпоширенішими є пластмаси, отримані на основі термопластичних полімерів, зокрема поліетилену, поліпропілену, полістиролу та поліетилентерефталату. Саме ці полімери найчастіше використовуються як матриці у складі деревинно-полімерних матеріалів.

Найбільша кількість досліджень у галузі деревинно-полімерних матеріалів присвячена наповненню деревини термопластичними полімерними матрицями, передусім поліолефінами — поліетиленом низького тиску (ПЕНТ), поліетиленом високого тиску (ПЕВТ), а також вторинним поліетиленом, отриманим із полімерних відходів. Окрім цього, для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів рекомендується застосовувати поліпропілен (ПП), полівінілхлорид (ПВХ), полістирол (ПС), поліметилметакрилат (ПММА) та їх вторинні аналоги.

Як вихідні термопластичні в'язучі у роботах [18, 48] використовували поліетилен низького тиску у вигляді вискодисперсного порошку з розміром частинок близько 200 мкм, а також у формі вторинної полімерної плівки з розміром фрагментів 10×10 мм. Поліметилметакрилат застосовували як у гранульованому вигляді з діаметром частинок 1–2 мм, так і у формі порошку з розміром частинок близько 150 мкм.

Окремі дослідження були присвячені отриманню деревинно-полімерних матеріалів на основі сумішей термопластичних полімерів, зокрема композицій поліетилен–полістирол та поліетилен–полістирол–полівінілхлорид. Порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей таких матеріалів із ДПМ, виготовленими на основі індивідуальних полімерів, показав зниження міцності та структурної однорідності у випадку використання полімерних сумішей. Це пояснюється термодинамічною несумісністю полімерів різної хімічної природи, що ускладнює міжфазну взаємодію та негативно впливає на формування однорідної структури і механічні властивості композиту.

Використання гранульованих термопластів або полімерних матеріалів у вигляді плівки ускладнює отримання однорідної пресмаси, що негативно

впливає на забезпечення високої міцності деревинно-полімерних композитів. Нерівномірний розподіл в'язучого в об'ємі матеріалу сприяє утворенню зон із підвищеними внутрішніми напруженнями, що може призводити до передчасного руйнування виробів.

У дослідженні [20] полівінілхлорид (ПВХ) використовували як в'язучий компонент для виробництва деревинно-полімерних плит у концентрації 50–60%. Плити, виготовлені на основі немодифікованого ПВХ, характеризувалися низькими фізико-механічними показниками. Водночас введення модифікувальних добавок дозволяло суттєво покращити властивості матеріалу, зокрема підвищити його міцність та експлуатаційну надійність.

Результати досліджень [52] показали, що зі збільшенням вмісту полімерної матриці у композиції фізико-механічні властивості матеріалу зростають. Найбільш інтенсивне покращення спостерігається в інтервалі концентрацій полімеру 30–40%, коли деревинні частинки ще перебувають у контакті між собою, а сформоване полімерне середовище ефективно зміцнює структуру композиту.

Завдяки високій пластичності поліетилену деревинно-полімерні матеріали можуть бути сформовані у широкий спектр форм і розмірів відповідно до вимог кінцевого застосування. Це робить поліетиленові ДПМ ефективними для виготовлення дверних та віконних профілів, настилів, облицювальних панелей та інших конструкційних елементів, що потребують естетичної поверхні та стабільних експлуатаційних характеристик. Крім того, такі композити розглядаються як перспективна й економічно вигідна альтернатива фанері, оскільки поєднують механічну міцність, довговічність та технологічну універсальність [26].

Найдешевшими та найпоширенішими є пластмаси, отримані на основі таких термопластичних полімерів: поліетилену; поліпропілену; полістиролу; поліетилентерефталату.

Поліетилен $[-CH_2 - CH_2]_n$ – є карболанцюговим полімером аліфатичного ненасиченого вуглеводню олефінового ряду — етилену. Завдяки доступності сировинної бази, поєднанню цінних експлуатаційних властивостей із відносно низькими витратами на виробництво, поліетилен посідає провідне місце серед пластмас за обсягами світового виробництва [80, 81].

Поліетилен отримують різними методами, що зумовлює відмінності його властивостей (табл. 2.1) та способів подальшої переробки у виробі. Це пояснюється особливостями будови полімерного ланцюга, зокрема ступенем розгалуження та довжиною макромолекул. Залежно від умов синтезу та структурних характеристик розрізняють поліетилен низького тиску (ЛПРЕ), поліетилен середнього тиску (МПРЕ) та поліетилен високого тиску (НПРЕ) [76, 80, 82].

Таблиця 2.1

Фізико-механічні властивості поліетилену

Властивості	ПЕВТ	ПЕСТ	ПЕНТ
Молекулярна маса, $M \cdot 10^4$	1,9-4,8	4-7	7-35
Розгалуженість, число CH_3 – груп на 1000 атомів, С	20-30	15-2,5	3-7
Щільність, $кг/м^3$	918-935	960-970	945-955
Ступінь кристалічності, %	55-65	85-95	75-85
Показник текучості розплаву, г/10 хв	0,2-20	0,1-10	0,1-12
Водопоглинання, %	0,01	0,01	0,01
Температура плавлення, $^{\circ}C$	105-115	130-135	125-130
Морозостійкість, $^{\circ}C$	-70	-70	-70
Питома теплоємність, $кДж/кг \cdot гр^{\circ}C$	2,1-2,9	2,3-2,7	2,3-2,7
Коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(м \cdot ^{\circ}C)$	0,2-0,3	0,2-0,4	0,2-0,4

Комплекс хімічних, фізико-механічних та діелектричних властивостей поліетилену визначає його високі споживчі характеристики й забезпечує широке застосування в різних галузях промисловості, зокрема в радіотехнічній, кабельній, легкій та хімічній [83].

Поліетилен характеризується високою стійкістю до дії води та водяної пари. Водночас під впливом кисню повітря, підвищених температур і сонячного випромінювання відбувається окиснювальна деградація полімеру, що супроводжується погіршенням його фізико-механічних і діелектричних властивостей. Запобігти цим процесам можливо шляхом введення стабілізаторів, вибір і концентрація яких дозволяють цілеспрямовано регулювати експлуатаційні характеристики готових виробів.

Поліетилен має низьку теплопровідність і високий коефіцієнт термічного розширення. За електричними властивостями, як неполярний полімер, він належить до високоякісних височастотних діелектриків.

Механічні властивості поліетилену зростають зі збільшенням ступеня кристалічності та молекулярної маси, а також істотно залежать від температурних умов експлуатації. Важливою експлуатаційною характеристикою є повзучість: уже за кімнатної температури під дією тривалого навантаження поліетилен зазнає пластичної деформації. Крім того, матеріал схильний до розтріскування під дією навколишнього середовища, зокрема повітря, органічних розчинників і мастил.

Як і більшість кристалічних полімерів, поліетилен плавиться у вузькому інтервалі температур (приблизно 3 °С). За температури, вищої за температуру плавлення, він переходить у високоеластичний (пластичний) стан, що забезпечує можливість його переробки різними методами формування. Внаслідок різноманітності своїх фізико-механічних властивостей, дешевизни сировини поліетилен застосовується для виробництва різних виробів: волокон; -будматеріалів; санітарно-технічних виробів.

Властивості поліетилену значною мірою визначаються умовами його синтезу, які впливають на ступінь розгалуженості макромолекулярного ланцюга, молекулярну масу та рівень кристалічності. За цими ознаками розрізняють поліетилен високого тиску (ПЕВТ), середнього тиску (ПЕСТ) та низького тиску (ПЕНТ).

Поліетилен високого тиску (ПЕВТ) має значно розгалужену структуру макромолекул і низький ступінь кристалічності. Він характеризується високою еластичністю, м'якістю та прозорістю, але порівняно невисокими показниками міцності й теплостійкості. Завдяки цим властивостям ПЕВТ широко застосовується для виготовлення плівок, пакувальних матеріалів і виробів, що працюють за невеликих механічних навантажень.

Поліетилен середнього тиску (ПЕСТ) займає проміжне положення між ПЕВТ і ПЕНТ за структурою та властивостями. Він має помірний ступінь розгалуженості, вищу міцність і кращу термостійкість порівняно з ПЕВТ, зберігаючи при цьому достатню пластичність. ПЕСТ використовується для виготовлення технічних і побутових виробів, що потребують поєднання гнучкості та механічної надійності.

Поліетилен низького тиску (ПЕНТ) характеризується майже лінійною структурою макромолекул і високим ступенем кристалічності. Це зумовлює його підвищену міцність, жорсткість, зносостійкість і хімічну стійкість. ПЕНТ має вищу температуру плавлення та кращі механічні властивості, що робить його особливо придатним для використання в деревинно-полімерних матеріалах, де потрібні жорстка матриця та ефективне армування деревинним наповнювачем.

Таким чином, вибір типу поліетилену для виготовлення деревинно-полімерних матеріалів визначається вимогами до міцності, жорсткості, водостійкості та умов експлуатації виробів. Найбільш перспективним у цьому контексті є поліетилен низького тиску, тоді як поліетилен високого тиску доцільніше використовувати у виробках з підвищеними вимогами до гнучкості.

Вторинний поліетилен є найбільш перспективною полімерною матрицею для плоского пресування ДПМ з огляду на його доступність, низьку вартість та екологічний ефект. Водночас його використання потребує: ретельного контролю вологості композиції; подрібнення до

дрібнодисперсного стану; введення стабілізувальних і модифікувальних добавок.

За дотримання оптимальних технологічних режимів ВПЕ дає змогу отримувати пресовані ДПМ із достатніми фізико-механічними та експлуатаційними властивостями, близькими до матеріалів на основі первинних термопластів [46,52].

Поліпропілен $\left[\begin{array}{c} -\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$ – гранульований напівпрозорий безбарвний полімер із високим ступенем кристалічності, що характеризується високими фізико-механічними властивостями, твердістю, стійкістю до утворення та розвитку втомних тріщин, добрими антифрикційними властивостями, підвищеною теплостійкістю та високими діелектричними показниками [76, 80].

