

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

Вплив типу полімерної матриці на міцність деревинно-пластикових композитів / The influence of polymer matrix type on the strength of wood-plastic composites

спеціальності 132 "Матеріалознавство"

освітня програма "Матеріалознавство"

Виконав: здобувач вищої освіти
групи Мм-21

**Стельмашук Михайло
Олександрович**

_____ (підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Гусачук Дмитро Анатолійович

_____ (підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«___» _____ 2025 р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Мельничук Микола Дмитрович

_____ (підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства
Ступінь вищої освіти: магістр
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Імбирович Н.Ю.

“ ” 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Стельмащуку Михайлу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Вплив типу полімерної матриці на міцність
деревинно-пластикових композитів*

керівник роботи *Гусачук Дмитро Анатолійович, к.т.н., доцент*

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “05” 06 2025 року №02/282/

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
« 6 » 12 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи *літературні джерела, властивості вихідних
матеріалів, методики дослідження властивостей матеріалів*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ; огляд технічної літератури; опис вибору матеріалів для
виготовлення експериментних зразків; опис методики виготовлення
деревинно-пластикових композитів; опис методики дослідження
виготовлених зразків; дослідження впливу типу полімерної матриці на
механічні властивості зразків композитів; рекомендації щодо оптимізації
рецептури деревинно-полімерних композитів; висновки*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

*1 слайд – тема і мета роботи; 2 слайд – актуальність та сфери
застосування деревинно-пластикових композитів; 3,4 слайд – вибір
сировини та схема виготовлення експериментальних зразків; 5 слайд –
загальний вигляд та структура отриманих зразків; 6–9 слайди –
результати досліджень механічних властивостей деревинно-пластикових
композитів; 10 слайд – основні висновки.*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормокон- троль	доцент кафедри матеріалознавства к.т.н. Мисковець С.В.		

7. Дата видачі завдання « 02 » 09 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Вступ. Літературний огляд.	20.10.2025	Викорано
2.	Планування та виконання експерименту.	15.11.2025	Викорано
3.	Опис та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій та висновків	06.12.2025	Викорано

Здобувач вищої освіти _____ Стельмацук М.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Гусачук Д.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Стельмашук М.О. Дослідження впливу типу полімерної матриці на міцність деревинно-пластикових композитів (на матеріалах звіту з переддипломної практики та даних завдання до кваліфікаційної роботи).
Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра освітньої програми "Матеріалознавство" спеціальності 132 "Матеріалознавство". Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У розділах роботи висвітлено: характеристику найпоширеніших типів полімерних матриць, методику отримання сировини для полімерної матриці з вторинної пластикової тари, методику підготовки деревного борошна для створення деревно-пластикового композиту, методику виготовлення деревино-полімерного композиту з деревного борошна і подрібненого пластику, вплив поліпропіленової, поліетилентерефталатної та поліетиленової матриць на механічні характеристики деревинно-пластикового композиту. Текстова частина містить 58 сторінок тексту, 20 рисунків, 3 таблиці, 15 літературних джерел та посилань, 1 додаток у вигляді презентації результатів дослідження. Презентація представлена на 10 слайдах.

В кваліфікаційній роботі описана методика виготовлення деревинно-пластикових композитів з деревного борошна та вторинного пластику, проведено дослідження впливу типу полімерної матриці на механічні властивості деревно-пластикових композитів, на основі яких можна покращити рецептуру цих композитів.

Ключові слова: деревинно-пластиковий, поліпропілен, механічні властивості, міцність, ДПК, вторинна сировина, полімер, композит.

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата	КРКС. 151705.000 ПЗ			
Розроб.	Стельмашук				Дослідження впливу типу полімерної матриці на міцність деревинно-пластикових композитів / Study of the influence of polymer matrix type on the strength of wood-plastic composites	Літ.	Арк	Аркушів
Перев.	Гусачук						3	58
Н. Контр.	Мисковець					ЛНТУ, каф. матеріалознавства		
Затверд.	Мельничук					гр.Мм-21		

ANNOTATION

Stelmashchuk M.O. Study of the Influence of Polymer Matrix Type on the Strength of Wood–Plastic Composites (based on the pre-graduation practice report and the data of the qualification work assignment). Manuscript.

Master’s Qualification Thesis of the educational program “Materials Science” of specialty 132 “Materials Science”. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master’s qualification thesis consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The chapters present: the characteristics of the most common types of polymer matrices; the methodology for obtaining raw materials for the polymer matrix from secondary plastic containers, the method for preparing wood flour for the production of a wood-plastic composite, the method of manufacturing a wood–polymer composite from wood flour and shredded plastic; the influence of polypropylene, polyethylene terephthalate, and polyethylene matrices on the mechanical properties of the wood-plastic composite. The text part contains 58 pages, 20 figures, 3 tables, and 15 literature sources and references, 1 appendix in the form of a presentation of the research results. The presentation is presented on 10 slides.

The thesis describes the methodology for producing wood–plastic composites from wood flour and secondary plastic, and investigates the influence of the polymer matrix type on the mechanical properties of wood–plastic composites, which can be used to improve the formulation of such composites.

Keywords: wood–plastic, composite, mechanical properties, strength, WPC, secondary raw materials, polymer, composite.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	8
1.1 Деревно-пластикові композити (ДПК): визначення, класифікація та сфери застосування	8
1.2 Полімерні матриці: види, властивості та роль у композитах	12
1.3 Деревинні наповнювачі: характеристики та вплив на механічні властивості ДПК.....	13
1.4 Адгезія та міжфазна взаємодія у системі «полімер – деревина»	17
1.5 Попередні дослідження з вивчення деревно-полімерних композитів.....	19
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ ЗРАЗКІВ	21
2.1 Вибір сировини для полімерних матриць.....	21
2.2 Вибір деревного наповнювача та його підготовка	24
2.3 Методика виготовлення деревно-пластикових композитів.....	27
2.5 Використане обладнання для виготовлення та аналізу зразків.....	30
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	34
3.1 Характеристика виготовлених зразків	34
3.2 Вплив поліетиленової матриці на міцність композитів	35
3.3 Вплив поліпропіленової матриці на міцність композитів	38
3.4 Вплив поліетилетерефталатної матриці на міцність композитів	40
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	43
4.1 Порівняльний аналіз результатів.....	43
4.2 Аналіз отриманих даних у порівнянні з літературними джерелами	46
4.3. Вплив типу полімерної матриці на структуроутворення та адгезію	47
РОЗДІЛ 5 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЦЕПТУРИ ДПК ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ	50
5.1 Можливості оптимізації рецептури ДПК	50
5.2 Перспективи застосування полімерних матриць у промисловості.....	52
ВИСНОВОК.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Сучасний розвиток матеріалознавства спрямований на створення композитних матеріалів із підвищеними експлуатаційними характеристиками та зниженим негативним впливом на навколишнє середовище. Одним із перспективних напрямів є дослідження деревно-полімерних композитів (ДПК), які поєднують у собі міцність і довговічність полімерів із екологічністю та відновлюваністю деревини. Завдяки цьому ДПК знаходять широке застосування у будівництві, меблевому виробництві, автомобілебудуванні та інших галузях.

Особливу увагу в останні роки приділяють пошуку ефективних полімерних матриць, що визначають основні фізико-механічні властивості композиту. Одним із актуальних рішень є використання вторинних полімерів, отриманих шляхом переробки пластикових відходів, зокрема пляшок з поліетилентерефталату, поліетиленових та поліпропіленових кришок. Такий підхід не лише дозволяє зменшити собівартість матеріалу, але й сприяє вирішенню проблеми надлишку пластикових відходів, знижуючи антропогенне навантаження на екосистему.

Дослідження впливу типу полімерної матриці на міцність деревно-полімерних композитів є актуальним з наукової та практичної точок зору. Вибір відповідного полімеру, зокрема на основі переробленого пластику, дозволить оптимізувати властивості композиту, покращити його експлуатаційні характеристики та забезпечити більш раціональне використання ресурсів.

Метою даної роботи є дослідження впливу типу полімерної матриці на механічну міцність деревно-пластикових композитів із використанням, в тому числі, вторинного пластику як матричного матеріалу. Результати дослідження можуть бути використані при розробленні нових екологічно безпечних матеріалів для промислового та побутового застосування.

Під час виконання кваліфікаційної роботи магістра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

(Gemini), а також генерації контенту (графіки, таблиці, списку використаних джерел) виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

						Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Деревно-пластикові композити (ДПК): визначення, класифікація та сфери застосування

У сучасному матеріалознавстві дедалі більшої уваги приділяється композитним матеріалам, створеним на основі поєднання природних та синтетичних компонентів. До таких матеріалів належать деревно-пластикові композити, які поєднують властивості деревини і полімерів, забезпечуючи оптимальне співвідношення міцності, довговічності та екологічності. Застосування цих композитів активно зростає завдяки їх універсальності, технологічності та можливості використання вторинної сировини.

Деревно-пластикові композити (ДПК) або англійською WPC (Wood Polymer Composites) є матеріалами, в яких частинки або волокна деревини рівномірно розподілені в полімерній матриці. Полімерна складова забезпечує зчеплення частинок, захист деревини від вологи та біологічних пошкоджень, а також визначає механічну міцність і стійкість до зовнішніх впливів. Деревинна складова, у свою чергу, знижує вартість матеріалу, покращує його жорсткість і екологічність. Типовий вміст деревного наповнювача становить від 30 до 80 відсотків маси композиту. Найчастіше, як наповнювач, використовують деревне борошно або тирсу твердих порід деревини, проте також можуть застосовуватися волокна льону, конопель, бамбуку чи лушпиння сільськогосподарських культур [1].

Полімерна матриця, у якій розподілені частинки деревини, визначає основні експлуатаційні властивості ДПК. Найчастіше застосовуються термопластичні полімери, такі як поліетилен високої та низької густини, поліпропілен, полівінілхлорид, полістирол або поліетилентерефталат. Саме ці матеріали мають здатність багаторазово плавитися і формуватися без суттєвої втрати властивостей, що дозволяє повторно їх переробляти та використовувати у виробництві. Значна частина сучасних ДПК

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

виготовляється із вторинних полімерів, зокрема з перероблених пластикових пляшок, що робить цей напрям важливим із погляду екологічної безпеки та зменшення обсягів твердих побутових відходів [2].

За типом полімерної матриці деревно-пластикові композити поділяються на термопластичні та термореактивні (рисунок 1.1). До термопластичних належать матеріали на основі поліетилену, поліпропілену, полівінілхлориду та інших полімерів, які можна переробляти багаторазово. До термореактивних належать композити на основі епоксидних, поліефірних або фенолформальдегідних смол, які після затвердіння не піддаються повторному розплавленню. Термопластичні композити переважають у промисловості завдяки технологічності та можливості перероблення[5].

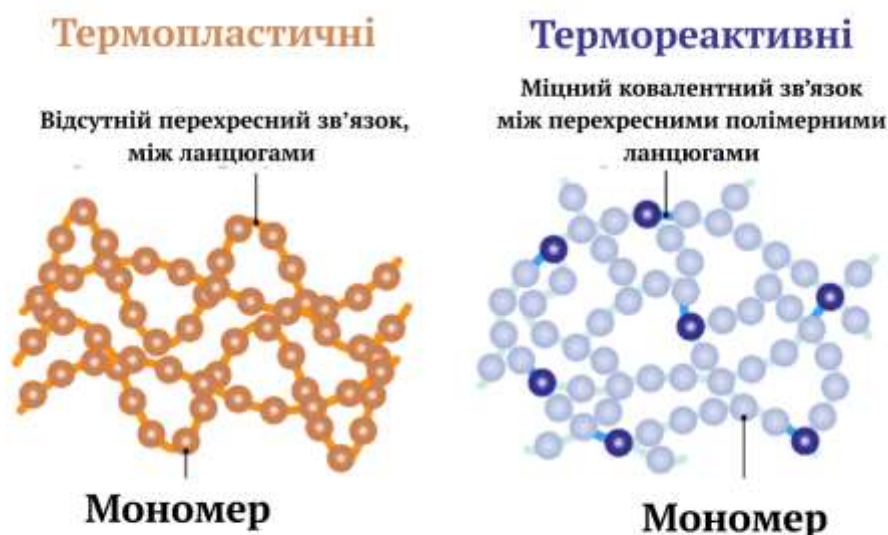


Рисунок 1.1 – Типи полімерних матриць

Класифікацію ДПК також можна здійснювати за вмістом деревного наповнювача, за способом виготовлення і за функціональним призначенням. За кількістю наповнювача композити поділяють на низьконаповнені (до 30 % деревини), середньонаповнені (40...60 %) та високонаповнені (понад 60 %). Технологічні методи виготовлення включають екструзію, лиття під тиском, пресування та гаряче формування. Екструзія дозволяє виготовляти профілі, дошки і панелі; лиття під тиском застосовується для деталей складної форми, а пресування – для листових матеріалів.

