

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»  
**Розробка біокомпозитних матеріалів з хімічною  
активацією поверхні наповнювачів природного  
походження / Development of biocomposite materials  
with chemical surface activation of natural fillers**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ПМ-41  
**Дорошенко Андрій Анатолійович**

\_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник:  
к.т.н., професор  
Кашицький Віталій Павлович

\_\_\_\_\_

(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.  
Гарант освітньої програми:  
к.т.н., професор  
Кашицький Віталій Павлович

\_\_\_\_\_

(підпис)

Луцьк – 2026 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Імбирович Н.Ю.

“03” січня \_\_\_\_\_ 2026 року

## З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Дорошенку Андрію Анатолійовичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розробка біокомпозитних матеріалів з хімічною активацією поверхні наповнювачів природного походження / Development of biocomposite materials with chemical surface activation of natural fillers*

керівник роботи *Кашицький Віталій Павлович, к.т.н., професор*,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від *31.12.25* року № *540/01-02*

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «*19*» *травня* *2026* р.

3. Вихідні дані до роботи *літературні джерела, властивості вихідних матеріалів, методики досліджень механічних характеристик*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Вступ; розділ 1 Огляд технічної літератури; розділ 2 Матеріали та методики досліджень; розділ 3 Властивості біокомпозитів з вмістом модифікованих лляних волокон; Висновки; Список використаних джерел; Додатки*

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

*1. Мета та завдання роботи - 1 л ф.А4, 2. Характеристика компонентів та технологія формування зразків - 1 л ф.А4, 3. Дослідження міцності на стискання -1л ф.А4,*

*4. Дослідження ударної в'язкості - 1 л ф.А4, 5. Структура лляних волокон -1л ф.А4,*

*6. Характер руйнування біокомпозитних зразків - 1 л ф.А4, 7. Висновки - 1 л ф. А4.*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контроль</i>	<i>Мисковець С.В., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ, розділ 1 Огляд технічної літератури</i>	<i>05.05.26</i>	
<i>2</i>	<i>Розділ 2 Матеріали та методика досліджень</i>	<i>12.05.26</i>	
<i>3</i>	<i>Розділ 3 Властивості біокомпозитів з вмістом модифікованим лляним волокном</i>	<i>19.05.26</i>	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_ *Дорошенко А.А.*  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ *Кашицький В.П.*  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Дорошенко А.А. Розробка біокомпозитних матеріалів з хімічною активацією поверхні наповнювачів природного походження. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

В роботі проведено критичний аналіз літературних джерел, описано ефективність використання наповнювачів природного походження, особливості хімічної модифікації волокон, а також методи формування біокомпозитних матеріалів.

Подано характеристику компонентів, описано методики визначення міцності на стискання, ударної в'язкості біокомпозитних зразків та технологію їх формування. Досліджено вплив тривалості витримки лляних волокон у розчині гідроксиду натрію на механічні характеристики біокомпозитних матеріалів.

Бакалаврська робота складається з графічної частини та пояснювальної записки.

Пояснювальна записка містить 35 сторінок формату А4, 1 таблицю, 8 рисунків та 28 літературних джерел. Графічна частина містить 7 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: глютинова матриця, дискретне лляне волокно, розчин гідроксиду натрію, міцність на стискання, ударна в'язкість.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Дорошенко				Розробка біокомпозитних матеріалів з хімічною активацією поверхні наповнювачів природного походження	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив	Кашицький						3	35
Н.контр	Мисковець					ЛНТУ, кафедра матеріалознавства, гр. ПМ-41		
Затв.	Імбіроч							

## ANNOTATION

Doroshenko A.A. Development of biocomposite materials with chemical surface activation of natural fillers. Manuscript.

Bachelor's qualification work EP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

Bachelor's qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of used sources, and appendices.

The work provides a critical analysis of literary sources, describes the effectiveness of using fillers of natural origin, features of chemical modification of fibers, as well as methods for forming biocomposite materials. The characteristics of the components are presented. Methods for determining the compressive strength, impact strength of biocomposite samples and the technology of their formation are described. The influence of the duration of exposure of flax fibers in a sodium hydroxide solution on the mechanical characteristics of biocomposite materials is studied.

The bachelor's thesis consists of a graphic part and an explanatory note. The explanatory note contains 35 pages of A4 format, 1 table, 8 figures and 28 references. The graphic part contains 7 sheets of A4 format in Appendix A.