Поліпропілен є синтетичним полімером, який отримують з використанням продуктів переробки нафти, вугілля та природного газу. У результаті хімічної трансформації цих видів сировини утворюються сполуки з визначеною молекулярною структурою, що обумовлює специфічні властивості матеріалу та його широке промислове застосування. Поліпропілен випускається переважно у вигляді одноколірних гранул розміром 2–5 мм; допускається наявність гранул до 8 мм, а також злиплих частинок (не більше трьох), при цьому насипна щільність матеріалу становить 400–500 кг/м³.

Властивості поліпропілену змінюються в широких межах залежно від молекулярної маси та вмісту ізотактичної фракції (табл. 2.2). Найбільший практичний інтерес становить поліпропілен із молекулярною масою 80 000–200 000 та вмістом ізотактичної частини 80–95%, оскільки саме такі марки забезпечують оптимальне поєднання міцності, жорсткості та технологічності переробки.

Останніми роками поліпропілен, завдяки широкому спектру модифікованих матеріалів на його основі, екологічній безпечності продукції,

а також високій технологічності утилізації та вторинної переробки, поступово витісняє з ринку удароміцний полістирол та полівінілхлоридні матеріали. Сьогодні поліпропілен широко застосовується в електротехніці, електроніці, будівництві, автомобілебудуванні, машинобудуванні, транспорті, приладобудуванні, медицині та інших галузях. За темпами зростання обсягів виробництва поліпропілен посідає провідні позиції у світі, незважаючи на те, що його науково-технічний потенціал ще не реалізований повною мірою [81, 82, 83, 84].

Таблиця 2.2

Властивості поліпропілену

Властивості	Показник
Молекулярна маса, $M \cdot 10^4$	7-35
Розгалуженість, число CH_3 – груп на 1000 атомів, С	3-7
Щільність, $кг/м^3$	945-955
Ступінь кристалічності, %	75-85
Показник текучості розплаву, г/10 хв	0,1-12
Водопоглинання, %	0,01
Температура плавлення, $^{\circ}C$	125-130
Морозостійкість, $^{\circ}C$	-70
Питома теплоємність, $кДж/кг \cdot гр^{\circ}C$	1,9-2,1
Коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(м \cdot ^{\circ}C)$	0,1-0,2

Особливий інтерес для технології плоского пресування становить вторинний поліпропілен, який після подрібнення та повторного плавлення зберігає достатній рівень експлуатаційних властивостей. Незважаючи на певне зниження молекулярної маси внаслідок термоокисної деструкції, вторинний поліпропілен характеризується доброю формоутворювальною здатністю, рівномірним розподілом у матриці композиційного матеріалу та високою адгезією до наповнювачів при введенні відповідних модифікувальних добавок.

Завдяки порівняно невисокій температурі переробки, хорошим антифрикційним властивостям і високій теплостійкості, вторинний поліпропілен є перспективною полімерною матрицею для виготовлення

плоских листових матеріалів методом пресування, зокрема у складі деревинно-полімерних та інших наповнених композицій. Його використання сприяє зниженню собівартості продукції та підвищенню екологічної ефективності матеріалів за рахунок повторного залучення полімерних відходів у виробничий цикл.

Полістирол займає четверте місце у світовому таблиці рангу використання полімерів. Полістирол $\left[\begin{array}{c} -\text{CH}_2 - \text{CH} - \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right]_n$ – синтетичним термопластичним твердим аморфним полімером, який у промислових масштабах випускається у вигляді полістиролу загального призначення та ударостійкого полістиролу. Полістирол загального призначення характеризується високою прозорістю, здатністю до забарвлення та доброю перероблюваністю методами термоформування і пресування.

Полістирол не розчиняється у нижчих спиртах, аліфатичних вуглеводнях, фенолах і простих ефірах, що зумовлює його достатню хімічну стійкість у багатьох експлуатаційних середовищах. Матеріал відзначається високою водостійкістю і вологостійкістю, а також здатністю зберігати властивості за знижених температур. Він добре піддається механічній обробці (різанню, свердлінню, фрезеруванню), що є важливим для виготовлення плоских виробів і листових напівфабрикатів.

Водночас полістирол загального призначення є крихким матеріалом, має низьку ударну міцність і обмежену теплостійкість, що суттєво обмежує його застосування у конструкційних виробках, отриманих методом плоского пресування. Ударостійкий полістирол, який містить каучукову фазу, характеризується підвищеною ударною в'язкістю у широкому температурному діапазоні, однак наявність еластомерного компонента знижує його термо- та світлостійкість.

Для технології плоского пресування важливими перевагами полістиролу є його аморфна структура, відсутність чітко вираженої температури плавлення та здатність формувати гладку, однорідну поверхню

виробів. Разом із тим низька теплостійкість і схильність до крихкого руйнування вимагають обмеження температурних режимів і застосування модифікувальних добавок, особливо у разі використання вторинного полістиролу, властивості якого можуть погіршуватися внаслідок термоокисної деструкції під час повторної переробки.

Полістирол широко застосовується у виробництві виробів побутового та культурно-побутового призначення, у будівництві, світлотехніці, медичній техніці, рекламній продукції, а також для виготовлення тонких орієнтованих плівок. Завдяки високим діелектричним характеристикам полістирол ефективно працює в широкому діапазоні частот і є сировиною для виробництва пінополістиролу та інших теплоізоляційних матеріалів.

Таблиця 2.3

Властивості полістиролу

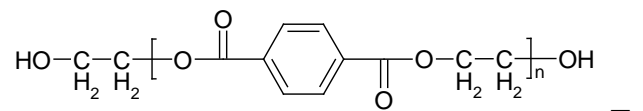
Властивості	Показники
Щільність, кг/м ³	1050-1080
Насипна щільність гранул, кг/м ³	550-560
Лінійна усадка у формі, %	0,4-0,8
Нижня межа робочих температур, °С	(-40).
Верхня межа робочих температур, °С	65-75.
Електрична міцність за частоти 50 Гц, кВ / мм	20-23
Питомий поверхневий електричний опір, Ом	1016
Питомий об'ємний електричний опір:	
за витримки під напругою 1 хв, Ом·см	1017
за витримки під напругою 15 хв, Ом·см	1018
Коефіцієнт термічного лінійного розширення, град ⁻¹	6.10 ⁻⁵ -7 · 10 ⁻⁵ .
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К	0,093-0,140
Питома теплоємність, Дж/кг·К	34,103
Тангенс кута діелектричних втрат за частоти 1 МГц	3 - 4 · 10 ⁻⁴ .

Орієнтований полістирол товщиною менше 75 мкм використовують для «віконць» в картонних коробках пакувальних. Більш товсті плівки використовуються для отримання стаканчиків для торгових автоматів, упаковки у вигляді підносів для фасованого свіжого м'яса, з тим, щоб бачити

під час купівлі обидві сторони продукту. У сучасній будівельній індустрії, а також інших галузях все частіше використовують екструзійний полістирол.

Особливості застосування вторинного ППС: вторинний пінополістирол (перероблений з упаковки або будівельних відходів) може використовуватися як дешевий наповнювач для ДПК, проте його фізико-механічні властивості зазвичай нижчі через часткову деградацію полістиролу при попередній експлуатації або переробці. Для збереження міцності та однорідності матеріалу рекомендується поєднувати вторинний ППС із дрібнодисперсними деревинними волокнами та додатковими модифікаторами.

Поліетилентерефталат (ПЕТ)



є складним термопластичним полієфіром терефталієвої кислоти та етиленгліколю, який поєднує високу міцність, жорсткість і відносно невелику густину. Завдяки високій механічній міцності, твердості, низькому коефіцієнту теплового розширення та високій опірності утворенню і розвитку тріщин, ПЕТ належить до перспективних полімерних матеріалів для виготовлення плоских листових виробів методом пресування.

ПЕТ характеризується низьким вологопоглинанням, стабільно низьким коефіцієнтом тертя, високою зносостійкістю, добрими діелектричними властивостями та стійкістю до дії іонізуючого випромінювання. Важливою перевагою матеріалу є його фізіологічна інертність і хімічна стійкість до більшості мийних і чистильних засобів, що дозволяє застосовувати його у виробках, які контактують з харчовими та фармацевтичними продуктами.

Для технології плоского пресування суттєве значення має здатність ПЕТ формувати щільну та однорідну структуру при охолодженні під тиском. Однак через відносно високу температуру плавлення та схильність до термоокисної деструкції ПЕТ потребує ретельного контролю режимів пресування і попереднього сушіння сировини. Особливо це актуально при

використанні вторинного поліетилентерефталату, який може містити залишкову вологу та продукти деградації.

Незважаючи на певне зниження молекулярної маси після повторної переробки, вторинний ПЕТ за умови застосування стабілізаторів і модифікувальних добавок зберігає достатній рівень фізико-механічних властивостей і придатний для виготовлення плоских пресованих матеріалів, зокрема у складі композицій з наповнювачами. Його використання є економічно та екологічно доцільним, оскільки забезпечує утилізацію полімерних відходів і зниження собівартості готової продукції.

Завдяки поєднанню високих експлуатаційних характеристик і можливості повторної переробки, ПЕТ широко застосовується у виробництві пакувальних матеріалів, плівок, волокон і конструкційних елементів, а також має перспективи використання у листових композиційних матеріалах, отриманих методом плоского пресування.

2.3. Модифікувальні добавки у виготовленні деревинно-полімерних матеріалів

Міцний зв'язок між деревинним волокном і полімерною матрицею є визначальним чинником покращення фізико-механічних властивостей деревинно-полімерних матеріалів. Проте через полярну природу деревини та гідрофобність більшості полімерів ці компоненти є суттєво несумісними. Підвищення сумісності можливе шляхом фізичного або хімічного модифікування полімерної матриці чи деревинного наповнювача, а також завдяки застосуванню компатибілізаторів або зв'язуючих речовин [50]. Хімічні модифікатори, що впливають на міжфазну взаємодію та адгезійні процеси, здатні істотно підвищувати експлуатаційні характеристики ДПМ. За даними окремих досліджень, за умови правильного підбору сумісних компонентів міцність ДПМ на розтяг і вигин може зростати у 2–4 рази, жорсткість — до 40%, ударна в'язкість — щонайменше подвоюватися, тоді

як щільність і водопоглинання змінюються у 2–4 рази залежно від тривалості контакту з водою [51].