Сфери застосування деревно-пластикових композитів надзвичайно широкі. Найбільш поширеною галуззю є будівництво, де ДПК використовують для виготовлення фасадних панелей, підлогових покриттів, віконних і дверних профілів, терасної дошки, перил, огорож, лавок та інших зовнішніх елементів. Матеріали на основі ДПК стійкі до вологи, не схильні до гниття і не потребують регулярного фарбування, що робить їх довговічною альтернативою натуральній деревині [6].

У меблевій промисловості деревно-пластикові композити використовуються для виготовлення корпусних елементів, декоративних накладок, стільниць і меблів для зовнішнього використання. Матеріал має привабливу поверхню, легко фарбується або ламінується, що розширює можливості його дизайну. В автомобілебудуванні та транспортному машинобудуванні ДПК застосовуються для виготовлення внутрішніх панелей, облицювання, елементів інтер'єру (рисунк 1.2), оскільки поєднують легкість, міцність і стійкість до механічних пошкоджень.



Рисунок 1.2 – Сфери використання матеріалів з деревинно-пластикових композитів.

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Значна увага приділяється використанню деревно-пластикових композитів у виробництві екологічної упаковки. Завдяки поєднанню жорсткості та біостійкості вони є перспективною альтернативою одноразовим пластиковим виробам. Окрім того, композити цього типу широко застосовуються для виготовлення малих архітектурних форм, таких як лавки, перголи, квіткові ящики, дитячі майданчики тощо (рисунк 1.2).

Серед основних переваг деревно-пластикових композитів варто відзначити їхню високу волого- та біостійкість, стабільність розмірів, довговічність, простоту механічної обробки та можливість вторинного використання. Вони не потребують регулярного догляду, фарбування чи просочування антисептиками, що знижує експлуатаційні витрати. Важливою перевагою є також екологічність, оскільки для виготовлення композитів використовуються відходи деревини і вторинний пластик.

Попри значні переваги, деревно-пластикові композити мають і певні недоліки. До них належать більша щільність порівняно з натуральною деревиною, певна схильність до термічного розширення та деградації під дією ультрафіолетового випромінювання. Проте ці недоліки можуть бути усунуті за рахунок додавання стабілізаторів, модифікаторів або поверхневих покриттів [9].

Окремої уваги заслуговує екологічний аспект застосування деревно-пластикових композитів. Використання вторинного пластику, зокрема перероблених пляшок із поліетилентерефталату, дозволяє зменшити кількість твердих відходів і забезпечує повторне використання полімерів, що у звичайних умовах тривалий час не розкладаються в природному середовищі. Таким чином, виробництво ДПК сприяє формуванню принципів циркулярної економіки, зменшує навантаження на довкілля та забезпечує раціональне використання ресурсів.

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Полімерні матриці: види, властивості та роль у композитах

Полімерна матриця є основною складовою більшої частини сучасних композитних матеріалів, зокрема деревно-полімерних композитів. Саме від її типу, структури та фізико-хімічних властивостей залежить якість зчеплення компонентів, рівномірність розподілу наповнювача, механічна міцність, термостійкість і довговічність готового виробу. Матриця виконує роль зв'язувальної фази, яка оточує частинки або волокна наповнювача, забезпечуючи передачу навантажень між ними та формуючи монолітну структуру композиту.

Полімерні матриці поділяються на дві основні групи: термопластичні та терморезистивні. Різниця між ними полягає у поведінці при нагріванні. Термопластичні полімери можуть багаторазово розм'якшуватись і плавитись без руйнування хімічної структури, що дає змогу повторно їх переробляти. Терморезистивні полімери, навпаки, після затвердіння утворюють стабільну тривимірну структуру, яка не піддається повторному плавленню[3].

Термопластичні матриці (поліетилен, поліпропілен, полістирол, полівінілхлорид, поліетилентерефталат тощо) широко застосовуються у виробництві деревно-полімерних композитів, оскільки забезпечують можливість вторинної переробки, низьку вартість, технологічність і стійкість до вологи. Вони забезпечують еластичність, хімічну інертність і добру адгезію до частинок деревини при відповідній модифікації поверхні[4].

Терморезистивні полімери (епоксидні, поліефірні, фенолформальдегідні смоли) мають вищу міцність і термостійкість, але їх переробка є складнішою, а повторне використання – неможливим. Такі матриці частіше застосовують у конструкційних композитах, що працюють під високими навантаженнями або при підвищених температурах[11].

Найбільш уживаними полімерними матрицями для деревно-полімерних композитів є поліетилен (PE), поліпропілен (PP), полівінілхлорид (PVC) та поліетилентерефталат (PET). Нижче подано порівняльну характеристику їхніх властивостей(таблиця 1.1).

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Таблиця 1.1 – Основні типи полімерних матриць для деревно-полімерних композитів

Тип полімеру	Температура плавлення, °С	Густина, г/см ³	Переваги	Недоліки	Типові сфери використання
Поліетилен низького тиску (HDPE)	125...135	0,94...0,96	Дешева сировина, добра хімічна стійкість, водонепроникність	Низька адгезія до деревини без модифікації, невисока термостійкість	Терасна дошка, фасадні панелі, контейнери
Поліпропілен (PP)	160...170	0,90...0,91	Висока міцність, жорсткість, термостійкість, легкість	Крихкість при низьких температурах	Будівельні профілі, меблеві деталі, технічні вироби
Полівінілхлорид (PVC)	75...105	1,38...1,41	Висока твердість, стійкість до УФ, вогнестійкість	Схильність до старіння, потребує стабілізаторів	Віконні профілі, облицювання, декоративні панелі
Поліетилентерефталат (PET)	250...260	1,35...1,38	Висока міцність, твердість, термостійкість, екологічна доцільність	Вища температура плавлення, складність переробки	Екологічні композити, конструкційні елементи, плити

1.3 Деревинні наповнювачі: характеристики та вплив на механічні властивості ДПК

Одним із ключових елементів структури деревно-полімерних композитів є деревинний наповнювач. Саме від його типу, розміру частинок, вологості та хімічного складу залежить не лише кінцева міцність композиту, але й технологічність його виготовлення, стабільність структури та довговічність матеріалу. Деревинний наповнювач виконує не пасивну, а

активну функцію – він бере участь у формуванні структури композиту, підвищує жорсткість, модуль пружності та стабільність розмірів виробу.

Деревина є гетерогенним природним матеріалом, основу якого становлять целюлоза, геміцелюлоза та лігнін (рисунок 1.3). Целюлоза забезпечує міцність, геміцелюлоза відповідає за водопоглинання, а лігнін виконує роль природного «клею», що надає жорсткості та стабільності структури. Завдяки цим особливостям деревина добре поєднується з полімерною матрицею після відповідної підготовки, хоча природна гідрофільність може викликати труднощі зі зчепленням з гідрофобними полімерними матеріалами.[7]

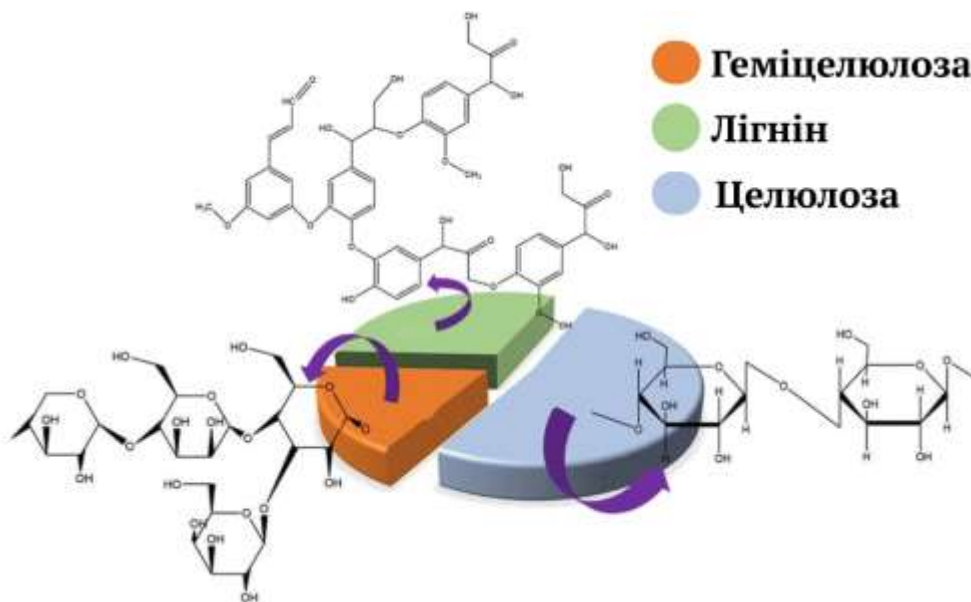


Рисунок 1.3 – Хімічний склад деревини

Деревинні наповнювачі, які використовуються в ДПК, поділяють на кілька основних типів залежно від форми та ступеня подрібнення: деревне борошно, тирсу, волокна, стружку та подрібнену тріску. Найбільш поширеним варіантом у промисловості є деревне борошно з розміром частинок від 50 до 500 мкм. Воно забезпечує однорідну структуру композиту, добру змочуваність полімером і рівномірний розподіл у матриці. Використання волокон або більшої стружки дозволяє підвищити жорсткість матеріалу, однак ускладнює переробку та знижує якість поверхні виробу.

Вологість деревного наповнювача є критично важливим параметром. Надлишок вологи призводить до утворення парових пор при нагріванні, що

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

погіршує однорідність структури та знижує механічні характеристики. Оптимальна вологість не перевищує 2...3 %. Тому перед змішуванням деревину зазвичай сушать при температурі 80...110 °С, що дозволяє забезпечити стабільний процес переробки.[13]

Хімічний склад деревного наповнювача також впливає на властивості композиту. Високий вміст целюлози підвищує міцність, але водночас збільшує гігроскопічність. Наявність лігніну покращує термостійкість та жорсткість. Наявні екстрактивні речовини можуть погіршувати адгезію з полімером, тому іноді застосовують попередню обробку – екстрагування або модифікацію поверхні.

Важливою характеристикою деревного наповнювача є фракційний склад. Дрібнодисперсне деревне борошно добре поєднується з полімерною матрицею, утворюючи однорідний матеріал із високими показниками міцності на розтяг і вигин. Збільшення розміру частинок до кількох міліметрів покращує жорсткість та модуль пружності, але може знизити ударну в'язкість і ускладнити формування тонкостінних виробів. Вибір оптимального розміру частинок є одним із важливих етапів проектування рецептури ДПК.

У сучасній практиці для покращення взаємодії між полімерною матрицею та деревинним наповнювачем застосовують поверхневу модифікацію останнього. Найпоширенішим методом є використання хімічних агентів, які зменшують гідрофільність деревини та підвищують її адгезію до полімеру. Це можуть бути силани, ізоціанати або модифіковані поліолефіни. Також застосовується термічна обробка, яка зменшує вологопоглинання, підвищує стабільність розмірів та покращує адгезійні властивості.

Вплив деревного наповнювача на механічні властивості композиту проявляється у кількох напрямках. По-перше, збільшення вмісту деревини підвищує жорсткість і модуль пружності матеріалу. По-друге, надмірна кількість наповнювача може призводити до зменшення ударної в'язкості та пластичності через обмежену здатність полімерної матриці компенсувати

									Арк.
									15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

напруження. По-третє, оптимальний розмір і форма частинок сприяють рівномірному розподілу навантаження, що підвищує загальну міцність.[15]

Дослідження показують, що найкращі механічні характеристики ДПК досягаються при вмісті деревного наповнювача близько 30...60 %. Така концентрація забезпечує баланс між жорсткістю та ударною в'язкістю, а також оптимальні умови для обробки матеріалу методом екструзії або лиття під тиском. При надмірному збільшенні кількості деревини знижується текучість розплаву, що ускладнює формування виробів і може викликати утворення внутрішніх дефектів.

Деревинні наповнювачі також впливають на термостійкість композитів. При помірному вмісті вони підвищують стабільність при помірних температурах, але при надмірному нагріванні можуть термічно розкладатися, виділяючи леткі компоненти. Це обмежує робочу температуру ДПК у межах 80...120 °С.

У таблиці 1.2 наведено узагальнену характеристику найпоширеніших типів деревинних наповнювачів, що застосовуються у виробництві деревно-полімерних композитів.

Таблиця 1.2 – Характеристика основних типів деревинних наповнювачів

Тип наповнювача	Розмір частинок	Основні властивості	Вплив на ДПК	Особливості використання
Деревне борошно	50...500 мкм	Однорідна структура, добра змочуваність	Висока міцність, однорідність структури	Найпоширеніший варіант для екструзії та лиття
Тирса	0,5...2 мм	Низька вартість, добра доступність	Підвищує жорсткість, але знижує пластичність	Потребує ретельного сушіння
Стружка	2...5 мм	Висока жорсткість, груба структура	Збільшує модуль пружності	Використовується для масивних виробів
Волокна деревини	5...20 мм	Висока міцність уздовж волокон	Підвищує міцність і жорсткість	Складніша переробка, нерівномірність структури
Подрібнена тріска	5...30 мм	Найдешевший варіант	Висока жорсткість, погана якість поверхні	Для великогабаритних елементів конструкцій

1.4 Адгезія та міжфазна взаємодія у системі «полімер – деревина»

Одним із ключових факторів, що визначають міцність і довговічність деревно-полімерних композитів, є адгезія між деревинним наповнювачем і полімерною матрицею. У таких системах властивості матеріалу формуються не лише завдяки окремим компонентам, а й завдяки ефективності передачі навантаження через міжфазний шар. Міжфазна взаємодія є визначальним чинником формування цілісної структури композиту та безпосередньо впливає на його механічні характеристики.