Keywords: gluten matrix, discrete flax fiber, sodium hydroxide solution, compressive strength, impact toughness.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Застосування компонентів у виготовленні біокомпозитів.....	7
1.2. Методи модифікації поверхні волокон.....	13
1.3. Висновки і постановка задач досліджень.....	19
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	21
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	21
2.2. Методи дослідження механічних характеристик.....	25
2.3. Технологія формування біокомпозитних зразків.....	26
РОЗДІЛ 3 ВЛАСТИВОСТІ БІОКОМПОЗИТІВ З ВМІСТОМ МОДИФІКОВАНИХ ЛЛЯНИХ ВОЛОКОН.....	28
3.1. Дослідження механічних властивостей біокомпозитів.....	28
3.2. Структура лляних волокон та характер руйнування зразків.....	30
ВИСНОВКИ.....	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	33
Додатки	

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

## ВСТУП

Розробка біорозкладних та перероблюваних матеріалів з відновлюваних ресурсів, таких як натуральні волокна та біополімери, привернула увагу, оскільки вони виявилися придатними для заміни матеріалів на основі нафти. Це пов'язано зі зростаючим тиском з боку споживачів та екологічного законодавства щодо пошуку відповідної заміни матеріалів на основі нафти. Такі промислові сектори, як автомобільна, пакувальна та аерокосмічна, змушені шукати екологічно чисті та стійкі матеріали. Переваги використання стійких та екологічно чистих матеріалів залежать від екологічних переваг, таких як зменшення викидів газів, що спричиняють глобальне потепління, глобальна стійкість, економічна ефективність та сталий розвиток економіки. Широкі поточні дослідження біокомпозитів, виготовлених з відновлюваних ресурсів, пропонують унікальну можливість розширити потенціал та доступність численних природних ресурсів для розробки біорозкладних або перероблюваних біокомпозитів.

Однак успіх зелених композитів залежить від відповідних методів обробки; вмісту наповнювача; модифікації волокон для покращення взаємодії наповнювача з матрицею та покращення несучих властивостей для довготривалої міцності. Крім того, ще одним важливим аспектом біонаповнювачів у біокомпозитах є їхня продуктивність та якість кінцевого продукту, на яку впливають геометричні властивості, такі як розподіл розмірів та форма.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1. Застосування компонентів у виготовленні біокомпозитів

Натуральні волокна, такі як рослинні волокна та волокна на основі целюлози, є найпоширенішими біонаповнювачами, доступними у всьому світі для армування різних типів полімерних матриць. Крім того, біонаповнювачі, отримані з сільськогосподарських відходів, таких як цукрова тростина, соєвий білок, пшенична солома та рисова лушпиння, шкаралупа мелених горіхів, кокосова лушпиння та стебла бавовни, також використовуються для армування полімерів через їхню поширеність та як економічне рішення для управління відходами [1].

Біонаповнювачі, такі як натуральні волокна, отримали значну увагу як альтернативна заміна традиційним синтетичним наповнювачам завдяки своїм властивостям, таким як біорозкладність, низька вартість та щільність, відновлюваність, незначні викиди вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) та висока питома міцність. Крім того, відмінною особливістю натуральних волокон є те, що вони дешевші за синтетичні волокна та мають низький рівень екологічної небезпеки та небезпеки для здоров'я під час виробництва порівняно зі скловолокном. Ще однією перевагою є те, що натуральні волокна можна використовувати для розробки кращих акустичних та теплоізолюючих нетканих матеріалів завдяки їхній порожнистій та лігноцелюлозній природі. Натуральні волокна, такі як багаса цукрової тростини, коноплі, джут, сизаль, льон мають високу міцність на розтяг і можуть ефективно використовуватися для композитів у численних сферах застосування [2]. Іншими типами біонаповнювачів, які є відновлюваними та поширеними в природі, є рисове лушпиння та лігнін. Лігнін є третім за доступністю природним полімером у

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

природі після целюлози та геміцелюлози, тоді як рисове лушпиння є одним із побічних продуктів (20%), які утворюються в результаті помелу рису.