Оскільки ДПМ за своєю природою є багатокомпонентними матеріалами, повторне використання змішаних полімерних відходів у складі композитів вважається технологічно простішим, ніж їх перероблення у вигляді однорідної вторинної сировини. Такий підхід забезпечує додаткові екологічні переваги порівняно з використанням первинних полімерів [52, 53]. Застосування вторинних пластмас у ДПК для виробництва товарів з підвищеною доданою вартістю викликало значний інтерес серед дослідників, які відзначають перспективність біорозкладних полімерів для створення нових композиційних матеріалів. Водночас, попри доведену ефективність модифікації міжфазної взаємодії у покращенні властивостей ДПМ [54, 55], питання одночасного використання кількох зв'язуючих речовин залишається недостатньо вивченим. За наявності полімерних відходів у складі композиції несумісність різних полімерів у поєднанні з обмеженою адгезією між деревиною та полімерною матрицею суттєво ускладнює використання змішаних біополімерів у ДПМ.

Найпоширенішими сумісниками для ДПМ є малеїнові та малеїново-щеплені поліолефіни [56], які демонструють підвищену ефективність у композитах на основі сумішей поліетилену та поліпропілену. Крім того, функціональні поліолефіни можуть бути повторно використані для зшивання кополімерів, що свідчить про перспективність застосування терефталатних сполук у ДПК, отриманих із сумішей пластикових відходів, з метою покращення їхніх механічних характеристик [85–87].

Для покращення фізико-механічних властивостей деревинно-полімерних матеріалів (ДПМ) до складу композиції вводять різноманітні модифікувальні добавки. Наприклад, ДПМ на основі вторинного поліетилену (ВПЕ) демонструють добрі показники міцності та водостійкості при вмісті деревинного наповнювача до 50% маси. Подальше збільшення частки наповнювача призводить до зниження водостійкості та погіршення міцнісних

характеристик матеріалу. Для збереження належних експлуатаційних властивостей при більш високому вмісті деревини використовують модифікатори, які компенсують негативні ефекти.

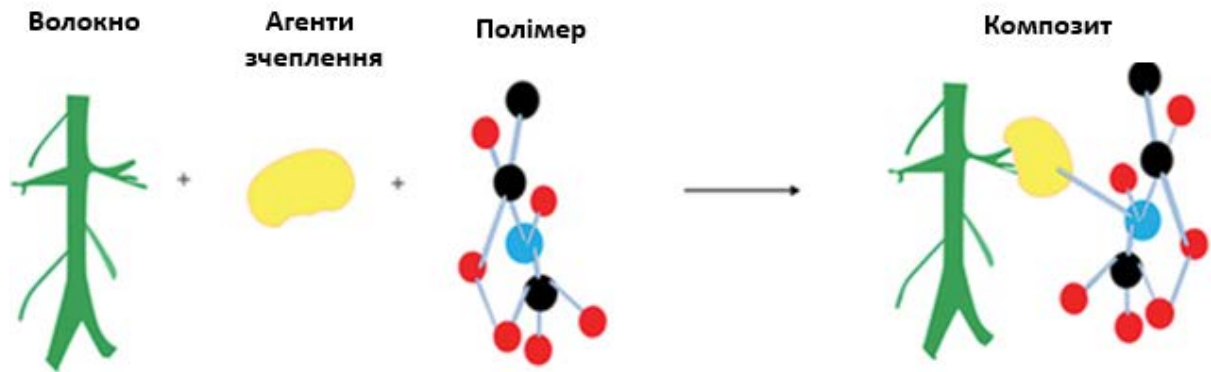


Рисунок 2.3. Схематичне зображення взаємодії деревини із полімером

Серед поширених модифікаторів деревинно-полімерних матеріалів (ДПМ) виділяють полівініловий спирт (ПВС), стеаринову кислоту, поліетиленовий віск ПВ-200, парафін, бітум, рідке скло, дисперсію полівінілацетату (ПВА) та карбамідоформальдегідну смолу (КФС) [88]. Зазвичай їхній вміст у композиції становить 0,5–7%.

Дослідження показали, що бітум, дисперсія ПВА, рідке скло та поліетиленовий віск лише незначно підвищують міцність та водостійкість матеріалу. Використання карбамідоформальдегідних смол сприяє поліпшенню механічних властивостей ДПМ, проте в зазначених концентраціях не забезпечує достатньої водостійкості. Найбільш ефективними модифікаторами виявилися полівініловий спирт і парафін, які значно покращують фізико-механічні показники, зокрема водостійкість та тривкість композиції.

Введення парафіну у ДПМ підвищує експлуатаційні характеристики матеріалу. При збільшенні його вмісту зростає водостійкість, оскільки

парафін формує на поверхні деревинних частинок захисний шар, що запобігає проникненню води в капілярно-пористу структуру деревини. Крім того, парафін, будучи низькомолекулярним аналогом поліетилену, зменшує в'язкість розплаву полімеру, що покращує змочування деревинного наповнювача та механічне зчеплення між полімерною матрицею і деревинними частинками.

Концентрація парафіну понад 10% вважається недоцільною: подальше підвищення міцності матеріалу сповільнюється, а межа міцності при статичному згині та ударна в'язкість знижуються, хоча водостійкість досягає максимуму. Оптимальний баланс між механічними властивостями та водостійкістю забезпечується при використанні парафіну у межах до 10% масової частки [89].

Введення модифікувальних добавок та контроль дисперсності вихідних полімерів є ефективним методом підвищення міцності та експлуатаційних характеристик ДПМ. Це сприяє оптимізації взаємодії компонентів на межі розділу фаз та активізації поверхні деревинного наповнювача.

З фізико-хімічної точки зору при нагріванні та дії тиску деревина частково піддається термічному розкладу. Утворення функціональних груп C=O, COOH, а також легко гідролізованих полісахаридів і олігосахаридів сприяє формуванню продуктів конденсації та полімеризації, що виконують роль природного клею. Це підвищує міцність, пластичність і водостійкість ДПМ під час формування [57-60].

Застосування модифікувальних добавок дозволяє зменшити вміст полімерної матриці до 25–30%, зберігаючи або навіть покращуючи фізико-механічні властивості матеріалу. Таким чином, введення добавок підвищує ефективність виробництва ДПМ, знижуючи витрати на полімерну складову без втрати експлуатаційних характеристик.

Використання вторинного поліетилену, окрім економічного ефекту, має й інші переваги. Зокрема, протягом терміну служби поліетиленових

виробів внаслідок впливу ультрафіолетових променів та кисню відбувається руйнування основного ланцюга з утворенням простих і складних ефірних зв'язків та гідроксильних груп. Наявність цих груп дозволяє створювати хімічні зв'язки між реакційними центрами деревини та поліетилену. Відповідно, це сприятиме підвищенню міцності на вигин та водостійкості ДПК на основі поліетилену.

РОЗДІЛ 3. РОЛЬ СИРОВИНИ У ФОРМУВАННІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНИХ

3.1. Вплив наповнювача на властивості деревинно-полімерних матеріалів

Властивості деревинно-полімерних матеріалів значною мірою визначаються типом і характеристиками вихідної сировини – як деревинного наповнювача, так і полімерної матриці. Вид деревини, форма наповнювача (борошно, тирса, стружка), його фракційний склад, вологість і хімічний склад безпосередньо впливають на міцність, водостійкість, щільність та довговічність ДПМ. Наповнювачі з об'ємною густиною, близькою до густини термопластів, забезпечують кращу однорідність структури та ефективніше передавання навантажень у композиті.

Не менш важливу роль відіграє тип полімерної матриці. Вторинні термопласти, зокрема поліетилен і поліпропілен, є технологічно доступними та економічно доцільними, а також забезпечують достатню водо- й хімічну стійкість ДПМ. Вміст полімеру визначає ступінь змочування деревинних частинок і формування міжфазної адгезії: за недостатньої кількості полімеру знижується міцність і водостійкість, тоді як надмірний вміст погіршує жорсткість і підвищує собівартість матеріалу. Оптимальним вважається діапазон 40–60% полімерної складової.

Таким чином, раціональний добір сировини та її співвідношення є ключовою умовою отримання ДПМ із заданими фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками, а також підвищення ефективності їх виробництва й використання.

Композити з невисоким вмістом деревини (до 15%).

Деревинний наповнювач виконує роль модифікувальної добавки. Полімерна матриця залишається слабоорієнтованою. Частинки деревини розділяють граничні шари полімеру, що зумовлює зниження міцності під час розтягування та ударної в'язкості зі збільшенням частки наповнювача.

Композити з підвищеним вмістом деревинного наповнювача (15–50%).

Властивості композиту визначаються товщиною полімерного шару між частинками деревини. У зоні поблизу деревинних частинок полімер має орієнтовану структуру, яка поступово переходить у слабоорієнтовану, а далі – в повністю неорієнтовану. Зміни властивостей із варіацією вмісту наповнювача є незначними.

Композити з високим вмістом деревинного наповнювача (50–60%).

Полімер здебільшого перебуває в орієнтованому стані, утворюючи міцний каркас із деревинних частинок, вкритих полімерним шаром. Властивості таких композитів значною мірою залежать від структури деревинних частинок, що утворюють основу матеріалу.

Ця класифікація дозволяє визначити оптимальну композицію матеріалу залежно від необхідних властивостей готового виробу.

Основним недоліком ДПМ є їх низька ударна міцність порівняно з вихідним ненаповненим полімером. Однак цей недолік можна компенсувати шляхом введення спеціальних модифікувальних добавок у композицію або шляхом личкування виробів декоративними плівками та тканинами, що покращують зовнішній вигляд і механічні властивості матеріалу [61].

Встановлено, що зі зростанням ступеня наповнення вплив швидкості зсуву на величину дотичних напружень істотно зменшується. Водночас відносні зміни межі текучості композицій на основі поліпропілену і тирси зі збільшенням вмісту наповнювача є менш вираженими порівняно зі змінами коефіцієнтів консистенції. Це свідчить про те, що композиції з високим вмістом тирси характеризуються покращеними реологічними властивостями, однак супроводжуються зниженням текучості матеріалу. Максимальні значення межі міцності під час статичного та динамічного згинів спостерігаються в ДПМ, виготовлених на основі деревинних частинок розміром 0,5–1,0 мм. Протидія стиску досягає найвищих показників під час використання частинок розміром 0,25–1,0 мм. Зі зменшенням розміру

деревинних частинок відбуваються такі позитивні зміни: збільшується площа контакту між частинками деревини та полімером, а також між самими частинками; зменшуються товщини шарів полімеру; знижуються внутрішні напруження матеріалу, що сприяє полегшенню процесу деформування під час пресування; підвищується армувальна дія деревинних частинок, що покращує фізико-механічні властивості матеріалу.