Адгезія в системі «полімер – деревина» визначається поєднанням фізичних і хімічних механізмів взаємодії. До фізичних механізмів належать зчеплення за рахунок мікромеханічного блокування частинок деревини в полімерній матриці. Це можливо завдяки нерівній поверхні деревного наповнювача та здатності полімеру частково проникати в пори і мікротріщини. Хімічна взаємодія полягає у формуванні міжмолекулярних зв'язків або навіть ковалентних зв'язків між гідроксильними групами деревини та функціональними групами полімеру або модифікаторів.[7]

Важливо враховувати відмінність у природі компонентів композиту. Деревина є гідрофільним матеріалом, у її складі переважають целюлоза і геміцелюлоза з численними полярними гідроксильними групами. Більшість полімерів, які використовуються у ДПК, навпаки, є гідрофобними, не мають полярних функціональних груп і не взаємодіють з деревиною природним чином. Це призводить до слабкої адгезії, що виявляється у розшаруванні композиту, зниженні міцності та ударостійкості.[15]

Для підвищення міжфазної взаємодії застосовують кілька методів. Найпоширенішим є введення адгезійних добавок – модифікаторів, що покращують сумісність гідрофільної деревини з гідрофобною полімерною матрицею. Прикладом є малеїновий ангідрид, привитий до поліетилену або поліпропілену. Такі добавки забезпечують хімічне зв'язування з деревиною та хороше змочування полімером.[14]

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Іншим ефективним способом є поверхнева обробка деревного наповнювача – силанування, ацетилювання або плазмова активація. Такі методи зменшують кількість вільних гідроксильних груп, знижують гігроскопічність і підвищують стабільність міжфазного шару. Внаслідок цього композит має меншу водопоглинальність, кращу механічну міцність та стабільність розмірів.

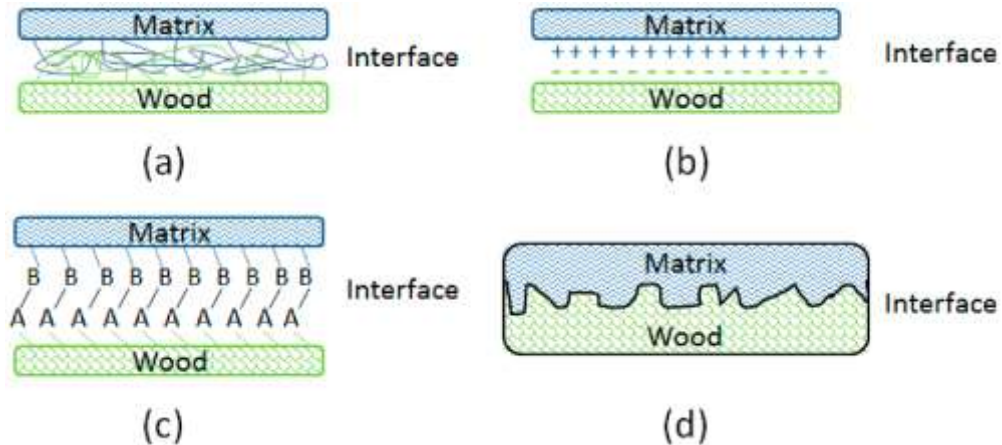


Рисунок 1.1 – Механізми міжфазного зв'язку деревина-матриця: (а) молекулярне переплетення після взаємної дифузії, (б) електростатична адгезія, (с) хімічний зв'язок, (d) механічне зчеплення.

Міжфазний шар, що утворюється між полімером і деревиною (рисунок 1.1), має товщину від кількох нанометрів до мікрометрів і виконує роль «мосту» між жорсткими частинками та пластичною матрицею. Якщо цей шар є слабким, навантаження передається неефективно, утворюються мікротріщини й відшаровування. Якщо ж міжфазна взаємодія сильна, композит поводить себе як однорідний матеріал, що забезпечує високу міцність на розтяг, вигин і удар[11].

Слід зазначити, що якість міжфазного зчеплення залежить також від температури плавлення полімеру, в'язкості розплаву, швидкості змішування та рівномірності розподілу частинок. Недостатній контакт призводить до появи пор, тріщин і зниження механічних характеристик.

1.5 Попередні дослідження з вивчення деревно-полімерних композитів

За останні роки було проведено низку експериментальних і оглядових досліджень, у яких порівнювали різні полімери, зокрема поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид та поліетилентерефталат. Отримані результати дозволяють простежити закономірності впливу матриці на властивості композиту та визначити найперспективніші матеріали для різних галузей застосування.

Одне з найновіших узагальнюючих досліджень [8], присвячених аналізу факторів, що визначають властивості ДПК. Автори розглядають вплив типу полімерної матриці на фізико-механічні характеристики, технологічні параметри переробки та довговічність матеріалів. У роботі особливу увагу приділено поліетилену (HDPE), поліпропілену (PP) і полівінілхлориду (PVC) як основним матрицям для промислових ДПК. Зазначено, що вибір матриці суттєво впливає на міцність на вигин, модуль пружності та ударну в'язкість. Зокрема, ДПК з матрицею на основі поліетилену характеризуються хорошою технологічністю та гнучкістю, але потребують сумісників через низьку полярність поліетилену. Поліетилен забезпечує більшу жорсткість і модуль пружності, що робить його перспективним для конструкційних застосувань. Полівінілхлорид демонструє добру стійкість до ультрафіолету та атмосферних впливів, але є менш пластичним. Також у статті підкреслено важливу роль міжфазної взаємодії. Матриця без модифікацій забезпечує обмежене зчеплення з деревиною. У більшості ефективних рецептур використовуються адгезійні добавки, які покращують передачу навантаження та забезпечують зростання міцності на 15...30 %.

Праця [10] зосереджена на міцності на вигин (flexural strength) та модулі пружності деревно-полімерних композитів. Виявлено, що композити з PP мають вищу міцність на вигин порівняно з композитами на основі HDPE та LDPE, при однакових умовах виготовлення та вмісті наповнювача. Причиною цього є вища жорсткість PP та його здатність формувати більш стабільну міжфазну структуру після модифікації. ДПК на основі PVC продемонстрували

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

найвищу жорсткість, проте мали нижчу ударну в'язкість через крихкість матеріалу. Цікаво, що автори також порівнювали результати для перероблених полімерів і встановили, що за правильно підібраних умов змішування та модифікації адгезії механічні властивості композитів на основі вторинного HDPE або ПЕТ можуть бути цілком конкурентними з первинною сировиною.

У роботі [Помилка! Джерело посилання не знайдено.] основна увага приділена впливу розміру частинок деревного наповнювача, однак у ній також детально розглядається реакція різних полімерних матриць на ці зміни. Зокрема, показано, що HDPE добре поєднується з дрібнодисперсним деревним борошном, забезпечуючи високу однорідність та стабільність структури. Проте при використанні більш крупної стружки чи волокон адгезія знижується, що негативно позначається на міцності. PP виявився більш стійким до зміни розміру наповнювача завдяки вищому модулю пружності, тоді як у PVC навіть при зміні розміру частинок показники залишаються стабільними, але жорсткість системи зростає. Автори також зазначають, що матриці на основі переробленого HDPE мають тенденцію до зниження адгезії через різномірність складу, проте додавання модифікаторів компенсує цей недолік.

У більшості наведених досліджень спостерігається, що тип полімерної матриці має вирішальний вплив на експлуатаційні властивості композиту навіть при однаковій фракції наповнювача. наведені дослідження узгоджено підтверджують, що полімерна матриця визначає не лише технологічність виготовлення ДПК, а й їхню жорсткість, ударостійкість, термостійкість і довговічність, поліпропілен дає найкращі показники міцності та жорсткості, але вимагає контролю адгезії, поліетилен забезпечує добру перероблюваність, але потребує модифікацій, перероблений пластик може бути ефективною альтернативою, особливо з правильними добавками, міжфазна взаємодія залишається критичним чинником успіху.

						Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ ЗРАЗКІВ

2.1 Вибір сировини для полімерних матриць

Одним із ключових етапів підготовки деревно-полімерних композитів є вибір полімерної матриці, яка визначає не лише фізико-механічні властивості готового матеріалу, а й технологічні параметри його отримання. У даному дослідженні як полімерну основу обрано матеріали, що походять із побутових пластикових відходів – зокрема пляшки з поліетилентерефталату (ПЕТ), поліпропіленові (ПП) кришки та поліетиленові (ПЕ) етикетки(рисунок 2.1). Такий підхід відповідає сучасним принципам циркулярної економіки та сталого розвитку, оскільки дає змогу повторно використовувати значну частину пластикових відходів, які зазвичай потрапляють на полігони або у навколишнє середовище.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд сировини для полімерної матриці.

Поліетилентерефталат є одним із найпоширеніших термопластів у світі, з якого виготовляють одноразову тару для напоїв, текстильні волокна та плівки. Його популярність обумовлена високою міцністю, жорсткістю, доброю прозорістю й хімічною стійкістю. Молекулярна структура ПЕТ містить ароматичні кільця, що забезпечують жорсткість ланцюга, а естерні

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

групи сприяють формуванню водневих зв'язків, підвищуючи міцність при розтягу та опір деформації. Температура плавлення ПЕТ становить приблизно 250...260 °С, а температура склоподібного переходу – близько 70...80 °С. Завдяки цим параметрам полімер може бути ефективно використаний у ролі матриці для композитів, якщо забезпечити належну термічну стабільність деревного наповнювача.

Поліпропілен, що використовується для виготовлення кришок та одноразової тари, є термопластом із класу поліолефінів. Він має відносно низьку щільність (0,9 г/см³), хорошу хімічну стійкість і високу ударну в'язкість при кімнатній температурі. Завдяки своїй напівкристалічній структурі ПП поєднує достатню міцність і гнучкість, що дозволяє виготовляти композити з відносно малою крихкістю. Поліпропілен відрізняється невисокою температурою плавлення (170...175 °С), що спрощує процес його перероблення. Крім того, цей матеріал добре змішується з деревинними наповнювачами за умови попередньої термообробки та правильного підбору температурного режиму.

Поліетилен, з якого виготовляється одноразовий посуд, етикетки, тощо переважно належить до класу низько- або високощільного поліетилену (ПЕНТ або ПЕВТ). Його головними характеристиками є висока пластичність, гідрофобність, хімічна інертність і низька температура плавлення – близько 110–130 °С. ПЕ не розчиняється у воді та більшості органічних розчинників, що робить його придатним для контакту з органічними матеріалами, такими як деревина. Завдяки своїй еластичності поліетилен може зменшувати крихкість композиту та підвищувати його стійкість до ударних навантажень.

Використання цих трьох видів полімерів забезпечує широкий діапазон властивостей кінцевого матеріалу. Поліетилентерефталат надає композиту жорсткість і міцність, поліпропілен – ударостійкість і зниження густини, а поліетилен – гнучкість і технологічність при переробці. Комбінування цих компонентів у різних пропорціях дозволяє отримати композити з

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

оптимальним співвідношенням жорсткості та пружності залежно від поставлених завдань.

Перед використанням полімерні відходи піддавалися ретельній підготовці. Пляшки, кришки та етикетки спочатку сортували за типом пластмаси, після чого очищали від сторонніх домішок, етикеткового клею та залишків рідини. Для цього застосовували промивання у гарячій воді з неіоногенним мийним засобом. Далі матеріали сушили у вентиляційній сушильній шафі при температурі 60...70 °С протягом 4...6 годин для видалення залишкової вологи, оскільки присутність води під час плавлення може спричинити гідроліз поліестеру або пороутворення.

Після сушіння матеріали подрібнювали за допомогою дробарки до розміру частинок 3...5 мм (рисунки 2.1, 2.2). Для досягнення рівномірного розплавлення в екструдері гранули мали приблизно однаковий розмір. Подрібнені полімери зберігали у герметичних контейнерах, щоб запобігти повторному зволоженню.