Ще одним цікавим моментом для цих типів нанонаповнювачів є те, що вони містять 40...90% целюлози, яку можна екстрагувати та використовувати для армування целюлозних волокон або целюлозних нановолокон. Екстраговані целюлозні волокна та/або целюлозні нановолокна потім використовуються для армування широкого спектру полімерних матриць для покращення їх механічних властивостей. Також спостерігається зростаюча тенденція до застосування целюлози або целюлозних нановолокон, екстрагованих з агроприродних ресурсів, таких як рисове лушпиння; жом цукрової тростини; пшенична солома; стебло кукурудзи та ананас. Целюлоза вважається майже необмеженим джерелом сировини з огляду на зростаючий попит на біосумісні та екологічно чисті продукти [3]. Крім того, целюлоза забезпечує стабільність та міцність волокон і є основним структурним компонентом волокна. Кількість целюлози у волокні безпосередньо впливає на корисність волокна для численних застосувань, властивості та економіку виробництва волокна.

Целюлоза є найпоширенішою відновлюваною та екологічно чистою сировиною, яку можна витягти з натуральних волокон, тваринних та сільськогосподарських/лісових культур або залишків. Дві основні підкатегорії целюлози, які можна витягти – це целюлозні нановолокна (CNF) та целюлозні нанокристали (CNC). Целюлозні нановолокна можуть називатися нановолокнистою брильованою целюлозою (NFC) або мікрволокнистою брильованою целюлозою (MFC) залежно від методу їх екстракції та розміру, тоді як целюлозні нанокристали можуть називатися целюлозними нановусами або нанокристалічними целюлозами (NCC). Для екстракції целюлози з лігноцелюлозних волокон використовуються різноманітні методи, такі як хімічна обробка, хіміко-механічна та механічна обробка [4]. Хімічна екстракція целюлози здебільшого здійснюється шляхом кислотного гідролізу

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

з подальшим лужним процесом варіння целюлози, тоді як в інших випадках – лужний гідроліз з подальшим кислотним гідролізом. Під час процесу гідролізу лігнін повністю видаляється реагентами. Було помічено, що властивості композитів залежать від властивостей наноцелюлози, на яку впливають методи екстракції та вихідне джерело целюлози.

Лігнін є одним з найпоширеніших відновлюваних ресурсів у природі після целюлози та геміцелюлози, який виробляється у великих кількостях у паперовій та целюлозно-етанольній промисловості [5]. Крім того, лігнін є другим за поширеністю ресурсом біомаси, а також доступний у порошкоподібній формі. Лігнін – це біополімер, що складається зі складної групи фенольних полімерів, які надають жорсткості та міцності деревним клітинним стінкам різних рослин. Лігнін разом з геміцелюлозою допомагає з'єднувати рослинні клітини, утворюючи композит з видатною міцністю та еластичністю. Загалом, лігнін легкий, крихкий та жорсткий. Лігнін, отриманий з біопереробних заводів або паперу (близько 2%), використовується в таких сферах, як клей та асфальти; виділення хімічних речовин, виробництво поліуретану на основі лігніну, заміна фенолу в фенолформальдегідних формулюваннях та інших полімерах, таких як полівініловий спирт (ПВС), поліетиленоксид (ПЕО), поліетиленхлорид (ПВХ), поліпропілен (ПП) та їх суміші. Однак, існують обмежені дослідження щодо застосування лігніну в сумішевих системах [6]. Крім того, лігнін характеризується як один з найскладніших структур у природі, що обмежує його застосування як армуючого матеріалу.

Безсірчані лігніни привертають все більшу увагу завдяки своїй універсальності та можливості термічної обробки без утворення подразливих запахів, які зазвичай виділяє комерційний крафт-лігнін [7]. Крім того, безсірчані лігніни є економічно ефективними, відновлюваними та поширеними. Їх можна використовувати для виготовлення термопластичних

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та термореактивних смол у поєднанні з епоксидними, ізоціанатними та фенольними смолами.

Рисове лушпиння є одним із найпоширеніших побічних продуктів рису з широким діапазоном співвідношення сторін [8]. Рисове лушпиння відокремлюється від рисового зерна під час процесу помелу. Крім того, в літературі повідомляється, що з кожної тонни виробленого рису утворюється близько 0,23 тонни рисового лушпиння, яке складається з таких основних компонентів, як целюлоза (22...35%), лігнін (20...31%), геміцелюлоза (18...25%) та зола (17%, з яких 94% – це кремнезем). Рисове лушпиння виробляє два типи золи, які можна використовувати як наповнювачі в полімерних матрицях, а саме золу чорного рисового лушпиння та золу білого рисового лушпиння. Було запропоновано різноманітні способи використання рисового лушпиння завдяки його унікальним властивостям, таким як низька насипна щільність (90...150 кг/м<sup>3</sup>); довговічність; висока доступність; унікальний склад та стійкість до атмосферних впливів. Рисове лушпиння має великий потенціал для використання як ізоляційний матеріал у таких сферах, як виробництво панельних плит, активованого вугілля та додаткового цементуючого матеріалу. Рисове лушпиння містить значну частину целюлози, яку можна витягти для застосування в композитах, армованих целюлозою, та підходить для армування біокомпозитів.