Однак подальше надмірне зменшення розміру частинок призводить до різкого погіршення фізико-механічних характеристик. Це пов'язано з руйнуванням волокнистої структури частинок, що знижує їх армувальну здатність і негативно впливає на загальну міцність композиції.

Дослідження з використання деревинної стружки різних фракцій [50, 90] для виготовлення ДПМ показали важливість розміру частинок і їх вплив на властивості композиту. У роботі [56] використовували соснову стружку з розмірами частинок: довжина 12–20 мм, ширина 1,1–4,5 мм, товщина 0,1–0,3 мм. Як матрицю застосовували попередньо подрібнений вторинний поліетилен (ВПЕ) із частинками ≤ 2 мм.

Із підвищенням вмісту деревинної стружки спостерігається різке збільшення водопоглинання та набрякання композиту через зменшення шару полімеру на поверхні деревинних частинок, що полегшує проникнення води в капілярно-пористу структуру деревини.

У разі невеликого вмісту стружки міцність ДПМ знижується через збільшення товщини прошарків полімеру між частинками наповнювача, поступове розчинення деревинного каркасу в полімерній матриці та зниження його армувальної здатності.

Фізичні та механічні властивості плоскопресованих ДПМ, виготовлених методом сухого змішування, не були широко вивчені. Для цього були досліджені фізичні та механічні властивості панелей ДПМ, виготовлених з різних сумішей деревного волокна та порошку поліпропілену (ПП), за допомогою методу, який зараз використовується в деревообробній промисловості [18].

Водостійкість ДПМ покращувалася зі зменшенням вмісту деревного волокна. Це пояснюється гідрофобним характером полімеру, оскільки він не має функціональних полярних груп, таких як гідроксильні, в молекулярній структурі і, таким чином, хімічно неактивний. Деревина - це гідрофільний пористий композит з целюлози, лігніну та геміцелюлозних полімерів, багатих на функціональні групи, такі як гідроксильні, які легко взаємодіють з молекулами води шляхом утворення водневих зв'язків [91]. З цієї причини ДПМ мають потенціал поглинати воду у вологих умовах завдяки наявності численних гідроксильних груп.

Ще одним неприємним явищем є те, що поглинання води може призвести до швидшого окислення виробів з ДПМ, оскільки вода служить каталізатором під час окислення полімеру. Матеріали ДПМ поглинають воду завдяки своїй пористості. При поглинанні води вироби з ДПМ збільшуються в об'ємі, а тиск у точках контакту зростає, що може призвести до викривлення виробів з ДПМ.

На наступному рисунку 3.1 показано вплив розміру деревних частинок у поєднанні зі співвідношенням пластик/деревина на щільність композитів. Цей рисунок показує цей вплив для композитів, виготовлених з первинної матриці поліетилену високої щільності, а також з переробленого поліетилену. Ми бачимо, що у всіх умовах композити на основі переробленого поліетилену мають вище значення щільності. Це зумовлено використанням невизначеного зразка кришок від ПЕТ-пляшок [92].

Фізичні та механічні властивості плоскопресованих плит ДПМ, виготовлених із використанням вторинного поліетилену, істотно залежать від типу деревного наповнювача. У роботі для цього випробування було обрано три типи деревних наповнювачів: борошно, стружка, суміш відходів стружки та тирси (10:90). Співвідношення деревного наповнювача до вторинного поліетилену становило 40/60. Плити розміром $250 \times 230 \times 8$ мм пресували під тиском 3,5 МПа, температурою (Т) 180 °С та часом (τ) 8,0 хв. Використана прес-форма дозволяє виготовляти плити з однаковою щільністю в межах \pm

2,5%. Після завершення циклу пресування плиту виймали з преса для охолодження до температури 30–40 °С [93].

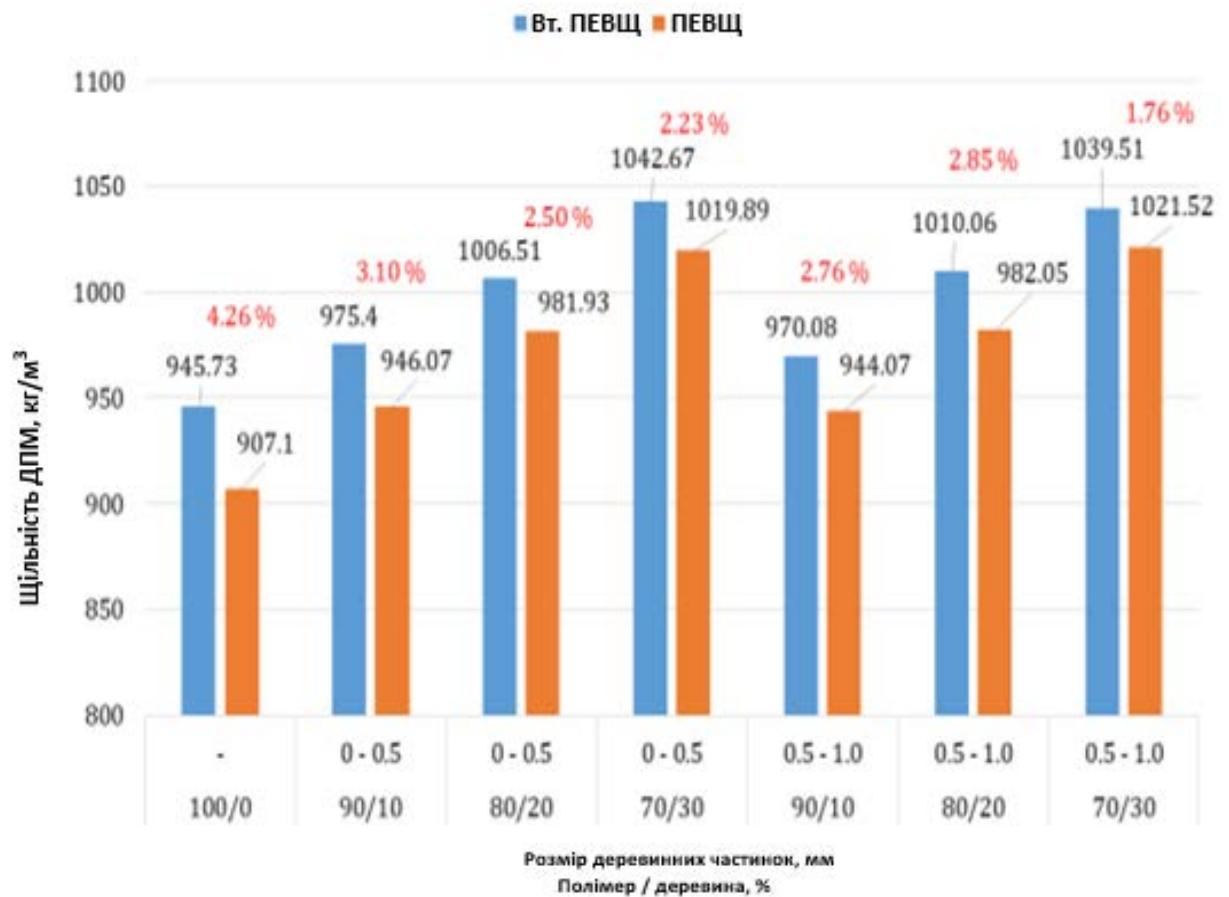


Рисунок 3.1. Вплив розміру деревних частинок у поєднанні зі співвідношенням пластик/деревина на щільність ДПМ

На рисунку 3.2 наведено вплив деревних наповнювачів на водопоглинання та набрякання по товщині плоскопресованих плит ДПМ.

Водостійкість плит ДПМ зростає зі збільшенням частки вторинного поліетилену в композиції, що пояснюється кращим інкапсулюванням деревинних частинок полімерною матрицею та зменшенням доступу вологи до капілярно-пористої структури деревини.