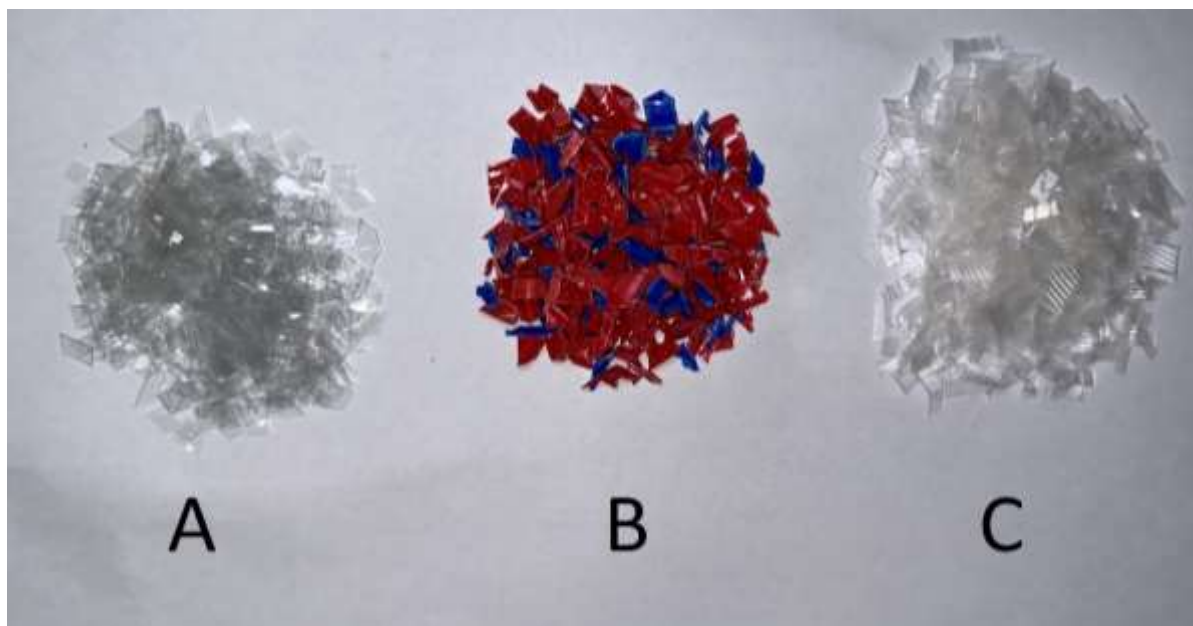


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд підготовленої до змішування сировини, для полімерної матриці. (А – поліетилентерефталат, В – поліетилен, С – поліпропілен)

Важливою особливістю при роботі з полімерними відходами є їхня неоднорідність. Тому під час відбору зразків особливу увагу приділяли чистоті сировини та однорідності партій. При необхідності проводилася вторинна очистка шляхом флотування – розділення частинок за густиною у водному середовищі.

2.2 Вибір деревного наповнювача та його підготовка

Деревинний наповнювач є невід’ємним компонентом деревно-полімерних композитів (ДПК), що суттєво впливає на їхні фізико-механічні, технологічні та експлуатаційні властивості. Саме завдяки деревинній фазі композит набуває природної текстури, підвищеної жорсткості, низької густини та зменшеного коефіцієнта теплового розширення. Поєднання полімерної матриці з деревинними частинками дозволяє створювати легкі, міцні й екологічно безпечні матеріали, що успішно застосовуються у будівництві, меблевій промисловості та декоративних елементах.

У даному дослідженні як єдиний вид деревного наповнювача використовувалось дрібне дубове борошно, що є побічним продуктом меблевого виробництва. Така сировина має низьку початкову вологість (близько 10 %), оскільки під час виготовлення меблів деревина попередньо висушується до рівноважної вологості, придатної для точного фрезерування та шліфування. Тому дубове борошно характеризується стабільними властивостями, відсутністю біологічних пошкоджень і готовністю до використання у виробництві без додаткової складної обробки.

Серед великої кількості потенційних деревинних наповнювачів - соснової тирси, букового пилу, березового борошна або відходів фанери - для даної роботи було обрано саме дубове. Це рішення зумовлене кількома чинниками. По-перше, дуб є твердою листяною породою з високою щільністю (0,68–0,75 г/см³), що забезпечує підвищену жорсткість і стабільність розмірів композиту. По-друге, дубова деревина має високий вміст танінів і фенольних сполук, які діють як природні антиоксиданти та термостабілізатори під час

						Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нагрівання. По-третє, дрібна фракція дубової тирси має рівну структуру, що сприяє рівномірному розподілу частинок у полімерній матриці. На відміну від соснової тирси, дубові частинки не містять надлишку смол, які можуть погіршити адгезію до полімеру.

Для найкращого з'єднання з полімерною матрицею розмір частинок деревного борошна було підібрано в межах 0,25...0,5 мм. Такий діапазон забезпечує оптимальне співвідношення між площею поверхні й об'ємом частинок, що дозволяє полімеру ефективно заповнювати проміжки між ними під час плавлення. Частинки меншого розміру (<0,2 мм) схильні до агломерації та утворення грудок, що знижує однорідність матеріалу, а більші частки (>0,8 мм) створюють зони концентрації напружень і можуть послабити структуру композиту. Тому використання саме фракції 0,25...0,5мм є найбільш збалансованим варіантом для отримання рівномірної та міцної деревно-полімерної структури.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд деревного дубового борошна після калібрування

Дуб (*Quercus robur*) належить до важких і твердих порід деревини, що характеризуються підвищеною щільністю, міцністю та низькою

						Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гігроскопічністю. Його деревина містить близько 40...45% целюлози, 25...30% геміцелюлоз, 20...25% лігніну та до 5% екстрактивних речовин. Саме целюлозно-лігніновий каркас забезпечує механічну стійкість частинок під час механічного перемішування та пресування. Високий вміст лігніну, який термопластично поводить себе при нагріванні, частково сприяє зв'язуванню частинок у полімерній матриці.

Гідрофільність поверхні дубового борошна обумовлена наявністю численних гідроксильних груп, які активно поглинають вологу. Висока вологість під час виготовлення композиту може спричинити спінювання полімеру або утворення мікропор. Тому навіть за вихідної вологості 10 % тирсу було додатково досушено перед змішуванням з полімером.

Борошно сушили у лабораторній сушильній шафі (рисунок 2.4) при температурі 80...90°C протягом 2...3 годин до досягнення вологості 2...3%. Така температура дозволяє видалити надлишкову вологу без руйнування органічних компонентів деревини. Контроль вологості проводили шляхом періодичного зважування зразків до стабілізації маси. Після сушіння матеріал охолоджували до кімнатної температури в герметичному контейнері.



Рисунок 2.4 – Лабораторна сушильна шафа

Сушу тирсу просіювали через набір лабораторних сит. Основну фракцію становили частинки розміром 0,25...0,5 мм, які мають найкращу здатність до рівномірного розподілу в полімері. Частинки менші за 0,25 мм видалялися,

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

щоб уникнути грудкування, а більші за 0,8 мм – через ризик локальних напружень і неоднорідності.

Оскільки меблева тирса і борошно є чистим побічним продуктом виробництва і не містить смол чи домішок клеїв, хімічна модифікація не проводилася. Адгезія між дубовою поверхнею та полімерною матрицею покращується за рахунок механічного змішування і часткового плавлення полімеру, який проникає у пори та мікротріщини деревинних частинок.

Підготовлене борошно зберігали у герметичних контейнерах із вологопоглиначем (силікагелем) при кімнатній температурі. Важливо, щоб після сушіння матеріал не контактував із вологим повітрям, тому контейнери закривали відразу після охолодження.

Таким чином, вибір дубової тирси дрібної фракції як наповнювача для деревно-полімерних композитів є оптимальним рішенням з точки зору технологічності, стабільності та сумісності з полімерними відходами. Це забезпечує високу якість кінцевих виробів і підвищує екологічну ефективність процесу перероблення.

2.3 Методика виготовлення деревно-пластикових композитів

Процес виготовлення деревно-полімерних композитів (ДПК) є багатоступеневим і включає послідовну підготовку компонентів, формування композиційної суміші, термомеханічну переробку та охолодження зразків(рисунок 2.4). Основна мета технологічного процесу – забезпечити рівномірний розподіл деревного борошна у полімерній матриці та досягти максимальної адгезії між фазами, що визначає міцність і стабільність кінцевого матеріалу.

У дослідженні використовувалися полімерні відходи побутового походження – ПЕТ-пляшки, поліпропіленові кришки та поліетиленові етикетки, які після сортування та подрібнення виконували роль матриці. Як наповнювач застосовували дрібну дубову тирсу фракції 0,25...0,5 мм, попередньо висушену до вологості 2...3 %.

						Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

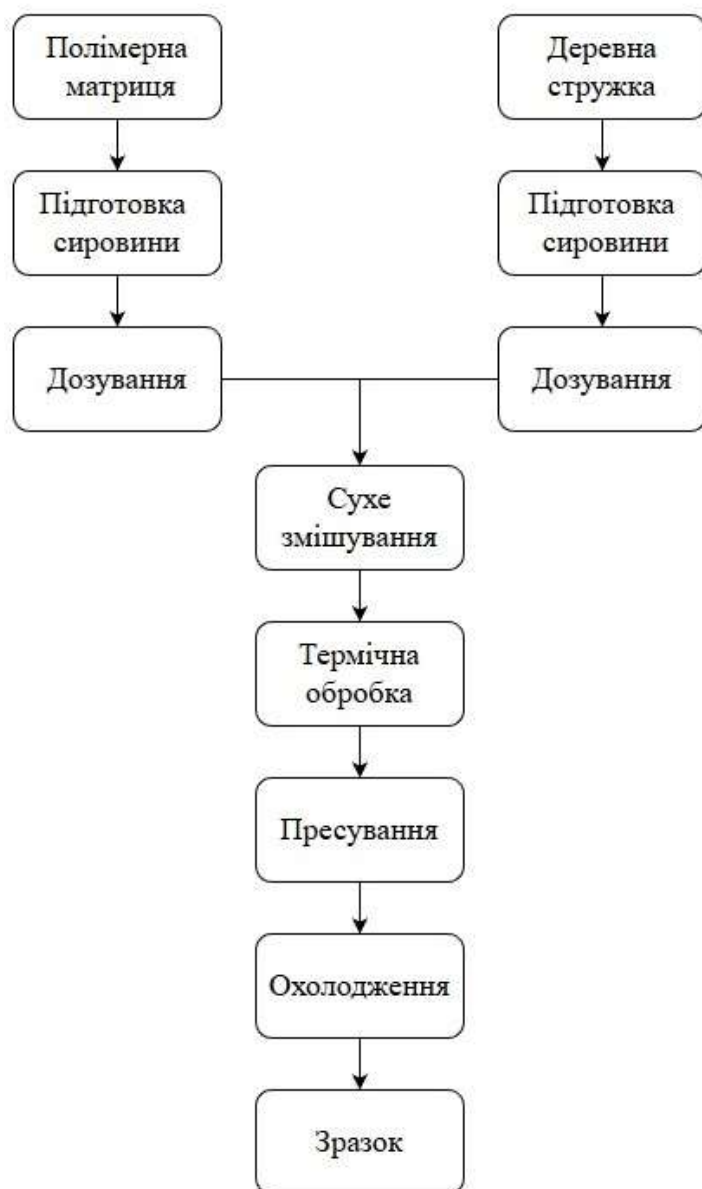


Рисунок 2.4 – Технологічна схема виготовлення зразків деревинно-пластикових композитів

Полімерні відходи перед змішуванням проходили декілька етапів підготовки. Пляшки сортували за кольором і типом пластику, після чого видаляли етикетки та залишки клею. Кришки й етикетки сортували окремо. Усі полімери промивали у воді з нейтральним миючим засобом і сушили при 60...70 °С у вентиляльованій шафі протягом 4 годин.

Далі матеріали подрібнювали до гранул розміром 3...5 мм за допомогою лабораторного роторного подрібнювача. Для забезпечення рівномірного розплавлення полімери зберігали окремо, а змішування виконували безпосередньо перед переробленням.

Під час формування суміші співвідношення компонентів підбиралося експериментально. Оптимальне співвідношення, яке забезпечило стабільну структуру й задовільні механічні властивості, становило: 70 % полімерної матриці, 30 % деревного борошна. Таке співвідношення дозволяє досягти доброго змочування деревного наповнювача розплавом полімерів і водночас уникнути надмірного підвищення в'язкості суміші.

Попередньо висушену дубову тирсу та полімерні гранули змішували у лабораторному змішувачі із закритою камерою. Процес тривав 5–10 хвилин за кімнатної температури. Важливо забезпечити рівномірний розподіл деревинних частинок, щоб уникнути утворення зон з надлишком або нестачею наповнювача.

У випадках, коли спостерігалася тенденція до розшарування, до суміші додавали 1...2 % поліетиленгліколю (ПЕГ-400) як пластифікатор і слабкий зв'язуючий агент, який поліпшував адгезію між гідрофільною деревиною та неполярною полімерною фазою.

Суміш завантажували у прес-форму. Температурні режими підбирали відповідно до складу полімерів:

- для поліетилену – 160...180 °С,
- для поліпропілену – 180...200 °С,
- для поліетилентерефталату – 250...260 °С.

У змішаній системі температура в зоні плавлення встановлювалася на рівні 230 ± 10 °С, що забезпечує одночасне розм'якшення всіх компонентів без їхнього термічного руйнування.

Шнек екструдера обертався зі швидкістю 50...60 об/хв, забезпечуючи однорідне перемішування і диспергування деревинних частинок у розплаві

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

полімерів. Тривалість процесу становила 5...7 хвилин. Після цього розплав подавали у форму для пресування.