Протягом десятиліть традиційні методи виробництва використовувалися для виготовлення полімерних композитів, армованих синтетичними волокнами [9]. Для приготування звичайних композитів використовувалися такі методи виробництва, як екструзія, лиття під тиском та компресійне формування. З іншого боку, через зростання попиту на екологічно чисті та стійкі матеріали, ці методи завдяки інноваціям та високотехнологічним технологіям були змінені для виробництва біоматеріалів з перевагою відновлюваності та біорозкладності порівняно з традиційними матеріалами. Ці методи допомагають вводити натуральні волокна в

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

біополімерні матриці, які утримують волокна разом. Це стабілізує та забезпечує підтримку композиту, передає сили зсуву між механічно високоякісними волокнами та захищає їх від радіації та інших агресивних середовищ.

Додавання натуральних волокон до полімерних матриць безпосередньо залежить від методів обробки, а на характеристики армування впливають геометричні властивості, такі як розподіл розмірів, форма та розмір. Ще одним важливим аспектом натуральних волокон у біокомпозитах є їхня продуктивність та якість кінцевого продукту.

Кислотний гідроліз є найпоширенішим методом обробки для виділення мікрофібрил з різних целюлозних джерел, що дозволяє розчиняти аморфні домени та оголювати кристалічні домени. Кристалічні домени мають стрижнеподібну форму з пропорціями, що залежать від основи целюлози та способу приготування. Нанокристали целюлози вважаються найкращими кандидатами для виробництва нанокомпозитів завдяки їхній армуючій здатності та вражаючим механічним властивостям [10]. З модулем пружності 145 ГПа вони мають потенціал для армування полімерів за низького вмісту наповнювача.

Армування біополімерів целюлозними нановолокнами значною мірою зумовлене можливістю використовувати теоретично передбачену міцність та жорсткість кристалів целюлози в несучих композитах [11]. Целюлозні волокна демонструють кращий армуючий потенціал ніж вуглецеві та скляні волокна у термореактивних матрицях. Це пояснюється тим, що целюлозні волокна гнучкіші, ніж крихкі вуглецеві та скляні волокна, і менше пошкоджуються під час обробки. Целюлоза привернула великий інтерес як один з підсилювачів у різноманітних полімерних матрицях завдяки своїм привабливим та унікальним властивостям, таким як легка вага; високе співвідношення сторін; поширеність; відновлюваність; біосумісність та біорозкладність. Крім того, через зростаючий попит на відновлювані та стійкі матеріали, значні зусилля

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

були докладені для виробництва високофункціональних та високоефективних композитів на основі целюлози.

Автори роботи [12] досліджували екстракцію целюлозних нановусів (CNW) з лляних волокон, які були включені до біосмоли полі(фурфурилового спирту) (PFA). Екстраговані CNW демонстрували довжину волокон від 200 до 400 нм та 10...16 нм зі співвідношенням сторін від 20 до 25. Включення 2% CNW до PFA показало покращення механічних властивостей композиту PFA/CNW, при цьому міцність на розрив збільшилася приблизно на 12%, а подовження при розриві мало ту саму тенденцію. Це пояснювали міцним міжфазним зв'язком між CNW та PFA через водневий зв'язок. Крім того, спостерігалось зміщення температури склування до високих температур у термомеханічних властивостях, що пояснюється обмеженням рухливості ланцюга в результаті покращеної взаємодії завдяки армуванню.