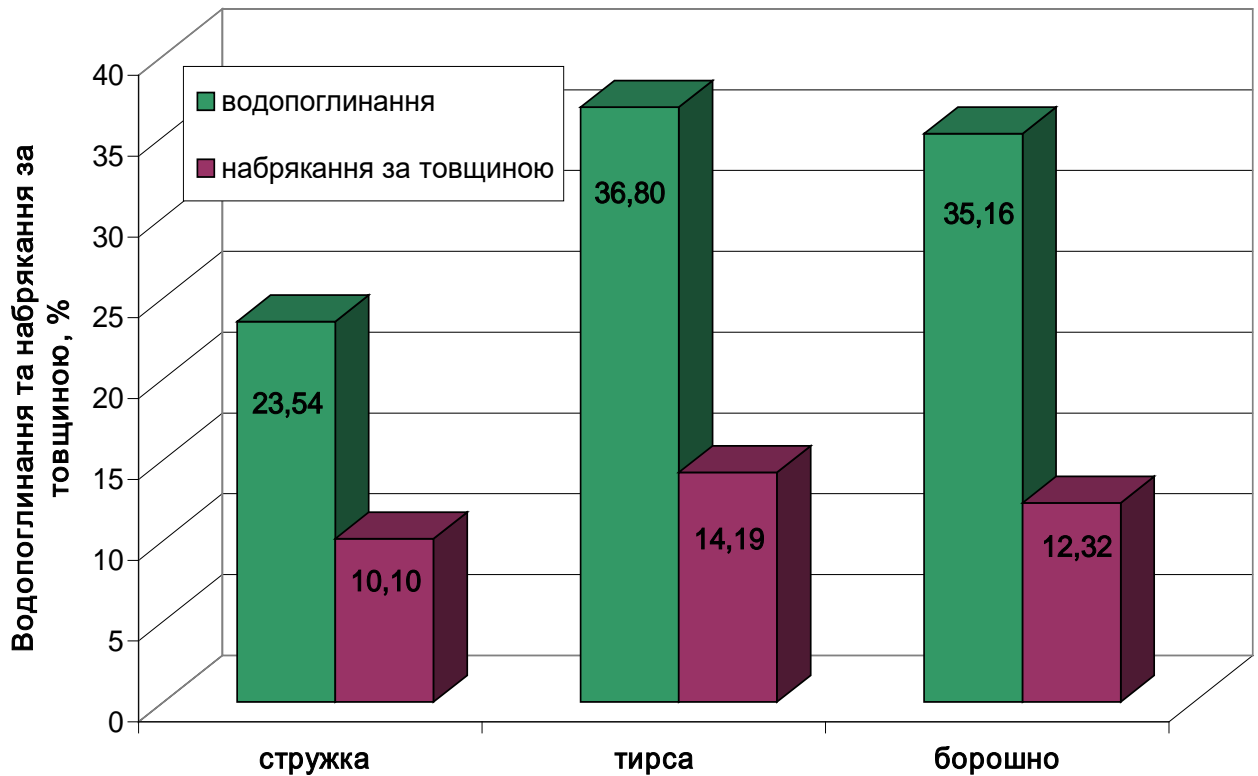
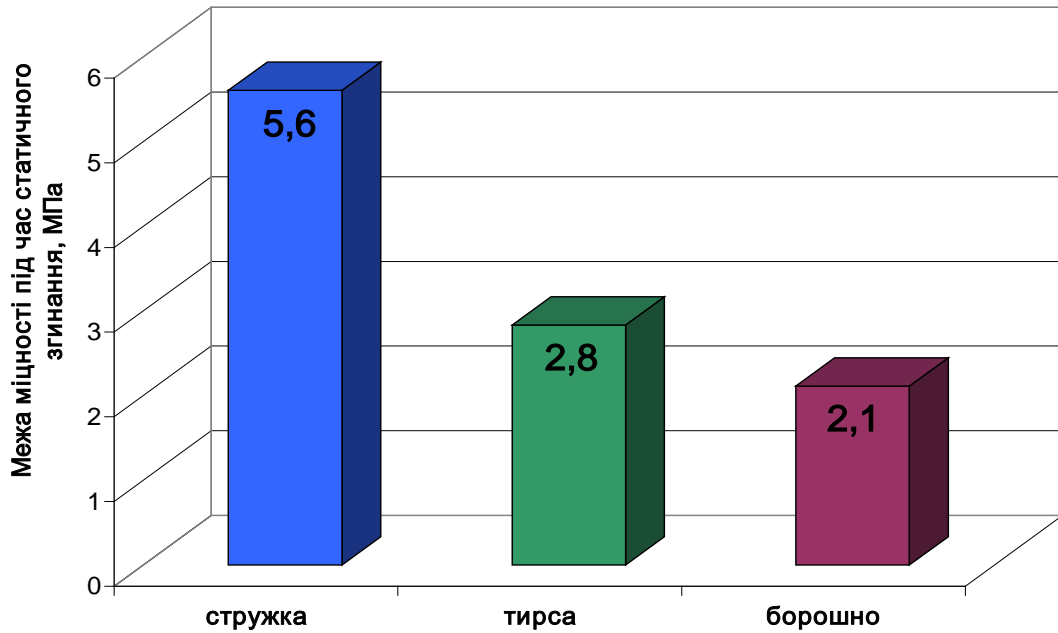


Рисунок 3.2. Вплив деревних наповнювачів на водопоглинання та набрякання за товщиною плоскопресованих плит ДПМ

Значення водопоглинання та набрякання за товщиною плит ДПМ, виготовлених з використанням тирси, були в 1,56 та 1,4 рази вищими, ніж у плит ДПМ, виготовлених з використанням стружки. Але водопоглинання та набрякання за товщиною плит ДПМ, виготовлених з використанням деревного борошна, були відповідно в 1,49 та 1,22 рази вищими, ніж у плит ДПМ, виготовлених з використанням деревних стружки. При цьому кращі значення водостійкості спостерігалися у плит ДПМ, виготовлених з використанням деревних частинок. Значення набрякання за товщиною плит ДПМ для всіх деревних наповнювачів були меншими, ніж у стружкових плит типу Р4-Р7 (9-16 % максимальних вимог EN 312), МДФ (12-17 % максимальних вимог EN 622-5) та OSB (12-25 % максимальних вимог EN 300).

Найвищі значення міцності на згин та кращі значення водостійкості спостерігалися у ДПМ, виготовленого з використанням деревинної стружки. Зокрема, міцність на згин ДПМ, виготовленого з використанням деревинної стружки, була вдвічі вищою порівняно з використанням деревинної стружки із тирсою та в 2,76 раза вищою порівняно з використанням деревного борошна (рис. 3.3, а).

а)



б)

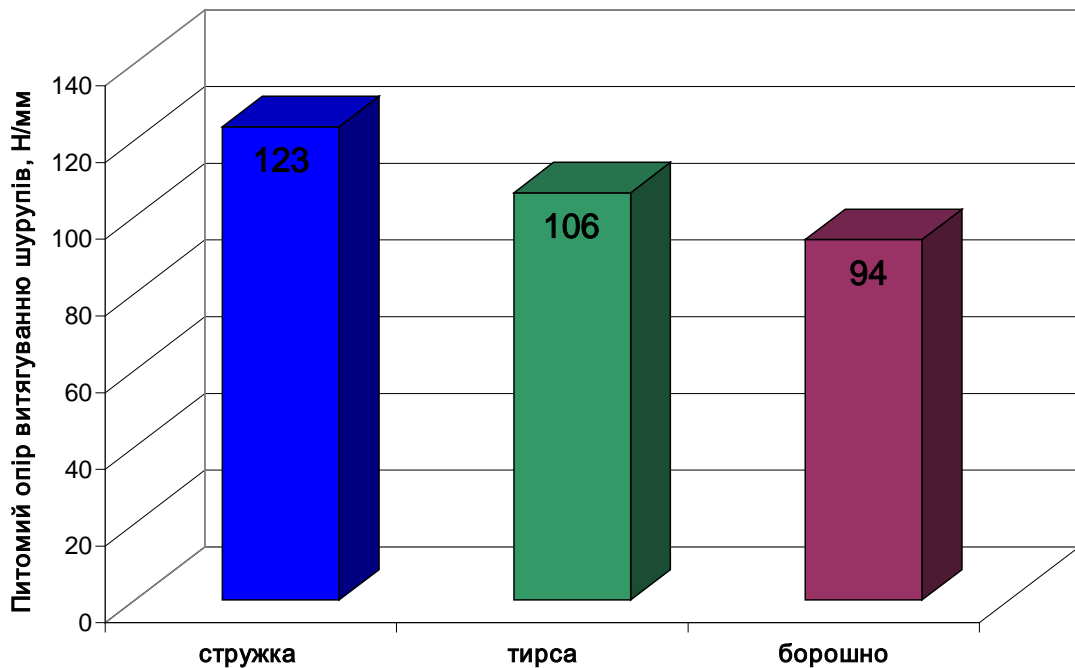


Рисунок 3.3. Вплив деревних наповнювачів на міцність на згин (а) та опір витягуванню шурупів (б) плоскопресованих ДПМ

Опір витягуванню шурупа для ДПМ, виготовленого з використанням деревинної стружки та тирси та деревного борошна, був відповідно в 1,16 та 1,31 раза нижчим порівняно з ДПМ, виготовленим з використанням деревних частинок (рис. 3.3, б).

Однак слід зазначити, що значення міцності на згин плоскопресованих плит ДПК з усіма типами деревного наповнювача не відповідають стандартам для ДСП (мінімум 12,5 МПа згідно з вимогами EN 312), МДФ (мінімум 23 МПа згідно з EN 622-5) та ОСП (мінімум 20 МПа згідно з EN 300).

Фізико-механічні властивості плоскопресованих плит ДПМ, виготовлених із використанням вторинного поліетилену, істотно залежать від типу деревного наповнювача. Найвищі значення міцності на вигин та опору витягуванню шурупів зафіксовано для плит ДПМ, виготовлених із використанням деревних частинок. Для цих плит також характерні кращі показники водостійкості порівняно з матеріалами, що містять інші типи деревних наповнювачів [91-94].

Суттєвий вплив на властивості плоскопресованих плит ДПМ має співвідношення деревних частинок і вторинного поліетилену. Максимальні значення міцності на згин спостерігалися у плит зі співвідношенням деревних частинок до полімеру 40/60. Подальше збільшення або зменшення вмісту деревної складової призводить до зниження міцності на згин. Водночас водостійкість плит підвищується зі збільшенням частки вторинного поліетилену в композиції.

Покращення водостійкості та міцності плит ДПМ на згин також відзначено зі збільшенням щільності матеріалу в діапазоні від 800 до 1000 кг/м³.

Традиційний процес плоского пресування, застосований у лабораторних умовах, показав, що плити ДПМ, виготовлені з використанням вторинного поліетилену, характеризуються вищою водостійкістю та кращою стійкістю до витягування шурупів порівняно з традиційними плитами на

деревній основі (ДСП, МДФ та OSB). Водночас значення міцності на згин плоскопресованих плит ДПМ є нижчими за нормативні вимоги до ДСП, МДФ та OSB, що зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на підвищення цього показника.

3.2. Стабілізування впливу ультрафіолетового випромінювання на деструкцію деревинно-полімерних матеріалів

Ультрафіолетове (УФ) випромінювання є одним з основних чинників атмосферного старіння деревинно-полімерних матеріалів, що призводить до фотодеструкції полімерної матриці та деревинного наповнювача, погіршення механічних властивостей і зниження декоративної стабільності поверхні. Це суттєво обмежує довговічність ДПМ при зовнішньому застосуванні.

Основними способами стабілізації УФ-стійкості деревинно-полімерних матеріалів є: використання УФ-стабілізаторів, застосування пігментів і наповнювачів, поверхневий захист. Зокрема, для підвищення довговічності таких матеріалів до складу ДПМ вводять стабілізуювальні добавки, зокрема світлостабілізатори на основі стерично ускладнених амінів (hindered amine light stabilizers / HALS) і поглиначі ультрафіолетового випромінювання (UVA) [95, 96]. Діестерні HALS ефективно стабілізують колір ДПК завдяки здатності нейтралізувати вільні радикали, що утворюються внаслідок УФ-опромінення. Встановлено, що зі зростанням молекулярної маси діестерів підвищується їх стабільність у складі композиту.

Поєднання бензотриазольних поглиначів УФ-випромінювання з діестерними HALS проявляє синергетичний ефект, що суттєво зменшує інтенсивність зміни кольору композитів під час експлуатації.