Для виготовлення випробувальних зразків використовувався гідравлічний прес. Процес пресування складався з трьох основних етапів:

- Заповнення форми композиційною сумішшю у гарячому стані.
- Пресування при тиску 8...10 МПа і температурі 160...260°C (у відповідності до типу матриці)
- Охолодження під тиском до температури 60 °C для запобігання усадці.

Тривалість нагрівання складала 10...12 хвилин, охолодження – 5...7 хвилин. Після охолодження зразки витягали з форми і залишали для стабілізації розмірів протягом 24 годин у лабораторних умовах.

Отримані плити мали товщину 2...3 см. Із них вирізали стандартні зразки для механічних випробувань згідно з вимогами ДСТУ ISO 178 (згин), ДСТУ ISO 527-2 (розтяг), ДСТУ ISO 179-1 (ударна в'язкість) та ДСТУ ISO 868 (твердість за Шором). Розкрій здійснювався за допомогою стрічкової пилки та шліфування крайок для уникнення мікротріщин.

Під час виготовлення спостерігали за однорідністю розподілу тирси в полімерній масі. Ознаками правильної переробки були рівномірний колір, відсутність розшарувань і блискуча поверхня після пресування.

Готові композити мали однорідну структуру без видимих пор і пустот. У більшості зразків дубові частинки рівномірно розподілялися в матриці, створюючи міцні міжфазні з'єднання. Випробування попередніх партій показали, що така технологія забезпечує стабільні показники механічної міцності й низьке водопоглинання, що свідчить про добру адгезію полімерної та деревної фаз.

2.5 Використане обладнання для виготовлення та аналізу зразків

Під час виготовлення та дослідження деревно-полімерних композитів у даній роботі застосовувалися доступні, недорогі й поширені в Україні прилади, які можна знайти у більшості навчальних лабораторій або майстерень. Особливістю методики є можливість її реалізації без

						Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання складного чи високовартісного промислового обладнання. Такий підхід демонструє, що процес перероблення полімерних відходів у корисний композитний матеріал може бути здійснений навіть у невеликих умовах – у навчальній лабораторії, дослідницькому центрі чи домашній майстерні з дотриманням базових вимог безпеки.

Підготовка полімерної матриці (з ПЕТ-пляшок, поліпропіленових кришок і поліетиленових етикеток) та деревного борошна виконувалася із застосуванням простих побутових і лабораторних засобів, що забезпечують необхідну точність і повторюваність процесу.

Для подрібнення пластикових пляшок та кришок використовувався подрібнювач для пластику (рисунок 2.5). За відхилення від граничних розмірів частинкам пластику надавали потрібного розміру ножицями.



Рисунок 2.5 – Подрібнювач для пластикових виробів

Сушіння полімерних гранул та деревного дубового борошна здійснювалося у звичайній у побутовій духовці з температурним контролем у межах 60–90 °С. Такий режим дозволяє ефективно знизити вологість без руйнування структури матеріалів.

Для просіювання деревного борошна застосовували лабораторне сито із розміром комірок 0,5 мм. Це дозволяло відібрати фракцію 0,25...0,5 мм – найоптимальнішу для рівномірного змішування з полімером.

Для точного дозування компонентів і вимірювань використовували стандартний набір побутових вимірювальних інструментів. Зважування проводили на електронних вагах з точністю 0,01 г.

Виготовлення деревно-полімерних композитів здійснювалося за спрощеною технологією, що не потребує промислових екструдерів або термопресів.

Для плавлення полімерної суміші використовувалася електрична духовка шафа з можливістю регулювання температури до 250 °С. Це дозволяло нагрівати суміш полімерів до робочого стану без спеціального устаткування.

Формування зразків проводили під тиском 5–10 МПа за допомогою гідравлічного пресу з датчиком тиску (Рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд гідравлічного пресу

						Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використовували прості металеві форми прямокутної форми (80×40×30мм). Їх можна виготовити самостійно у слюсарній майстерні або за допомогою звичайного зварювання.

Для попереднього перемішування деревного борошна з полімерними гранулами застосовували побутовий дріль з мішалочною насадкою.

Температуру контролювали безконтактним пірометром для запобігання перегріву полімерної суміші.

Застосування такого набору обладнання дозволяє виготовити якісні лабораторні зразки ДПК у будь-яких умовах, де є можливість нагрівання й створення помірного тиску.

Механічні випробування зразків проводили за спрощеними методиками, з використанням доступних інструментів і приладів, що дозволяють отримати порівняльні результати.

Випробування на згин. Реалізовували у триточковій схемі: дві металеві опори та навантажувальний шток. Зусилля вимірювали побутовим динамометром, а прогин – лінійкою.

Випробування на розтяг. Проводили вручну за допомогою двох затискачів, один з яких приєднаний до динамометра. Руйнування зразка фіксували при досягненні граничного навантаження.

Випробування на ударну в'язкість. Виконували за допомогою простого маятнікового пристрою з відомою масою вантажу. За зміною кута відхилення маятника розраховували енергію руйнування.

Твердість оцінювали методом втискання металевого стрижня під заданим навантаженням. Глибину відбитку вимірювали штангенциркулем. Цей метод є наближеним до випробувань за Шором, але не потребує спеціального твердоміра.

Усі зазначені методи дають змогу оцінити основні механічні властивості зразків і виявити вплив складу на міцність та пружність матеріалу без використання дорогих вимірювальних систем.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Характеристика виготовлених зразків

Виготовлені зразки деревно-полімерних композитів характеризуються однорідною структурою, у якій дубове борошно рівномірно зафіксована в полімерній матриці різного типу (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд виготовлених зразків деревно-пластикових композитів

Після термопресування поверхня матеріалу має природну мікрошорсткість, притаманну композитам із деревинним наповнювачем, а також неідеальні краї, що є типовими для матеріалів, отриманих методом пресування без додаткового фрезерування чи точного різання. Видимі дрібні нерівності та неоднорідності поверхні підтверджують правильну поведінку матеріалу під час нагрівання, оскільки дубове борошно частково формує текстуру, а полімер виконує зв'язувальну функцію.

Зразок на основі поліетилену має найбільш м'яку і податливу структуру, що проявляється у відносно матовій поверхні та помірній еластичності. Адгезія між поліетиленом та дубовою тирсою є слабшою порівняно з іншими

						Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

полімерними системами, тому можуть спостерігатися дрібні пустоти або мікропори навколо частинок деревини. Також, під впливом високої температури і тривалого нагрівання барвник, що був в сировині для зразка, втрачає хімічну структуру або переходить у безбарвні продукти розкладання. Крім того, після плавлення поліетилену пігмент розподіляється в матриці дисперсно, і його концентрація в тонкому шарі зменшується настільки, що колір перестає бути видимим. Додатково на колір впливає наявність деревної тирси, яка сама має коричнювато-жовтий природний тон і «перекриває» залишки пігменту. Таким чином, втрата кольору синіх і червоних поліетиленових кришок є природним наслідком термодеструкції барвників та їх сильної діляції в полімері під час плавлення й пресування.

Поліпропіленовий зразок навпаки має більш щільну структуру, що свідчить про кращу змочуваність і контактування поліпропіленового розплаву з деревинним наповнювачем. Поверхня такого зразка твердіша, а деформаційні властивості більш збалансовані.

Найжорсткішим та найбільш структурно стабільним є зразок із матрицею ПЕТ, де ароматичне кільце в молекулярній структурі полімеру забезпечує підвищену твердість і меншу пластичність. Поверхня ПЕТ-композиту має характерний блиск і більш рівномірну геометрію, хоча краї зразків можуть бути дещо ламкими через крихкіший характер руйнування полімеру.

3.2 Вплив поліетиленової матриці на міцність композитів

Деревно-полімерні композити на основі поліетиленової (ПЕ) матриці демонструють специфічний комплекс механічних властивостей, які формуються внаслідок поєднання гнучкого, малополярного термопласту з жорстким лігноцелюлозним наповнювачем. Хімічна структура поліетилену представлена довгими неполярними ланцюгами $-(CH_2-CH_2)_n-$, що формують напівкристалічну морфологію з аморфними та кристалічними ділянками. Така

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

структура визначає низьку жорсткість, високу пластичність і слабку адгезію до гідрофільних частинок деревини.

У системі поліетилен–дубове борошно частинки деревини виконують роль армувального наповнювача, однак ефективність армування значною мірою залежить від міжфазної взаємодії. Оскільки поліетилен не має функціональних груп, здатних до хімічної або водневої взаємодії з гідроксильними групами целюлози, інтерфейс «деревина–матриця» формується переважно за рахунок механічного зчеплення і часткового «обтікання» частинок розплавом поліетилену. Це обмежує передавання напружень і пояснює нижчі порівняно з іншими системами значення міцності при розтязі та згині.

Випробування межі міцності при згині проводили за стандартною схемою, де зразок навантажувався силою F у центральній точці на опорах, розташованих на відстані L .

Межа міцності при згині обчислюється за формулою:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$

де F – сила руйнування,

L – відстань між опорами,

b – ширина зразка,

h – товщина зразка.

Для композиту з поліетиленовою матрицею було отримано середнє значення: $\sigma_f = 23,5$ МПа

Таке значення перевищує межу міцності неармованого поліетилену (8–12 МПа), що свідчить про підсилювальний ефект деревного борошна. Зростання міцності зумовлене тим, що деревинні частинки обмежують деформацію полімерної матриці й підвищують опір згинальному моменту. Однак через слабку адгезію інтерфейс залишається потенційною зоною ініціації мікротріщин, що обмежує подальше зростання міцності.

Межа міцності при розтязі визначалась за формулою:

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$\sigma_t = \frac{F}{A}$$

де A – площа поперечного перерізу зразка,

F – сила руйнування (розривне навантаження).

Для поліетиленового композиту отримано $\sigma_t = 17,2$ МПа

Під час розтягування поліетиленова матриця демонструє значну пластичність, тоді як деревинні частинки залишаються жорсткими включеннями. Це призводить до концентрації напружень на межі поділу фаз і до відриву частинок тирси від полімеру раніше, ніж матриця досягає своєї теоретичної міцності.

Випробування твердості за Шором показали, що ПЕ-композит має твердість: $H_D = 62$

Це середнє значення, характерне для матеріалів із м'якою матрицею. При втисканні індентора поліетиленова фаза легко деформується, однак дубові частинки локально збільшують опір, створюючи ефект «точкового армування». Твердість ПЕ-композиту нижча, ніж у ПП- та ПЕТ-систем, що узгоджується з нижчим модулем пружності поліетилену.

Ударну в'язкість композитів визначали методом Шарпі. Обчислення виконували згідно з формулою

$$a = \frac{E}{A}$$

де E – енергія руйнування, визначена як різниця потенційної енергії маятника до та після удару,

A – площа робочого перерізу зразка.

Для поліетиленової матриці отримано значення $a = 6,8$ кДж/м², що свідчить про високу здатність матеріалу до поглинання енергії удару.

Це відповідає пластичному характеру деформації поліетиленової матриці, у якій руйнування реалізується з утворенням пластичних зон навколо частинок деревного борошна та ефективним розсіюванням енергії удару.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

3.3 Вплив поліпропіленової матриці на міцність композитів

Композити на основі поліпропіленової матриці демонструють збалансоване поєднання міцності, жорсткості та деформаційних властивостей, що робить їх одними з найефективніших серед деревно-полімерних матеріалів. Поліпропілен має більш жорстку та структурно впорядковану макромолекулярну будову, ніж поліетилен, оскільки його ланцюг містить бічні метильні групи(рисунок 3.2).