Волокнисто-армовані полімерні композити використовуються в будівництві як конструкційні панелі та секції будівель; крім того, використання волокнистих композитів також перетворилося на економічно доцільні та стійкі будівельні матеріали для несучих елементів мостів та будівель за останні десятиліття. З моменту використання волокнистих полімерних композитів було досягнуто значних досягнень у цивільному будівництві, таких як безпека, економія та функціональність будівництва. Перевагою біокомпозитів є їхнє високе співвідношення міцності до щільності, відмінна корозійна стійкість та хороші механічні властивості. Однак, композити, армовані волокнами, демонструють анізотропну поведінку, і на їхні механічні властивості можуть впливати умови навколишнього середовища та швидкість навантаження [13]. Це пояснюється тим, що волокна мають низьку жорсткість у поперечному напрямку, волокна схильні до сорбції вологи, що призводить до набухання волокон та їх розшарування з матрицею, та високе навантаження на волокна може призвести до агломерації, що зменшує передачу напружень між волокном та матрицею.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Перевага використання композитів, армованих натуральними волокнами, в аерокосмічній галузі порівняно з традиційно використовуваними компонентами, такими як вуглецеве волокно, металеві сплави та гібридні ламінати, полягає в тому, що натуральні волокна пропонують високу питому міцність та жорсткість. Натуральні волокна також забезпечують ефективне проектування складних форм, які є більш аеродинамічними, ніж метал, зменшення споживання палива та викидів завдяки меншій вазі, відновлюваність, оскільки вони є біорозкладними за своєю природою та не мають проблем з корозією.

Використання композитів на основі натурального волокна в автомобільному секторі в основному зумовлене ключовою стратегією, відомою як полегшення, яка допомагає підвищити енергоефективність транспорту та економію палива, зберігаючи при цьому стандарти безпеки. Зменшення (на 10%) ваги автомобіля може покращити економію палива на 6...8% або збільшити запас ходу автомобіля з акумуляторним живленням на 10%. Таким чином, можна прогнозувати, що використання натурального волокна в автомобільних компонентах буде постійно зростати зі збільшенням розширення моделей [14].

## 1.2. Методи модифікації поверхні волокон

Зростаючий інтерес до використання натуральних волокон як армуючого матеріалу в полімерних композитах головним чином зумовлений їхньою поширеністю, відновлюваним походженням, відносно високою питомою міцністю та модулем, легкою вагою, низькою вартістю та біорозкладністю порівняно зі скловолокном. Це зумовлено величезним попитом на нові екологічно чисті матеріали, які мають низький вплив на навколишнє середовище [15]. Навпаки, серйозною проблемою натуральних волокон є їх сильна полярність, що створює несумісність з більшістю

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

полімерних матриць, а також труднощі з компаундуванням. Це призводить до неоднорідного розподілу волокон у матриці та погіршує властивості отриманих композитів. Крім того, натуральні волокна схильні до поглинання води, особливо під впливом зовнішніх факторів (температури та вологості) під час їх застосування. Ці зовнішні фактори можуть призвести до високого поглинання води волокнами та погіршення функціональних, фізичних та механічних властивостей композитних матеріалів через утворення мікротріщин на поверхні та в об'ємі матеріалу, що призводить до відшаровування та поверхневого розчинення композиту [16]. Це може призвести до механічного руйнування композитів та перешкодити їх використанню у високотехнологічних промислових застосуваннях. Дослідження модифікації поверхні натуральних волокон стосуються зменшення поглинання води натуральними волокнами шляхом хімічної обробки з акцентом на короткочасне занурення у воду, покращення міжфазної адгезії між волокнами та полімерними матрицями та вплив навантаження волокнами на поглинання води.

Натуральні волокна не викликають жодних екологічних ускладнень, пов'язаних із відмовою від синтетичних наповнювачів. Тому їх використовують для виготовлення гібридних композитів та біокомпозитів через біорозкладні характеристики, що не властиві синтетичним армованим композитам. І навпаки, основними недоліками компонентів природного походження є їхня погана сумісність з полімерними матрицями та їх гідрофільний характер, що призводить до відносно високої схильності до сорбції води [17]. Ці недоліки призводять до поганих механічних властивостей, що знижує їх потенціал до використання в композитних матеріалах. Часто зустрічаються різні види хімічних обробок, що пов'язані модифікацією натуральних волокон для підвищення їх адгезійної сумісності з полімерними матрицями, а також для зменшення вологовбирання. Гідрофільна гідроксильна група з поверхні волокна модифікується за

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

допомогою різних хімічних обробок, таких як бензоїлювання; ацетилювання; лугування; силанування; обробкою малеїновими сполучними агентами; ізоціанатами; акрилами. Ці хімічні обробки зосереджено на застосуванні функціональних груп реагентів, які здатні реагувати з функціональними групами в структурі волокон і, отже, змінюючи їх склад.