Досліджено вплив трьох різних УФ-стабілізаторів на властивості деревинно-ролівінілхлоридних композитів [97]. Отримані результати свідчать, що введення УФ-стабілізаторів ефективно знижує фотодеградацію

ДПМ, водночас істотного впливу на їх механічні властивості не виявлено. Ці ж автори також проаналізували дію термічних стабілізаторів на структурні та теплові характеристики ДПМ [95]. Було встановлено, що наявність деревинного борошна прискорює термічну деградацію ДПМ, однак цей негативний ефект можна зменшити шляхом введення стеаратів металів та органосвинцевих сполук. Зокрема доведено, що метилолов'яний меркаптід істотно підвищує термічну стабільність композитів на основі деревини та полімеру.

3.3. Шляхи підвищення вогнестійкості деревинно-полімерних матеріалів

В інженерних застосуваннях вогнестійкість є важливою властивістю, якщо деревинно-полімерні матеріали розглядаються як будівельний матеріал. ДПМ є горючими та вогнестійкими матеріалами, оскільки як деревина, так і полімерні матеріали за своєю природою є горючими. Тому підвищення їхньої вогнестійкості є важливим науково-технічним завданням, особливо з огляду на застосування ДПМ у будівельних конструкціях і оздоблювальних елементах, де діють вимоги пожежної безпеки, встановлені міжнародними та національними стандартами, зокрема документами International Organization for Standardization та європейської системи класифікації реакції на вогонь.

Основними шляхами підвищення вогнестійкості ДПМ є: використання антипіренів, модифікування деревинного наповнювача, аибір полімерів із вищою термічною стабільністю (наприклад, модифікованих поліолефінів або термостійких біополімерів), застосування мінеральних наповнювачів (гідроксиди алюмінію або магнію, тальк, вермикуліт), поверхнева обробка та захисні покриття або комплексний підхід до виготовлення матеріалу.

Найефективнішим способом надання вогнестійких властивостей ДПМ є введення антипіренів безпосередньо під час процесу компаундування [34,35]. У цій галузі поліфосфат амонію (ПФА) є стандартним, високоефективним і широко застосовуваним інтенсифікованим антипіреном для підвищення вогнестійкості деревинно-полімерних матеріалів [86, 87, 99]. Для досягнення ще вищого рівня вогнестійкості ПФА комбінують із такими добавками, як еластичні графенові листи, SiO_2 або CaCO_3 , а також з розширюваним графітом, що дозволяє отримати оптимальний баланс між стійкістю до горіння та експлуатаційними властивостями ДПМ [99].

Окрім цього, ефективність як антипіренів для ДПМ продемонстрували неорганічні добавки, зокрема алюмінієвий порошок і сульфат магнію, які застосовують як самостійно, так і в поєднанні з ПФА. Також були розроблені органічні антипірени, спрямовані на покращення бар'єрних властивостей композитів шляхом інтенсифікації процесів утворення вуглецевого шару. Водночас досягнення прийняттого рівня вогнестійкості зазвичай потребує введення значних кількостей антипіренів, що може негативно впливати на механічні властивості ДПМ [100–102]. Несумісність багатьох антипіренів з полімерною матрицею призводить до зниження ударної в'язкості та міцності при розтягу, що робить актуальним пошук технічних рішень для збалансування вогнестійкості та інших експлуатаційних властивостей матеріалу. У попередніх дослідженнях показано, що введення нанонаповнювачів здатне одночасно підвищувати вогнестійкість полімерних композитів і покращувати їхні механічні характеристики.

Для забезпечення вогнестійкості важливо утворювати фосфати матеріалу в присутності кисню, оскільки більшість компонентів ДПМ вважаються хорошими джерелами кисню. Також можна використовувати ефективні вогнезахисні речовини, такі як галогеновані сполуки хлору та бром, але оскільки вони виділяють токсичні гази під час реакції, їх слід уникати.

Дослідження науковців [103] показали, що через додавання вогнезахисних речовин було виявлено лише незначне падіння механічних властивостей, і для зниження швидкості горіння ДПМ до 50% без використання вогнезахисної речовини ефективною була 25% гідроксиду магнію.

Самозагасаючі матеріали були розроблені з композитів на основі ПЕ завдяки додаванню вогнезахисних речовин при використанні реагентів гідроксиду або фосфату. Експерименти з конусною калориметрією, проведені Старком та ін. [104, 105] дійшли висновку, що фосфат або гідроксид та різні інші вогнезахисні речовини можна використовувати для ДПМ.

Підвищення пожежної безпеки деревинно-полімерних матеріалів можливе завдяки комплексному підходу, що поєднує використання екологічно безпечних антипіренів, модифікування деревинного наповнювача, оптимізацію складу полімерної матриці та застосування захисних покриттів. Такий підхід дозволяє досягти необхідних показників вогнестійкості без істотного погіршення механічних і експлуатаційних властивостей матеріалів.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Деревинні полімерні матеріали мають дуже високий потенціал і є екологічно чистими матеріалами для досягнення довговічності без надмірного використання токсичних хімічних речовин. У порівнянні з іншими волокнистими матеріалами, рослинні волокна, як правило, придатні для армованого пластику завдяки їх відносно високій жорсткості та міцності, низькій вартості, здатності до біологічного розкладання, низькій щільності, низьким викидам CO₂ та сировині, що щорічно відновлюються.

Деревинно-полімерні матеріали містять гідрофобну матрицю та гідрофільні лігноцелюлозні волокна. Здатність поглинати вологу в основному зумовлена наявністю гідроксильних груп у лігноцелюлозних волокнах. Властивості ДПМ тісно пов'язані з вмістом деревини.

З економічної точки зору використання деревинних частинок великих розмірів є вигідним, оскільки вони дешевші у виробництві. Однак їх використання може призвести до підвищення шорсткості поверхні виробу, нерівномірності властивостей та зниження продуктивності обладнання через меншу насипну щільність таких частинок. Оптимальний розмір деревинних частинок для досягнення бажаних властивостей матеріалу становить 3–6 мм.

Для отримання деревинно-полімерних матеріалів (ДПМ) із високими фізико-механічними властивостями доцільно використовувати деревинне борошно, тирсу або стружку як наповнювач, а вторинний поліетилен, поліпропілен або поліметилметакрилат — як полімерну матрицю. Оптимальний вміст полімерної складової становить 40–60%, оскільки саме співвідношення полімеру та вид деревинного наповнювача визначають основні експлуатаційні характеристики ДПМ.

Як полімерну складову рекомендується використовувати порошкоподібний або гранульований вторинний поліетилен, поліпропілен або поліметилметакрилат із масовою часткою в межах 40–60%. Зазначене співвідношення компонентів дає змогу отримувати композиційні матеріали з

оптимальним поєднанням міцності, водостійкості та технологічності перероблення.

Використання вторинного поліетилену, окрім економічного ефекту, має й інші переваги. Зокрема, протягом терміну служби поліетиленових виробів внаслідок впливу ультрафіолетових променів та кисню відбувається руйнування основного ланцюга з утворенням простих і складних ефірних зв'язків та гідроксильних груп. Наявність цих груп дозволяє створювати хімічні зв'язки між реакційними центрами деревини та поліетилену. Відповідно, це сприятиме підвищенню міцності на вигин та водостійкості ДПК на основі поліетилену.

Підвищення пожежної безпеки деревинно-полімерних матеріалів можливе завдяки комплексному підходу, що поєднує використання екологічно безпечних антипіренів, модифікування деревинного наповнювача, оптимізацію складу полімерної матриці та застосування захисних покриттів. Такий підхід дозволяє досягти необхідних показників вогнестійкості без істотного погіршення механічних і експлуатаційних властивостей матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Li, X., Ling, T.-C., Mo, K. H. Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete—A review // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 240. – Article 117869. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117869.
2. Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E. Plastics recycling: Challenges and opportunities // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. – 2009. – Vol. 364. – P. 2115–2126. – DOI: [10.1098/rstb.2008.0311](https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311).
3. Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Mohamed, A. M. Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9. – P. 4631–4643. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.01.079.
4. Lin, T. A., Lin, J.-H., Bao, L. Polypropylene/thermoplastic polyurethane blends: Mechanical characterizations, recyclability and sustainable development of thermoplastic materials // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2020. – Vol. 9. – P. 5304–5312. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.03.089.
5. Wu, Y., Ge, S., Xia, C., Mei, C., Kim, K.-H., Cai, L., Smith, L. M., Lee, J., Shi, S. Q. Application of intermittent ball milling to enzymatic hydrolysis for efficient conversion of lignocellulosic biomass into glucose // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 136. – Article 110442. – DOI: 10.1016/j.rser.2020.110442.
6. Nampoothiri, K. M., Nair, N. R., John, R. P. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research // *Bioresource Technology*. – 2010. – Vol. 101. – P. 8493–8501. – DOI: 10.1016/j.biortech.2010.05.092.
7. Wu, Y., Xia, C., Cai, L., Garcia, A. C., Shi, S. Q. Development of natural fiber-reinforced composite with comparable mechanical properties and reduced energy consumption and environmental impacts for replacing automotive glass-fiber sheet molding compound // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 184. – P. 92–100. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.238.

8. Wu, Y., Xia, C., Cai, L., Shi, S. Q., Cheng, J. Water-resistant hemp fiber-reinforced composites: In-situ surface protection by polyethylene film // *Industrial Crops and Products*. – 2018. – Vol. 112. – P. 210–216. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.12.039.

9. Xia, C., Wu, Y., Qiu, Y., Cai, L., Smith, L. M., Tu, M., Zhao, W., Shao, D., Mei, C., Nie, X., et al. Processing high-performance woody materials by means of vacuum-assisted resin infusion technology // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 241. – Article 118340. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118340.

10. Ge, S., Foong, S. Y., Ma, N. L., Liew, R. K., Mahari, W. A. W., Xia, C., Yek, P. N. Y., Peng, W., Nam, W. L., Lim, X. Y., et al. Vacuum pyrolysis incorporating microwave heating and base mixture modification: An integrated approach to transform biowaste into eco-friendly bioenergy products // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 127. – Article 109871. – DOI: 10.1016/j.rser.2020.109871.