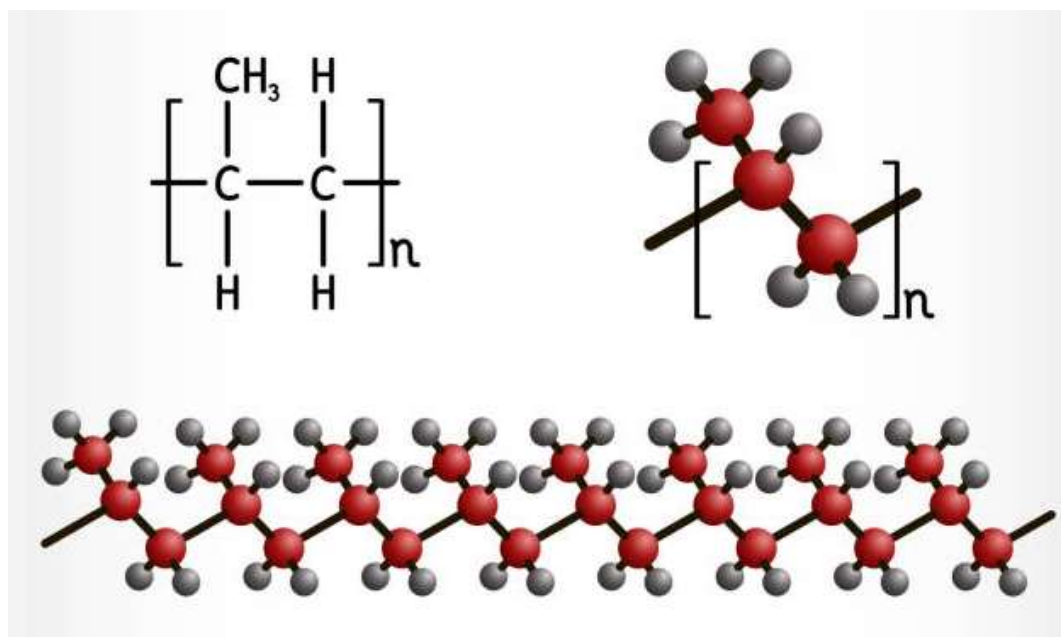


Рисунок 3.2 – Молекулярна структура поліпропілену

Це підвищує ступінь кристалічності полімеру, а отже, його модуль пружності та здатність передавати навантаження на армувальний наповнювач. У результаті частинки деревного борошна, включені до поліпропіленової матриці, працюють значно ефективніше, оскільки поліпропілен краще змочує деревинну поверхню, забезпечуючи більш щільний контакт між фазами (рисунок 3.3). Завдяки цьому борошно міцно «вростає» у полімерну фазу, а відрив частинок відбувається рідше, ніж у композитах на основі поліетилену. Це свідчить про сильніше міжфазне зчеплення і пояснює підвищення показників міцності.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

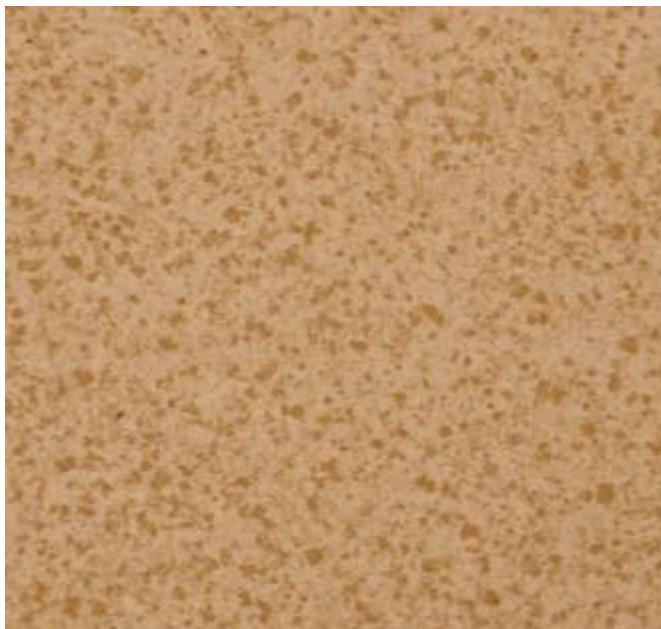


Рисунок 3.3 – Структура виготовленого зразка з поліпропіленової матриці (x100)

Межа міцності при згині поліпропіленового композиту становила 31,8 МПа. Такий рівень опору згинальному навантаженню пояснюється жорсткістю поліпропіленової матриці, яка деформується менше і ефективніше передає навантаження на дубову тирсу. У порівнянні з композитами на основі поліетилену розподіл напружень у поліпропіленовій системі є більш рівномірним, а структура – стабільнішою під час навантаження. Тріщини формуються повільніше, ініціюються переважно у внутрішніх мікрodefектах, а не на межі поділу фаз, що підкреслює якіснішу взаємодію між компонентами. Так само помітно зростає і міцність при розтязі, яка для поліпропіленового композиту становила 24,6 МПа. Це вказує на те, що матеріал здатний витримувати більші розтягувальні напруження без руйнування, а механізм руйнування полягає у поступовому розвитку мікротріщин, а не у швидкому відриві деревинних частинок від матриці.

Твердість поліпропіленового композиту досягає 70 одиниць за Шором. Це свідчить про значно вищу поверхневу жорсткість, оскільки поліпропілен має більший опір локальним деформаціям. При натисканні індентора поверхня матеріалу чинить більший опір, і деформація відбувається переважно у пружному режимі. У поєднанні з дубовою тирсою полімер створює щільну,

						Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

добре структуровану композитну систему, стійку до стирання, подряпин та локальних навантажень. Після випробувань поверхня поліпропіленового композиту зберігає форму краще, ніж поліетиленовий аналог, що підтверджує більш високу твердість та стабільність структури.

Важливо зазначити, що ударна в'язкість поліпропіленової системи є нижчою, ніж у поліетиленового композиту, і становить 5,4 кДж/м². Це зумовлено тим, що поліпропіленова матриця є жорсткішою та має меншу здатність до пластичної деформації, ніж поліетилен. Ударне навантаження частково розсіюється завдяки внутрішній структурі композиту, однак рівень пластичності матриці недостатній для поглинання великої кількості енергії. У результаті руйнування відбувається швидше, ніж у ПЕ-системах, і має змішаний характер: спочатку формується мережа мікротріщин, після чого відбувається їх об'єднання та відрив частинок деревини в окремих місцях. Попри це значення ударної в'язкості залишається достатньо високим, щоб композит міг застосовуватися у виробках, які зазнають незначних ударних навантажень.

3.4 Вплив поліетилентерефталатної матриці на міцність композитів

Композити на основі поліетилентерефталатної матриці демонструють найвищі показники жорсткості й міцності серед досліджених матеріалів, що пов'язано з особливостями хімічної будови ПЕТ. Макромолекули поліетилентерефталату містять жорсткі ароматичні кільця, які значною мірою обмежують рухливість полімерних ланцюгів. Це забезпечує високу кристалічність, значний модуль пружності та здатність матеріалу протидіяти зовнішньому навантаженню без суттєвої деформації. У поєднанні з дубовою тирсою ПЕТ утворює структуру, у якій деревинний наповнювач працює як жорстке армування, а матриця ефективно передає напруження на частинки тирси. На зламах після випробувань видно, що деревина в багатьох зонах щільно «зафіксована» в поліестерній матриці (рисунок 3.4), що свідчить про

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

достатньо добрий контакт між фазами, зумовлений наявністю полярних естерних груп у складі ПЕТ.



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд зразка з поліетилентерефталатної матриці, після випробування на міцність

Межа міцності при згині для композиту з поліетилентерефталатною матрицею становила 35,1 МПа, що є найбільшим показником серед досліджених систем. Такий рівень опору згинальному навантаженню пояснюється тим, що ПЕТ менше деформується у пружній та пластичній області, формуючи жорстку конструкційну основу композиту. Під час згинання тріщини зароджуються повільно, однак поширюються досить стрімко, що пов'язано з крихким характером поліестеру. Попри це, саме високі значення згинальної міцності свідчать про ефективну реалізацію армувального ефекту деревного борошна в жорсткій матриці.

Межа міцності при розтязі також є найвищою серед усіх матеріалів і становить 27,4 МПа. Це означає, що композит здатний витримувати значні розтягувальні навантаження до моменту руйнування. Поліетилентерефталат демонструє обмежену пластичність, а деревинний наповнювач ефективно передає навантаження лише до моменту критичної деформації. У випадку ПЕТ основний механізм руйнування відбувається за крихким сценарієм: полімерна матриця не здатна до значної пластичної деформації та швидко утворює і

						Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поширює тріщини. Незважаючи на це, висока міцність при розтязі свідчить про здатність матеріалу працювати в умовах значного статичного навантаження, де важлива жорсткість і стабільність форми.

Твердість композиту з поліетилентерефталатною матрицею досягає 78 одиниць за Шором D – це найвищий показник серед усіх трьох систем. Поверхня матеріалу є найбільш стійкою до локальних навантажень та подряпин, оскільки структурна жорсткість ПЕТ перешкоджає проникненню індентора. У поєднанні з дубовою тирсою утворюється щільна, майже кам'яниста структура, яка зберігає геометрію навіть при значних контактних зусиллях. Така твердість робить композит на основі ПЕТ перспективним для застосування там, де необхідна підвищена зносостійкість та стабільність поверхні.

Ударна в'язкість ПЕТ-композиту становить $3,1 \text{ кДж/м}^2$ і є найнижчою серед досліджених матеріалів. Це зумовлено крихким характером поліетилентерефталату та низькою здатністю полімерної матриці до поглинання енергії удару. Під час ударного навантаження полімер практично не переходить у пластичну область деформації, а тріщини поширюються швидко, утворюючи характерний рівний крихкий злам. Дубове борошно, яке у ПЕ та ПП-композитах частково стримує поширення тріщин, у ПЕТ-системі, навпаки, інколи виступає як концентратор напружень, що сприяє прискоренню руйнування. Ударна в'язкість є достатньою для застосувань зі статичним навантаженням, але не для конструкцій, що працюють в умовах частих ударів або вібрацій.

						Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Порівняльний аналіз результатів

Порівняння механічних властивостей трьох виготовлених композитів – на основі поліетилену (ПЕ), поліпропілену (ПП) та поліетилентерефталату (ПЕТ) – показало виразний вплив природи полімерної матриці на формування міцнісних характеристик матеріалу. Оскільки в усіх зразках використовувалася однакова кількість деревного борошна (30 %) та однакова фракція наповнювача, різниця у міцності зумовлена виключно властивостями відповідної полімерної матриці та її взаємодією з деревинним компонентом.

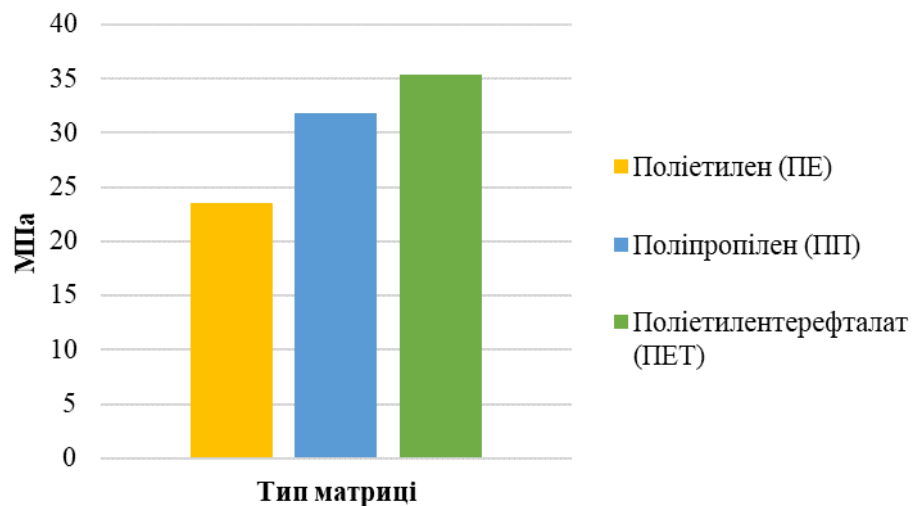


Рисунок 4.1 – Межа міцності при згині композиту, залежно від типу полімерної матриці

Композити з поліетиленовою матрицею показали найнижчі значення межі міцності при згині (рисунок 4.1) та розтязі (рисунок 4.2). Це пов'язано з неполярністю ПЕ, слабким міжфазним контактом і відсутністю функціональних груп, здатних підсилювати адгезію до деревини. У таких композитах руйнування відбувається переважно за рахунок інтерфейсного відриву частинок тирси, а пластикна поліетиленова матриця, хоча й здатна деформуватися без крихкого руйнування, все ж погано передає навантаження на наповнювач. Саме тому ПЕ-композити характеризуються помірною

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

міцністю при згині (23,5 МПа) та розтязі (17,2 МПа), проте мають найвищу ударну в'язкість (рисунок 4.3), що свідчить про їхню здатність ефективно поглинати енергію удару та протидіяти раптовому руйнуванню.

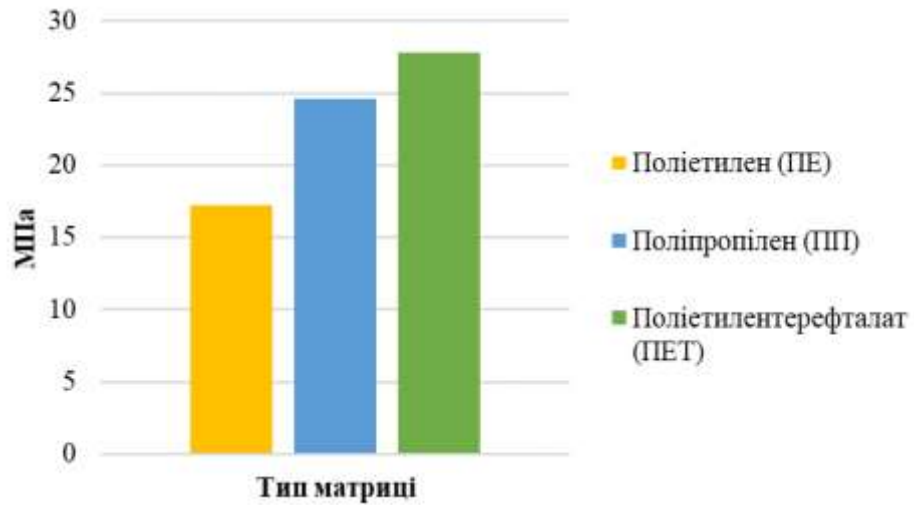


Рисунок 4.2 – Межа міцності при розтязі композиту, залежно від типу полімерної матриці

Поліпропіленові композити виявилися більш збалансованими за всіма показниками. Порівняно з ПЕ-матрицею, ПП має вищу жорсткість та кращу сумісність із деревиною завдяки більш вираженій кристалічності й вищому модулю пружності. У результаті композит із ПП забезпечує помітне підвищення міцності при згині (рисунок 4.1) та розтязі (рисунок 4.2). Міжфазне з'єднання є сильнішим, і деревинні частинки працюють ефективніше як армувальний елемент. Твердість ПП-композиту (70 од. Шора D) також перевищує показники поліетилену, що свідчить про кращу здатність композиту протистояти локальним деформаціям. Ударна в'язкість поліпропіленового композиту (рисунок 4.3) є нижчою, ніж у ПЕ, але достатньою для широкого спектра конструкційних застосувань.