Модифікація сприяє сумісності волокна з полімерними матрицями та значно зменшує поглинання вологи. Крім того, хімічна модифікація не тільки модифікує волокна, але також покращує їхню міцність, а в композитних матеріалах збільшуються їхні механічні властивості [18]. Причина зростання інтересу до застосування лігноцелюлозних волокон у композитних матеріалах в основному обумовлюється їх властивостями в порівнянні з синтетичними волокнами.

Хімічна модифікація поверхні натурального волокна розглядається як метод оптимізації межі розділу волокон для зменшення поганих властивостей міжфазної взаємодії між полімерною матрицею та волокном, що часто мінімізує їхній потенціал як армуючих агентів через гідрофільну природу натуральних волокон. Встановлено, що застосування хімічної обробки активує гідроксильні групи (ОН) або вводить нові фрагменти, які можуть ефективно взаємодіяти з матрицею [19]. В результаті досліджень модифікації поверхні кенафового волокна за допомогою перекису водню виявили зміну хімічного складу кенафового волокна після обробки, що призвело до збільшення шорсткості поверхні волокна та створило хороший зв'язок з матрицею PLA. У цьому дослідженні виявили, що після обробки кенафового волокна спостерігалось зменшення інтенсивності піків (–ОН, С–Н) порівняно з необробленим волокном, що було пояснено видаленням лігніну. Хімічна обробка сендвіч-композитів армованих волокнами конопель силаном та лугами, призводить до зменшення водневих зв'язків у целюлозних гідроксильних групах, що призводило до збільшення концентрації –ОН. Це свідчило про зменшення гідрофільної природи волокна порівняно з обробкою.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Видалення геміцелюлоз з поверхні волокна спостерігалось через зникнення розтягування C=O в ацетильних групах геміцелюлози немодифікованого волокна.

Модифікація волокон не лише змінює хімічний склад волокон, але й додатково змінює морфологію поверхні волокон, що призводить до відмінної морфології немодифікованих та модифікованих волокон переважно за ступенем їх гладкості та шорсткості. Тому, дослідження топографії поверхні волокон надають важливу інформацію про ступінь міжфазної адгезії, яка виникає між волокном та полімером при його використанні як армуючого матеріалу обробленого чи необробленого у полімерах [20]. Велика кількість досліджень була проведена на силанових, лужних, ацетильованих волокнах, в результаті чого встановлено зв'язок морфологічних характеристики з їх механічними властивостями.

Хімічні обробки є синтетичними та зазвичай використовують токсичні хімікати; тому було б ідеально використовувати обробки, які можуть підтримувати біорозкладність та відновлюваний характер волокна. Ще однією сферою інтересу є розширення використання екологічно чистих хімічних речовин для модифікації поверхні волокна шляхом застосування сполучних агентів з натуральних продуктів. Біологічні зв'язуючі агенти, такі як гриби, лігнін, хітин і хітозан і шелак, використовувалися для модифікації волокон. Було виявлено, що застосування цих натуральних зв'язуючих агентів покращує та збільшує адгезію між волокном і матрицею, а також їхні механічні властивості. Крім того, використання натуральних зв'язуючих агентів демонструє подібні морфологічні характеристики, як і хімічно оброблені волокна, такі як видалення домішок з поверхні волокна.

Автори роботи [21] обробку поверхні проводили лугом та силаном на волокнах рамі, а композити готували методом гарячого пресування. Було помічено, що включення волокон рамі до PLA покращило властивості на розтяг порівняно з чистим PLA. Знову ж таки, композити з модифікованою

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

поверхнею продемонстрували подальше покращення міцності на розтяг (оброблені NaOH), порівняно з обробкою силаном. Покращення механічних властивостей було пов'язане з кращою сумісністю та зв'язуванням на межі розділу між PLA та волокнами рамі. Подібні покращення спостерігалися для статичних та динамічних механічних властивостей.

Модифікація малеїновим ангідратом покращує адгезію між PLA та порошком рисового лушпиння, що призводить до покращення механічних властивостей [22, 23]. У дослідженні впливу лужної та силанової обробки композитів, армованих рисовим та пшеничним лушпинням, повідомлялося, що як лужні, так і силанові композити мали вищі модулі згину та напруження, ніж немодифіковані композити та ті, що модифіковані лише силаном. Композит, наповнений рисом та пшеницею, після лужної модифікації демонстрував високу чутливість до поглинання вологи та нижчу поверхневу енергію. Але у випадку композитів, армованих силаном, з рисового лушпиння, оброблених після лужної обробки, спостерігалось зниження поглинання вологи. Крім того, біокомпозити демонстрували підвищену термостабільність та вищі механічні властивості. Було пояснено, що у випадку композитів, оброблених лужною обробкою, лужна обробка очищала поверхню лушпиння та активувала гідроксильні групи (-OH) на поверхні лушпиння. Отже, ці активовані -OH групи легше реагували з силановими функціональними групами, ніж ті, що знаходяться на поверхні необробленого лушпиння.