11. Ge, S., Wu, Y., Peng, W., Xia, C., Mei, C., Cai, L., Shi, S., Sonne, C., Lam, S. S., Tsang, Y. F. High-pressure CO₂ hydrothermal pretreatment of peanut shells for enzymatic hydrolysis conversion into glucose // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 385. – Article 123949. – DOI: 10.1016/j.cej.2019.123949.

12. Adhikary, K. B., Pang, S., Staiger, M. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE) // *Composites Part B: Engineering*. – 2008. – Vol. 39. – P. 807–815. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2007.10.005.

13. Gardner, D. J., Han, Y., Wang, L. Wood–Plastic Composite Technology // *Current Forestry Reports*. – 2015. – Vol. 1. – P. 139–150. – DOI: 10.1007/s40725-015-0016-6.

14. Ge, S., Yek, P. N. Y., Cheng, Y. W., Xia, C., Mahari, W. A. W., Liew, R. K., Peng, W., Yuan, T.-Q., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., et al. Progress in microwave pyrolysis conversion of agricultural waste to value-added biofuels: A batch to continuous approach // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 135. – Article 110148. – DOI: 10.1016/j.rser.2020.110148.

15. Xia, C., Garcia, A. C., Shi, S. Q., Qiu, Y., Warner, N., Wu, Y., Cai, L., Rizvi, H. R., D'Souza, N. A., Nie, X. Hybrid boron nitride-natural fiber composites for enhanced thermal conductivity // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – Article 1–8. – DOI: [10.1038/srep34136](https://doi.org/10.1038/srep34136).

16. Najafi, S. K. Use of recycled plastics in wood plastic composites—A review // *Waste Management*. – 2013. – Vol. 33. – P. 1898–1905. – DOI: [10.1016/j.wasman.2013.05.017](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.017).

17. Yu, Q., Wang, Y., Ye, H., Sheng, Y., Shi, Y., Zhang, M., Fan, W., Yang, R., Xia, C., Ge, S. Preparation and Properties of Wood Plastic Composites with Desirable Features Using Poplar and Five Recyclable Plastic Wastes // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11. – Article 6838. – DOI: [10.3390/app11156838](https://doi.org/10.3390/app11156838).

18. Borah, J. S., Kim, D. S. Recent development in thermoplastic/wood composites and nanocomposites: A review // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 33. – P. 3035–3049. – DOI: [10.1007/s11814-016-0225-0](https://doi.org/10.1007/s11814-016-0225-0).

19. Gardner, D. J., Han, Y., Wang, L. Wood–Plastic Composite Technology // *Current Forestry Reports*. – 2015. – Vol. 1. – P. 139–150. – DOI: [10.1007/s40725-015-0016-6](https://doi.org/10.1007/s40725-015-0016-6).

20. Bledzki, A. K., Gassan, J. Composites reinforced with cellulose based fibres // *Progress in Polymer Science*. – 1999. – Vol. 24. – P. 221–274. – DOI: [10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5).

21. Malkapuram, R., Kumar, V., Negi, Y. S. Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2009. – Vol. 28. – P. 1169–1189. – DOI: [10.1177/0731684407087759](https://doi.org/10.1177/0731684407087759).

22. Braghiroli, F. L., Passarini, L. Valorization of biomass residues from forest operations and wood manufacturing presents a wide range of sustainable and innovative possibilities // *Current Forestry Reports*. – 2020. – Vol. 6. – P. 172–183. – DOI: [10.1007/s40725-020-00115-7](https://doi.org/10.1007/s40725-020-00115-7).

23. Wolcott, M., Muszynski, L. Materials and wood-based composites // In: Wood Engineering Challenges in the New Millennium – Critical Research Needs. Proceedings of the Pre-Conference Workshop for ASCE Structures (Vancouver, BC, Canada, 23–24 April 2008). – Reston : American Society of Civil Engineers, 2008.

24. Pokhrel, G., Gardner, D. J., Han, Y. Properties of Wood–Plastic Composites Manufactured from Two Different Wood Feedstocks: Wood Flour and Wood Pellets // Polymers. – 2021. – Vol. 13(16). – Article 2769. – DOI: [10.3390/polym13162769](https://doi.org/10.3390/polym13162769).

25. Wood–Plastic Composite Market Size, Share & Industry Analysis, by Material (Polyethylene, Polypropylene, Polyvinyl Chloride and Others), by Application (Decking, Automotive, Sliding & Fencing, Technical Application, Furniture, Consumer Goods and Others), and Regional Forecast, 2020–2027.

26. Global Wood Plastic Composites Market: By Type, Product, Application, Size, Share, Trends, Analysis, Segment and Forecast 2016–2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zionmarketresearch.com/report/wood-plastic-composites-market> (дата звернения: 07.02.2017).

27. Wood Plastic Composite Market Report [Электронный ресурс]. – Fortune Business Insights. – Режим доступа: <https://www.fortunebusinessinsights.com/wood-plastic-composite-market-102821>.

28. Wood Plastic Composites Market Analysis Report [Электронный ресурс]. – Grand View Research. – Режим доступа: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wood-plastic-composites-market>.

29. Saliklis, E., White, K. Testing, modeling and constructing wood-plastic composite Catalan vaults // 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS–IACM 2008: Spanning Nano to Mega. – 2008. – P. 1–4.

30. Лютий П. В. Закономірності впливу технологічних параметрів на властивості композиційних матеріалів із деревинних відходів і термопластичних полімерів. – Львів, 2011. – 185 с.

31. Ayrlimis, N., Jarusombuti, S. Flat-pressed wood plastic composite as an alternative to conventional wood based panels // Journal of Composite Materials. – 2011. – Vol. 45. – P. 103–112. – DOI: 10.1177/0021998310371551.

32. Бехта П. А. Технологія деревинних композиційних матеріалів: Навчальний посібник. – Київ : ІЗМН, 1998. – 236 с.

33. ISO 20819-2:2020 Plastics — Poly(ethylene terephthalate) (PET) bottle recycling — Part 2: Preparation of PET flake for the manufacture of bottle grade PET materials [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:20819:-2:ed-1:v1:en>.

34. WPC Codes and Standards [Електронний ресурс]. – Wood Plastic Composites Information Center. – Режим доступу: <https://wpcinfo.org/codes-and-standards/>.

35. ДСТУ EN 310:2003. Плити деревинні. Визначення модулів пружності при вигині та міцності при статичному згині. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – 8 с.

36. ДСТУ EN 323:2008. Плити деревинні. Визначення густини. – Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – 8 с.

37. ДСТУ 4761:2007. Плити деревинні. Методи визначення вологості. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 16 с.

38. ДСТУ EN 317:2008. Плити деревинні. Визначення розбухання за товщиною після занурення у воду. – Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – 16 с.

39. Keresa D., Ali A. Y., Ha C.-S. Wood Polymer Composites Based on the Recycled Polyethylene Blends from Municipal Waste and Ethiopian Indigenous Bamboo (*Oxytenanthera abyssinica*) Fibrous Particles Through Chemical Coupling Crosslinking // Polymers. – 2024. – Vol. 16(21). – Article 2982. – DOI: [10.3390/polym16212982](https://doi.org/10.3390/polym16212982).

40. Ayana K. D., Ha C., Yimam A. Comprehensive overview of wood polymer composite: Formulation and technology, properties, interphase modification, and characterization // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2024. – Vol. 40. – Article e00983. – DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00983.

41. Sobczak L., Welser R., Brüggemann O., Haider A. Polypropylene (PP)-based wood polymer composites: Performance of five commercial maleic anhydride grafted PP coupling agents // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. – 2014. – Vol. 27. – P. 439–463. – DOI: 10.1177/0892705712447821.

42. Wang C., Mei J., Zhang L. High-added-value biomass-derived composites by chemically coupling post-consumer plastics with agricultural and forestry wastes // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 284. – Article 124768. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124768.

43. Chauhan S., Aggarwal P., Karmarkar A. The use of m-TMI-grafted-PP as a coupling agent for wood polymer composites // *Journal of Composite Materials*. – 2016. – Vol. 50. – P. 3515–3524. – DOI: 10.1177/0021998315613318.

44. Hejna A., Przybysz-Romatowska M., Kosmela P., Zedler Ł., Korol J., Formela K. Recent advances in compatibilization strategies of wood-polymer composites by isocyanates // *Wood Science and Technology*. – 2020. – Vol. 54. – P. 1091–1119. – DOI: 10.1007/s00226-020-01198-0.

45. Ghorbani M., Poorzahed N., Amininasab S. M. Morphological, physical, and mechanical properties of silanized wood-polymer composite // *Journal of Composite Materials*. – 2020. – Vol. 54. – P. 1403–1412. – DOI: 10.1177/0021998319860488.

46. Chen G., Gupta A., Mekonnen T. H. Silane-modified wood fiber filled EPDM bio-composites with improved thermomechanical properties // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2022. – Vol. 159. – Article 107029. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.107029.

47. Klyosov A. A. *Wood Plastic Composites*. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2007. – 726 p.

48. Бехта П. А., Лютий П. В. Деревинно-полімерні композити на основі термопластичних полімерів // Наукові праці Лісівничої академії наук України. – 2010. – Вип. 8. – С. 11–17.

49. Rowell R. M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. – Boca Raton : CRC Press, 2005. – 487 p.

50. Бехта П. А., Лютий П. В. Вплив різного типу модифікувальних добавок і їх сумішей на властивості деревинно-полімерних плит // Наукові праці Лісівничої академії наук України. – 2011. – Вип. 9. – С. 194–199.

51. Schmidt, H., Benthien, J. T., Thoemen, H. Processing and flexural properties of surface reinforced flat pressed WPC panels // European Journal of Wood and Wood Products. – 2013. – Vol. 71. – P. 591–597.

52. Bledzki, A. K., Sperber, V. E., Faruk, O. Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers. – Rapra Review Reports. – 2002. – 13(8). – 158 p.

53. Segerholm, K. Characteristics of Wood Plastic Composites Based on Modified Wood – Moisture Properties, Biological Resistance and Micromorphology. – Doctoral Thesis. – KTH Building Materials Technology, Stockholm, Sweden, 2012.

54. Segerholm, K. Wood Plastic Composites Made from Modified Wood. – Licentiate Thesis in Building Materials Technology. – Stockholm, Sweden, 2007. – 23 p.

55. Lindfors, N. C., Salo, J. A novel nontoxic wood-plastic composite cast // The Open Medical Devices Journal. – 2012. – 4. – P. 1–5.