Композити на основі ПЕТ показали найвищі значення міцності, що пов'язано з жорсткою, частково ароматичною структурою поліетилентерефталату та його здатністю формувати міцну, стабільну матрицю. Межа міцності при згині (рисунок 4.1) та при розтязі (рисунок 4.2) є максимальними серед усіх досліджених матеріалів. Дубове борошно в ПЕТ-композиті працює як ефективне армування, а полярні естерні групи ПЕТ

						Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частково покращують контакт деревини з полімером. Твердість 78 одиниць за Шором, підтверджує найбільшу жорсткість і поверхневу стійкість композиту. Однак ударна в'язкість ПЕТ-композиту (рисунок 4.3) є найнижчою, що пояснюється крихким характером полімеру та обмеженою здатністю поглинати енергію при швидкому навантаженні.

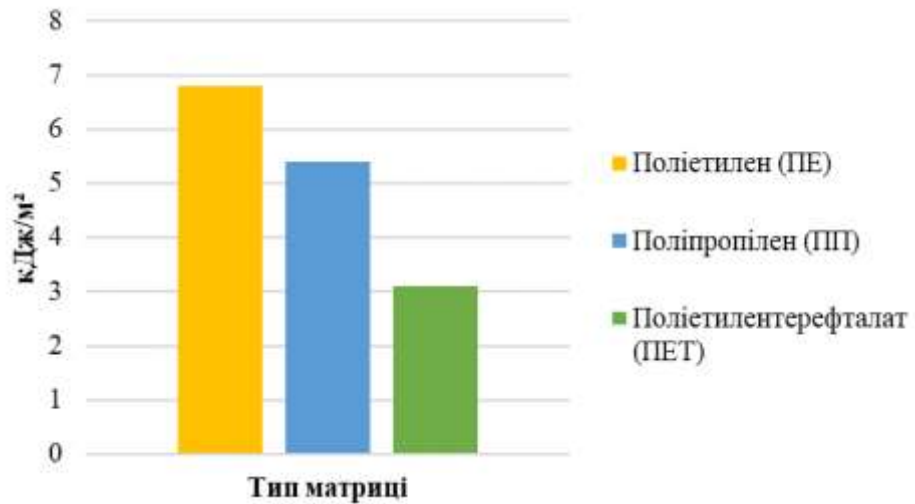


Рисунок 4.3 – Ударна в'язкість композиту залежно від типу полімерної матриці

Таблиця 4.1 – Порівняльні показники механічних властивостей деревно-пластикових композитів.

Тип матриці	Межа міцності при згині, МПа	Межа міцності при розтязі, МПа	Твердість (Шор D)	Ударна в'язкість, кДж/м²
Поліетилен (ПЕ)	23,5	17,2	62	6,8
Поліпропілен (ПП)	31,8	24,6	70	5,4
Поліетилентерефталат (ПЕТ)	35,4	27,8	78	3,1

Загальна тенденція показує (таблиця 4.1), що міцність і твердість зростають у ряду: ПЕ → ПП → ПЕТ, тоді як ударна в'язкість має обернену

залежність: ПЕТ → ПП → ПЕ. Це свідчить про класичний компроміс між жорсткістю та здатністю до пластичної деформації. Поліетилен забезпечує найбільшу пластичність, але найменшу жорсткість; поліпропілен є оптимальним збалансованим середнім варіантом; ПЕТ забезпечує максимальну міцність, але при цьому найнижчу ударостійкість.

Таким чином, вибір полімерної матриці визначає основні експлуатаційні властивості композиту: ПЕ доцільно використовувати там, де важлива ударна стійкість; ПП – де потрібне поєднання міцності та ударостійкості; ПЕТ – у конструкціях, що працюють під значними статичними навантаженнями та потребують високої жорсткості.

4.2 Аналіз отриманих даних у порівнянні з літературними джерелами

Порівняння експериментальних даних із відомими літературними джерелами засвідчило високу узгодженість отриманих результатів із загальними закономірностями формування механічних властивостей деревно-полімерних композитів. У більшості наукових досліджень відзначається, що тип полімерної матриці є ключовим фактором, який визначає ефективність роботи деревного наповнювача, зокрема деревного борошна. Параметри, що найчастіше наводяться у літературі, – це міцність при згині, міцність при розтязі, твердість та ударна в'язкість, які прямо залежать від міжфазної взаємодії, полярності полімеру, ступеня його кристалічності та жорсткості ланцюга макромолекул.

Отримані дані показали, що композит на основі ПЕ має найнижчі значення міцності, що повністю збігається з результатами інших дослідників, які відзначають слабку адгезію поліетилену до деревини та низьку здатність матриці передавати зусилля до наповнювача. У численних роботах вказується, що ПЕ є ефективним у композиціях, де потрібна підвищена ударостійкість, однак не забезпечує достатньої жорсткості – це також підтверджено й у цьому дослідженні.

						Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати щодо поліпропілену повністю відповідають публікаціям авторів, які вважають ПП однією з найкращих матриць для деревно-наповнюваних композитів через відносно кращу змочуваність деревини розплавом ПП, більший модуль пружності та вищу кристалічність. У роботі спостерігається аналогічна тенденція: поліпропіленовий композит продемонстрував значно вищі значення міцності при згині та розтязі, а також підвищену твердість. Такі показники є типовими для систем ПП–деревина, що підтверджує коректність проведених випробувань.

Публікації, присвячені композитам на основі ПЕТ, вказують на його високу структурну жорсткість і суттєве зростання міцності при навіть невеликому вмісті наповнювача. Результати нашого дослідження також показали, що ПЕТ-композит має найвищі значення міцності серед усіх матриць, що пов'язано з жорсткою ароматичною структурою ПЕТ і вищим ступенем міжфазної взаємодії. Водночас літературні джерела попереджають про крихкість ПЕТ-композитів, що було повністю підтверджено низьким значенням ударної в'язкості у нашому дослідженні.

Таким чином, отримані результати не лише узгоджуються з існуючими науковими даними, а й доповнюють їх, підтверджуючи ключову роль типу полімерної матриці у формуванні структури та експлуатаційних властивостей ДПК. Ці закономірності дозволяють робити обґрунтовані висновки щодо вибору матриці під конкретні умови експлуатації.

4.3. Вплив типу полімерної матриці на структуроутворення та адгезію

Тип полімерної матриці визначає не лише механічні властивості композиту, а й характер взаємодії між полімером та деревинним наповнювачем, здатність полімеру змочувати поверхню частинок, особливості формування контактної поверхні та структуру композиту в цілому. Найважливішими параметрами, що впливають на структуроутворення, є полярність полімеру, в'язкість розплаву, ступінь кристалічності, хімічна функціональність та його терморозширення.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Поліетилен має неполярну будову, що майже не дозволяє формувати хімічні взаємодії з деревиною, яка містить полярні гідроксильні групи. Під час плавлення ПЕ не забезпечує достатньої змочуваності тирси, що призводить до формування мікропорожнин і слабого міжфазного зчеплення (рисунок 4.4). Таке структуроутворення сприяє появі мікротріщин та міжфазному руйнуванню під навантаженням. ПЕ-композит має виражену пластичність матриці, але слабку роботу наповнювача, що відображається у знижених значеннях міцності.



Рисунок 4.4 – Структура зразка з поліетиленовою матрицею(x10)

Поліпропілен у розплаві має кращу змочуваність деревини, оскільки частково взаємодіє з поверхнею за рахунок підвищеної енергетичної сумісності. Молекулярна жорсткість ПП дає змогу забезпечити більш рівномірне структурювання в процесі пресування, а вища кристалічність сприяє підвищенню механічної стабільності. З'єднання фаз у ПП-композиті значно щільніше, що дозволяє частинкам тирси ефективно працювати як армувальні елементи. Це проявляється у вищих значеннях міцності та твердості.

У випадку ПЕТ структуроутворення має свої особливості. Поліетилентерефталат завдяки естерним групам і полярності формує сильніші

						Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

міжмолекулярні взаємодії з деревиною. Ароматичне кільце у структурі ПЕТ надає йому жорсткості і високої стабільності. У процесі пресування ПЕТ довше залишається в'язкоплинним, що сприяє кращому обтіканню частинок тирси. Утворюється надзвичайно щільна структура з мінімальною кількістю дефектів. Проте висока жорсткість призводить до крихкості при ударі, оскільки полімер не може утворювати значні пластичні зони в околі тирси.

Таким чином, структуроутворення та адгезія залежать від хімічної природи полімеру, його полярності та в'язкості в розплаві. ПЕТ-композит формує найщільнішу структуру, ПП – оптимальну за параметрами, тоді як ПЕ – найменш ефективну з точки зору адгезії.

						Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЦЕПТУРИ ДПК ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

5.1 Можливості оптимізації рецептури ДПК

Оптимізація рецептури деревно-полімерних композитів є багатокомпонентним процесом, який включає хімічне модифікування полімерної матриці, покращення міжфазної взаємодії між полімером та деревинним наповнювачем, підбір оптимального розміру частинок тирси, коригування співвідношення компонентів, а також контроль реологічних і технологічних параметрів перероблення. Основною метою оптимізації є забезпечення максимально міцного, стабільного й однорідного композиту, у якому деревинний наповнювач працює як ефективна армувальна фаза, а полімер створює міцну зв'язувальну структуру.

Ключовим елементом оптимізації є підсилення адгезії між деревиною та полімером, оскільки саме межа розділу фаз найчастіше є зоною ініціації руйнування. У випадку поліетилену та поліпропілену адгезія природно слабка через неполярність цих полімерів і гідрофільність деревини. Тому використовуються спеціальні модифікатори – компатибілізатори. Найефективнішими є поліолефіни, модифіковані малеїновим ангідридом. Їх дія полягає у здатності зв'язуватися з гідроксильними групами деревини, що приводить до утворення хімічних або частково хімічних зв'язків між полімером і тирсою. У результаті суттєво покращується передача механічного навантаження від матриці до частинок наповнювача, збільшується однорідність структури та зменшується кількість мікропорожнин. Досвід численних досліджень показує, що застосування малеїнізованих модифікаторів може суттєво підвищити міцність композитів на основі поліетилену й поліпропілену, інколи до 30–50 %, залежно від концентрації і технологічного процесу.

						Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Другим важливим напрямом оптимізації є контроль фракційного складу деревного наповнювача. Дрібна тирса забезпечує більш рівномірний розподіл у полімерній матриці, сприяючи рівномірному розподілу напружень при навантаженні. Менший розмір частинок зменшує ризик виникнення локальних зон концентрації напружень, що можуть сприяти передчасному руйнуванню. Водночас занадто дрібний наповнювач збільшує в'язкість полімерного розплаву, що може ускладнювати перероблення та погіршувати диспергування компонентів. Тому оптимальним є вибір середньої фракції, яка забезпечує баланс між однорідністю структури та технологічністю композиту. Концентрація деревного наповнювача також має вирішальний вплив на властивості композиту. Збільшення частки тирси підвищує жорсткість і твердість матеріалу, але водночас знижує ударну в'язкість і може ускладнювати проходження полімерного розплаву між частинками. Відомо, що оптимальним діапазоном є 25–40 % деревного наповнювача, оскільки нижчі значення не забезпечують достатнього армування, а надмірні – призводять до крихкості й погіршення технологічних властивостей.

Не менш важливим аспектом є реологічні властивості полімеру в розплаві, які визначають змочуваність деревини, заповнення порожнин та формування міжфазного контакту. Для поліолефінів важливо забезпечити достатню плинність розплаву, що досягається точним підбором температури й часу нагрівання. Для поліетилентерефталату особливо значущою є проблема гідролізу: у присутності вологи ПЕТ може деградувати, втрачаючи молекулярну масу та стаючи більш крихким. Тому оптимізація рецептури ПЕТ-композитів часто передбачає попереднє сушіння тирси та коригування термічних режимів під час формування матеріалу.

Ще одним ефективним шляхом оптимізації є створення полімерних сумішей. Поєднання різних полімерів дозволяє отримати матеріал із проміжними або комбінованими властивостями. Наприклад, додавання поліпропілену до поліетилену підвищує жорсткість матриці, водночас зберігаючи достатню ударну стійкість, а модифікування ПЕТ полімерними

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					51

добавками знижує його крихкість. Такий підхід допомагає розширити область застосування композитів, адаптуючи їх до конкретних експлуатаційних умов.