Застосування поліфурфурилового спирту (PFA) та поліуретану (PU) як можливих біологічних покриттів для надання вологостійкості композитам, армованим натуральним волокном; нанесення органічно-неорганічного матеріалу на поверхню волокна шляхом зануренням для індукції гідрофобності або водостійкості. Щодо нанесення органічно-неорганічного матеріалу для індукції водостійкості на поверхню волокна, більшість підходів зосереджувалися на зменшенні поверхневої енергії в текстильних підкладках за допомогою таких методів нанесення покриттів, як золь-гель процес,

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

травлення, хімічне осадження з парової фази та розпилення рідкого полум'я, що ефективно підвищує гідрофобність. Однак, водостійкість здебільшого вивчається за кутом контакту з водою, що недостатньо для досліджень композитів, армованих натуральними волокнами. У випадку поліфурфурилового спирту та поліуретану, більшість досліджень стосувалися виготовлення водостійких плівок та захисних покриттів з PU, тоді як PFA використовувався для приготування біокомпозитів [24].

Однак, включення натуральних волокон до PFA показало тенденцію до поглинання вологи через гідрофільну природу натуральних волокон. Гідрофобність PFA зменшується зі збільшенням завантаження мікрОВОлокна для композитів на основі PFA/агави. Це пояснюється наявністю більшої кількості гідроксильних груп у композиті. В іншому дослідженні фенольні композити, оброблені вогнезахисним матеріалом, армовані лляним волокном, показали зниження механічних властивостей після того, як композити піддавалися старінню в навколишньому середовищі [25]. У цьому випадку зниження пояснювалося поглинанням вологи лляним волокном та гігроскопічною природою застосованого вогнезахисного матеріалу. Більшість цих підходів мали негативний вплив, спричинений поглинанням вологи через наявність натуральних волокон.

Фенольні композити з льняного волокна, виготовлені методом компресійного формування, були покриті поліфурфуриловим спиртом та поліуретаном, що являють собою біопокриття. Такий підхід не застосовує представлені методи формування покриття, але використовує відновлювані та стійкі гідрофобні полімерні матриці як відповідні захисні покриття для термореактивного матричного композиту, армованого натуральним волокном. Параметри навколишнього середовища, такі як висока відносна вологість та температура, можуть спричинити зміни властивостей отриманих композитних матеріалів. Встановлено, що застосування біологічних покриттів, особливо PFA, може значно знизити поглинання вологи волокнистими композитами та

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

зберегти їх структурну цілісність під впливом умов навколишнього середовища [26].

### 1.3. Висновки і постановка задач досліджень

У відповідь на зростаючі екологічні проблеми та нагальну потребу в охороні природних ресурсів, зростає акцент на розробці стійких альтернатив традиційним синтетичним матеріалам. Ця зміна парадигми спонукала до дослідження природних матеріалів, зокрема тих, що отримані з відновлюваних ресурсів, як життєздатних заміників пластмас на основі нафти в різних промислових застосуваннях. Особливо обнадійливий підхід передбачає використання рослинних волокон як армуючих елементів у полімерних біокомпозитах. Ці натуральні волокна пропонують кілька екологічних та економічних переваг порівняно зі синтетичними волокнами, таких як біорозкладність, перероблюваність, менша щільність та покращені тепло-, електричні та звукоізоляційні властивості. Крім того, виробництво рослинних волокон є менш витратним і має менший вуглецевий слід, що робить їх привабливим варіантом у контексті сталого розвитку. Незважаючи на їхній потенціал, широке використання рослинних волокон у композитах стикається з певними проблемами, включаючи знижену довговічність порівняно із синтетичними матеріалами, такими як вуглецеві або скляні волокна, а також вразливість до поглинання вологи та біологічного розкладу. Крім того, рослинні волокна демонструють значну мінливість у своєму хімічному складі та фізичних властивостях через такі фактори, як умови вирощування, час збору врожаю та методи подальшої обробки. Ця гетерогенність створює серйозну проблему для забезпечення стабільної продуктивності композитів, армованих рослинними волокнами, та обмежує їх масштабованість для