56. Wood Plastic Composites Study – Technologies and UK Market Opportunities: Research Report. – The Waste and Resources Action Programme, 2003. – 101 p.

57. Botros, M. Development of new generation coupling agents for wood-plastic composites // Intertech Conference: The Global Outlook for Natural and Wood Fiber Composites. – 2003. – 17 p.

58. Stark, N. M. Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites // Intertech Conference “Functional Fillers for Thermoplastics & Thermosets”. – 1997. – 16 p.
59. Radojević, V., Andjelković, B., Aleksić, R. Investigation of some performance of wood fiber base composite materials // *Facta Universitatis: Series Working and Living Environmental Protection*. – 2006. – 3(1). – P. 9–13.
60. Youngquist, J. A. Unlikely partners: The marriage of wood and nonwood materials // *Forest Products Journal*. – 1995. – 45(10). – P. 25–30.
61. Liang, B. H., Mott, L., Shaler, S. M., Caneba, G. T. Properties of transfer-molded wood-fiber/polystyrene composites // *Wood and Fiber Science*. – 1994. – 26(3). – P. 382–389.
62. Sardashti, A. Wheat Straw–Clay–Polypropylene Hybrid Composites. – Master of Applied Science Thesis. – University of Waterloo, 2009. – 163 p.
63. Gupta, B. S. Development of a Coating Technology for Wood Plastic Composites. – Washington State University, 2006. – 116 p.
64. Norvydas, V., Minelga, D. Strength and stiffness properties of furniture panels covered with different coatings // *Materials Science (Medžiagotyra)*. – 2006. – 12(4). – P. 328–332.
65. Ryntz, R. A. Adhesion to Plastics – Molding and Paintability. – Global Press, 1998.
66. Ayırlmis, N., Akkus, M., Akbulut, T. Surface quality of wood plastic composites coated with solvent and water based paints // *Machines. Technologies. Materials*. – 2016. – Issue 4. – P. 33–35.
67. Gupta, B. S., Laborie, M. P. Development of Surface Finishes for Wood Plastic Composites. – M.S. Thesis, 2006.
68. Ayırlmis, N., Jarusombuti, S. Flat-pressed wood plastic composite as an alternative to conventional wood based panels // *Journal of Composite Materials*. – 2011. – Vol. 45. – P. 103–112. – DOI: 10.1177/0021998310371551.
69. Ayırlmis, N., Benthien, J. T., Thoemen, H., White, R. H. Properties of flat-pressed wood plastic composites containing fire retardants // *Journal of*

Applied Polymer Science. – 2011. – Vol. 122. – P. 3201–3210. – DOI: 10.1002/app.34012.

70. Frącz, W., Janowski, G., Smusz, R., Szumski, M. The influence of chosen plant fillers in PHBV composites on the processing conditions, mechanical properties and quality of molded pieces // Polymers. – 2021. – 13(23), 3934. – DOI: [10.3390/polym13223934](https://doi.org/10.3390/polym13223934).

71. Wood-Polymer Composites: Technology and Applications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/7655535/page:5/>.

72. Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., Sain, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010 // Progress in Polymer Science. – 2012. – Vol. 37. – P. 1552–1596. – DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.

73. Wei, L., McDonald, A. G. A review on grafting of biofibers for biocomposites // Materials. – 2016. – 9(4), 303. – DOI: 10.3390/ma9040303.

74. Frącz, W., Janowski, G., Bąk, Ł. Influence of the alkali treatment of flax and hemp fibers on the properties of PHBV based biocomposites // Polymers. – 2021. – 13(12), 1965. – DOI: 10.3390/polym13121965.

75. Bos, H. L., Van den Oever, M. J. A., Peters, O. C. J. J. Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites // Journal of Materials Science. – 2002. – 37. – P. 1683–1692. – DOI: 10.1023/A:1014925625178.

76. Суровцев О. Б., Мандзюк І. А. Хімічна технологія виробництва полімерів: навч. посіб. – Хмельницький : ТУП, 2003. – 250 с.

77. Поняття про полімери [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.osvita.org.ua/referat/chemistry/3048/>

78. Поліетилен [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%96%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BB%D0%B5%D0%BD>

79. Поліетилен низького тиску [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.galkat.com/production_ua/pe_nuz_tusky.html

80. Поліетилен високого тиску має безліч можливостей [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ukrarticles.pp.ua/tovary/9817-poliyetilen-vysokogo-davleniya-imeet-mnozhestvo-vozmozhnostej.html>

81. Поліпропілен [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://polimer.biz.ua/polypropylene_01

82. Застосування поліпропілену [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://polimer.biz.ua/polypropylene_01/use_polypropylene

83. Полістирол [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://polimer.biz.ua/polistirol>

84. Властивості полістиролу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://polimer.biz.ua/polistirol/features_polystyrene

85. H'ng P. S., Lee A. N., Meng H. C. Physical and bending properties of injection moulded wood plastic composites boards // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2008. – 3(5). – P. 13–19.

86. H'ng P. S., Lee A. N., Hang C. M., Lee S. H., Khalina A., Paridah M. T. Biological durability of injection moulded wood plastic composite boards // *Journal of Applied Sciences*. – 2010. – 11(2). – P. 384–388.

87. Ayrlmis N., Benthien J. T., Thoemen H., White R. H. Properties of flat-pressed wood plastic composites containing fire retardants // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2011. – Vol. 122. – P. 3201–3210. – DOI: 10.1002/app.34012.

88. Benthien J. T., Thoemen H. Effects of raw materials and process parameters on the physical and mechanical properties of flat pressed WPC panels // *Composites: Part A*. – 2012. – P. 570–576.

89. Kargarfard, A., Jahan-Latibari, A. Application of recycled polyethylene in combination with urea-formaldehyde resin to produce water resistant particleboard // *Proceedings of the 55th International Convention of Society of Wood Science and Technology (August 27–31, 2012, Beijing, China)*.

90. Ibach R. E., Clemons C. M. Effect of acetylated wood flour or coupling agent on moisture, UV and biological resistance of extruded woodfiber-plastic composites // *Wood Protection 2006 – Session III*. – 2006. – P. 139–147.

91. Ayırlımis N., Jarusombuti S. Flat-pressed wood plastic composite as an alternative to conventional wood-based panels // *Journal of Composite Materials*. – 2010. – Vol. 44. – P. 103–112.

92. Križan P., Beniak J., Matúš M. Effect of wood particle size on the water absorption of wood-plastic composites // *Global Journal of Engineering and Technology Advances*. – 2020. – 5(3). – P. 69–79. – DOI: [10.30574/gjeta.2020.5.3.0115](https://doi.org/10.30574/gjeta.2020.5.3.0115).

93. Lyuty P., Bekhta P., Sedliacik J., Ortyńska G. Properties of flat-pressed wood-polymer composites made using secondary polyethylene // *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*. – 2014. – 56(1). – P. 39–50.

94. Bekhta P. A., Lyuty P. Effect of wood fillers type and different modifiers on the properties of WPC flat pressing // *Conference Abstracts of the 11th International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites & Nanotechnology in Wood Composites Symposium (Madison, Wisconsin, USA, May 16–18, 2011)*. – P. 62.

95. Gardner D. J., Han Y., Wang L. Wood–Plastic Composite Technology // *Current Forestry Reports*. – 2015. – 1. – P. 139–150. – DOI: 10.1007/s40725-015-0016-6.

96. Chaochanchaikul K., Sombatsompop N. Stabilizations of molecular structures and mechanical properties of PVC and wood/PVC composites by Tinuvin and TiO₂ stabilizers // *Polymer Engineering & Science*. – 2011. – 51(7). – P. 1354–1365.

97. Chaochanchaikul K., Rosarpitak V., Sombatsompop N. Structural and thermal stabilizations of PVC and wood/PVC composites by metal stearates and organotin // *BioResources*. – 2011. – 6(3). – P. 3115–3131.

98. Geng Y., Li K., Simonsen J. Effects of a new compatibilizer system on the flexural properties of wood–polyethylene composites // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2004. – 91(6). – P. 3667–3672.

99. Ramesh M., Rajeshkumar L., Sasikala G., Balaji D., Saravanakumar A., Bhuvaneshwari V., Bhoopathi R. A critical review on wood-based polymer

composites: Processing, properties, and prospects // *Polymers*. – 2022. – 14(3), 589. – DOI: [10.3390/polym14030589](https://doi.org/10.3390/polym14030589).

100. Madyaratri E. W., Ridho M. R., Aristri M. A., Lubis M. A. R., Iswanto A. H., Nawawi D. S., Antov P., Kristak L., Majlingová A., Fatriasari W. Recent advances in the development of fire-resistant biocomposites – a review // *Polymers*. – 2022. – 14, 362. – DOI: [10.3390/polym14020362](https://doi.org/10.3390/polym14020362).

101. Ramesh M., Rajeshkumar L., Deepa C., Tamil Selvan M., Kushvaha V., Asrofi M. Impact of silane treatment on characterization of Ipomoea staphylinia plant fiber reinforced epoxy composites // *Journal of Natural Fibers*. – 2021. – P. 1–12. – DOI: [10.1080/15440478.2021.1977329](https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1977329).

102. Pan M., Mei C., Du J., Li G. Synergistic effect of nano silicon dioxide and ammonium polyphosphate on flame retardancy of wood fiber–polyethylene composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2014. – 66. – P. 128–134. – DOI: [10.1016/j.compositesa.2014.07.016](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.07.016).

103. Sain M., Park S. H., Suhara F., Law S. Flame retardant and mechanical properties of natural fibre–PP composites containing magnesium hydroxide // *Polymer Degradation and Stability*. – 2004. – 83. – P. 363–367. – DOI: [10.1016/j.polymdegradstab.2003.07.015](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2003.07.015).

104. Garcia M., Hidalgo J., Garmendia I., García-Jaca J. Wood–plastics composites with better fire retardancy and durability performance // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2009. – 40. – P. 1772–1776. – DOI: [10.1016/j.compositesa.2009.08.011](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.08.011).

105. Stark N. M., White R. H., Mueller S. A., Osswald T. A. Evaluation of various fire retardants for use in wood flour–polyethylene composites // *Polymer Degradation and Stability*. – 2010. – 95. – P. 1903–1910. – DOI: [10.1016/j.polymdegradstab.2010.06.017](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.06.017).