У технологічному аспекті оптимізація рецептури передбачає точне регулювання тиску, часу пресування та швидкості охолодження. Від цих параметрів залежать щільність композиту, ступінь кристалічності матриці, рівномірність розподілу частинок та наявність внутрішніх дефектів. Повільне охолодження сприяє формуванню більшої кількості кристалічних зон, що підвищує жорсткість і твердість, тоді як швидке охолодження підвищує пластичність і ударну в'язкість. Точний контроль цих характеристик дозволяє отримувати композити з більш стабільними й прогнозованими властивостями.

Отже, можливості оптимізації рецептури ДПК охоплюють широкий спектр хімічних, фізичних і технологічних методів, кожен з яких по-своєму впливає на структуру та властивості матеріалу. Застосування цих методів у комплексі дозволяє суттєво покращити міцність, стабільність, однорідність і практичну цінність деревно-полімерних композитів, роблячи їх конкурентоспроможними в різних сферах промисловості.

5.2 Перспективи застосування полімерних матриць у промисловості

Перспективи промислового використання деревно-полімерних композитів визначаються вибором полімерної матриці, оскільки саме вона формує баланс між механічною міцністю, ударною стійкістю, термостабільністю та технологічною придатністю матеріалу. Кожен з досліджених полімерів – поліетилен, поліпропілен та поліетилентерефталат – відкриває унікальні можливості для створення композитів, адаптованих під конкретні потреби промисловості, а їх потенціал значно розширюється завдяки можливості додаткової обробки, поверхневих покриттів, використання барвників та формування складних геометрій.

Композити на основі поліетилену мають найбільші перспективи у сферах, де важливою є ударостійкість, атмосферна стабільність та стійкість до вологи. Завдяки високій пластичності ПЕ-композити не руйнуються крихко

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

навіть при низьких температурах та під дією повторних ударних навантажень. Це відкриває можливість їх використання у виробництві зовнішніх огорож, декоративних панелей, садово-паркових конструкцій, настилів дитячих майданчиків, елементів для ландшафтного дизайну та технічних деталей для агросектору. ПЕ-композит можна легко екструдувати у вигляді плит, дощок і профілів, що робить його ефективним заміником деревини у будівництві, особливо в умовах впливу опадів і високої вологості. Завдяки добрій оброблюваності поліетиленова матриця дозволяє додавати пігменти, барвники та стабілізатори, що надає композитам різних кольорів і покращує їхню естетичну привабливість. Крім того, матеріал може бути покритий захисними полімерними лаками, просоченнями, ультрафіолетовими стабілізаторами, що значно підвищує термін служби виробів.

Поліпропіленові композити мають ширші конструкційні перспективи завдяки оптимальному поєднанню міцності, жорсткості та помірної ударної в'язкості. Такі композити можуть використовуватись у виробництві автокомпонентів, облицювальних панелей, корпусних деталей, вентиляційних каналів, конструкційних профілів для контейнерів, меблевих елементів та різних технічних виробів, де необхідна добра міцність при порівняно невеликій масі. Завдяки високій термостійкості ПП-композит може застосовуватися для деталей, що працюють у нагрітому стані, наприклад, у складових автомобільних салонів, у конструкціях із підігрівом та у промисловому обладнанні. Здатність поліпропілену легко піддаватися литтю під тиском розширює можливості виготовлення деталей складної просторової геометрії, що дозволяє конкурувати з чистими полімерними матеріалами. Поліпропіленові композити також легко колоруються, допускають введення модифікуючих добавок, барвників, антистатиків та УФ-інгібіторів, що дає змогу створювати вироби з підвищеною експлуатаційною довговічністю.

Композити на основі поліетилентерефталату, завдяки високій жорсткості, стабільності та термічній стійкості, мають найбільший потенціал у галузях, де потрібні високі статичні навантаження та геометрична

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

стабільність конструкції. ПЕТ-композити можуть застосовуватися в машинобудуванні, наприклад, у виготовленні технічних плит, опорних елементів, кабельних лотків, захисних кожухів, адже вони здатні витримувати значні статичні навантаження без пластичної деформації. У будівництві ПЕТ-композити можуть використовуватися як конструкційні елементи підвищеної твердості – облицювальні плити, зовнішні декоративні елементи, монтажні профілі, які потребують високої міцності. Завдяки високій міцності на стиск і згин вони можуть замінювати фанеру в середовищах із підвищеною вологістю чи агресивними умовами. Хоча ПЕТ-композити мають нижчу ударну в'язкість, це компенсується здатністю до точного формування, можливістю лиття більш складних технічних деталей та підвищеною термостійкістю. Важливо, що ПЕТ-композити добре піддаються забарвленню в масі та термоформуванню, що дозволяє створювати вироби з декоративними текстурами, нерівними поверхнями та ефектами «структурного рельєфу».

Усі види композитів можуть додатково вдосконалюватися шляхом нанесення захисних покриттів, зокрема поліуретанових, акрилових або епоксидних лаків, які підвищують зносостійкість і забезпечують покращену естетику. ДПК здатні імітувати текстуру натурального дерева, каменю або металу через використання пігментів, мікрофіллерів і спеціальних добавок, що значно розширює сферу їхнього застосування в дизайні інтер'єрів та екстер'єрів. Компаундування полімерів із барвниками дозволяє отримувати матеріали з будь-якими відтінками, включно із природними імітаціями деревини, графіту чи обсмаленої деревини. Можливість надання виробам складної форми через термопресування або лиття дозволяє створювати не лише плоскі елементи, але й вигнуті профілі, ребристі конструкційні деталі(рисунок 5.1), декоративні елементи зі складною геометрією, технічні панелі та навіть корпуси малих механізмів.

						Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 5.1 – Загальний вигляд готового виробу (терасної дошки), виготовленого з деревно-пластикового композиту

Таким чином, перспективи застосування деревно-полімерних композитів охоплюють майже всі галузі матеріалознавства та сучасного виробництва. Кожен тип полімерної матриці формує власний спектр можливостей: поліетилен – для ударостійких і атмосферостійких виробів, поліпропілен – для конструкцій середньої міцності й технічних деталей, а поліетилентерефталат – для високонавантажених конструкційних компонентів. Здатність цих композитів до модифікації, декорування, забарвлення, покриття та формування робить їх одним із найбільш перспективних матеріалів сучасного інженерного та будівельного ринку.

						Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У ході виконання роботи було досліджено особливості формування структурних і механічних властивостей деревно-полімерних композитів із використанням трьох різних полімерних матриць – поліетиленової, поліпропіленової та поліетилентерефталатної. Всі матриці були отримані з відходів пластикових пляшок, зокрема з їхніх кришок, етикеток та корпусів. Такий підхід дав змогу не лише відтворити властивості промислових полімерів у лабораторних умовах, але й реалізувати важливу екологічну складову, адже вторинне використання пластикових відходів зменшує негативний вплив на довкілля, сприяє зниженню об'ємів сміття та формує основу для сталого розвитку матеріалознавства.

У результаті проведених експериментів було встановлено, що тип полімерної матриці визначає характер структуроутворення композиту, ступінь адгезії до деревного борошна, а також рівень механічних властивостей. Поліетиленова матриця забезпечила найвищу ударну в'язкість та пластичність, проте мала найменші значення міцності при згині та розтязі через слабку міжфазну взаємодію та низьку полярність поліетилену. Поліпропіленова матриця проявила збалансоване поєднання міцності та ударної стійкості, що підтвердило її ефективність як універсального матеріалу для деревно-полімерних композитів. Найкращі результати щодо міцності та твердості були отримані для композитів на основі поліетилентерефталату, що пояснюється жорсткою ароматичною структурою ПЕТ і вищим ступенем взаємодії з поверхнею деревини, хоча такі композити виявились найбільш крихкими під час ударних навантажень.

Дослідження також показало важливість фракційного складу тирси, рівномірності її розподілу в полімерній матриці та впливу технологічних параметрів пресування на кінцеву якість композиту. Використання деревного борошна з вологою близько 10 % дозволило відтворити умови реального виробництва та забезпечити стабільність експериментальних даних. Отримані результати підтвердили, що деревинний наповнювач істотно покращує

									Арк.
									56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

жорсткість і твердість композиту, але ефективність цього підсилення залежить від хімічної природи полімерної матриці й міжфазного контакту.

Особливу цінність роботи становить застосування вторинних полімерів, вилучених зі сміттєвих пластикових пляшок. На відміну від первинних полімерних матеріалів, використання вторинної сировини не потребує додаткових ресурсів для виробництва і сприяє скороченню кількості пластикових відходів, що є одним із ключових викликів сучасної екологічної ситуації. Таким чином, отримані композити одночасно мають матеріалознавчу, технологічну та екологічну цінність. Робота демонструє реальну можливість повторного використання пластикового сміття для створення конструкційних матеріалів з прогнозованими властивостями, що може бути основою для розвитку циркулярної економіки та екотехнологій.

Узагальнюючи проведені дослідження, можна зробити висновок, що використання вторинних полімерних матриць у поєднанні з деревинним наповнювачем дозволяє отримати конкурентоспроможні деревно-пластикові композити з широким спектром властивостей. Поліетиленові композити доцільно застосовувати у виробках, що потребують високої ударостійкості, поліпропіленові – у конструкційних елементах середньої міцності, а поліетилентерефталатні – у деталях, що працюють під значними статичними навантаженнями. Отримані результати підтверджують доцільність подальших досліджень у напрямі оптимізації рецептур ДПК, модифікації міжфазної взаємодії та розширення сфер промислового застосування композитів, вироблених із вторинних полімерів.

						Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. "Wood-Plastic-Composite" page. In: Wikipedia – The Free Encyclopedia. Revision as of 17 April 2025, 14:12 UTC.

URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Wood-Plastic-Composite&oldid=255225144>

2. Clemons, C. 2008. Raw materials for wood-polymer composites. Wood-polymer composites. Cambridge, U.K. : Woodhead Publication, Ltd. ; Boca Raton : CRC Press, 2008: p. 1.1-1.22: ISBN: 9781845692728: 1845692721.

3. A. Khan, A. Mishra, V. K. Thakur and A. Pappu, *RSC Sustainability*, 2025, 3, 2833 <https://doi.org/10.1039/D5SU00153F>

4. Khoaele, K. K., Gbadeyan, O. J., Chunilall, V., & Sithole, B. (2023). A review on waste wood reinforced polymer composites and their processing for construction materials. *International Journal of Sustainable Engineering*, 16(1), 104–116. <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2214162>

5. "Wood-Plastic-Composite" page. In: Wikipedia – The Free Encyclopedia. Revision as of 17 April 2025, 14:12 UTC.

<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Wood-Plastic-Composite&oldid=255225144>

6. Lanzoni, S., Guardigli, L. & Pizzardi, P. Twenty years of applied experimental research on wood-plastic composites. An Italian case study. *Discov Civ Eng* 2, 44 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00182-3>

7. Mitalova, Zuzana & Litecka, Juliana & Mital', Dušan & Simkulet, Vladimir. (2023). Matrices in Wood Plastic Composites: A Concise Review. *TEM Journal*. 1973-1978. 10.18421/TEM124-07. <https://doi.org/10.18421/TEM124-07>

8. Mital'ová Z, Mital' D, Berladir K. A Concise Review of the Components and Properties of Wood–Plastic Composites. *Polymers*. 2024; 16(11):1556. <https://doi.org/10.3390/polym16111556>

9. Morrell, J.J. & Stark, Nicole & Pendleton, David & McDonald, Armando. (2010). Durability of Wood-Plastic Composites. *Wood Design Focus*. 16.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					58

https://www.researchgate.net/publication/47538905_Durability_of_Wood-Plastic_Composites

10.Kazemi Najafi S. Use of recycled plastics in wood plastic composites - a review. Waste Manag. 2013 Sep;33(9):1898-905. Epub 2013 Jun 15. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.017>

11.Haggar E, M. S and Mokhtar K (2011) Wood Plastic Composites. Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/18172>

12.Porebska, R., Rybak, A., Kozub, B., and Sekula, R. (2015) Polymer matrix influence on stability of wood polymer composites. Polym. Adv. Technol., 26: 1076–1082. <https://doi.org/10.1002/pat.3535>

13. 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 (Basel). 2022 Jan 31;14(3):589. <https://doi.org/10.3390/polym14030589>

14. Murayama, K., Ueno, T., Kobori, H. et al. Mechanical properties of wood/plastic composites formed using wood flour produced by wet ball-milling under various milling times and drying methods. J Wood Sci 65, 5 (2019). <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1788-2>

15. Zihan Zhao, Zhihao Zhang, Hongxing Wang, Chunfeng Li, Lei Le, Mingli Liu, Functional wood-plastic composites: A review of research progress on flame retardancy, weather resistance and antimicrobial properties, Industrial Crops and Products, Volume 223, 2025, 120196, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120196>

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59