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

промислового застосування. Додатковим перспективним напрямком у розробці екологічно чистих матеріалів є інтеграція біопластиків. Біопластики, отримані з відновлюваних рослинних або тваринних джерел, таких як целюлоза, лігнін, хітозан та біополімери, такі як PLA (полімолочна кислота) та PHA (полігідроксіалканоати), мають переваги біорозкладності та зменшення викидів вуглецю. Ці біокомпозити мають потенціал зробити суттєвий внесок у пом'якшення екологічних проблем, пов'язаних зі звичайними пластмасами. Більше того, включення рослинних волокон як армуючих елементів у ці матеріали покращує їхні механічні властивості та профіль стійкості, що робить їх придатними для різноманітних застосувань, починаючи від автомобільної та пакувальної промисловості та закінчуючи біотехнологічними галузями.

Метою роботи є розробка технологічного режиму обробки дискретних лляних волокон в гідроксиді натрію для формування біокомпозитних матеріалів з високими механічними характеристиками.

Основні завдання, які необхідно виконати для досягнення поставленої мети:

- оптимізувати тривалість витримки лляних волокон в розчині гідроксиду натрію;
- визначити механічні характеристики біокомпозитних матеріалів з вмістом модифікованих волокон;
- дослідити структуру волокон та характер руйнування біокомпозитних зразків під впливом динамічних навантажень.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

Кістковий клей належить до білкових адгезивів природного походження. Основний компонент – колаген (білок сполучної тканини), який після гідролізу перетворюється на желатиноподібні пептиди. Молекулярна структура: довгі поліпептидні ланцюги, що утворюють водні розчини з високою в'язкістю. Домішки: кальцій, фосфати, магній, залишки жиру та органічних речовин [27].

Кістковий клей являє собою сухі гранули, пластини або порошок жовтуватого кольору, які набухають у воді та утворюють клейкий розчин при нагріванні.

Технологія отримання полягає в обробці кісток великої рогатої худоби, іноді – шкіра, сухожилля, роги. Далі проводять знежирення, яке полягає у видаленні жирових домішок органічними розчинниками або гарячою водою. Демінералізацію проводять обробкою кислотами (HCl) для вилучення кальцію та фосфатів. Гідролі полягає у тривалому кип'ятінні у воді (8...12 годин) для руйнування колагену та утворення розчинних пептидів. Фільтрація та упарювання потрібне для видалення нерозчинних часток, концентрування розчину. Сушіння застосовують для отримання сухих гранул або плит, які легко транспортувати та зберігати. Інколи проводять модифікацію: для підвищення міцності та водостійкості застосовують хімічне зшивання (формальдегід, глутаровий альдегід), додавання пластифікаторів (гліцерин).

Порівняльна характеристика кісткового клею та іншого біодеградабельного полімеру представлена в таблиці 2.1.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Таблиця 2.1. Порівняльна характеристика біодеградабельних полімерів

Параметр	Кістковий клей	Полімолочна кислота (PLA)
Хімічна природа	Білковий адгезив на основі колагену	Біополіестер, отриманий шляхом полімеризації молочної кислоти
Сировина	Кістки та шкіра тварин	Кукурудзяний крохмаль, цукрова тростина, інші відновлювані ресурси
Технологія отримання	Гідроліз колагену, сушіння, грануляція	Ферментація цукрів → молочна кислота → полімеризація
Форма випуску	Гранули, пластини, порошок	Гранули для екструзії та 3D-друку
Адгезія	Висока до пористих матеріалів (деревина, папір)	Використовується як матриця у композитах, адгезія залежить від модифікації
Механічна міцність	Добра, але з часом стає крихким	Висока міцність на розтяг та стискання, стабільніша
Водостійкість	Низька, руйнується у вологих умовах	Середня, PLA гідролізується у воді, але повільніше
Термостійкість	Низька (до 70 °C)	Вища (до 150 °C з модифікаторами)
Екологічність	Повністю біорозкладний	Біорозкладний, залежно від умов компостування
Собівартість виробництва	Низька (використання відходів тваринництва)	Вища (ферментація та полімеризація потребують енергії та обладнання)
Основні сфери застосування	Реставрація, деревообробка, музичні інструменти, експерименти у медицині	Біопластики, упаковка, 3D-друк, медицина (імпланти, нитки)

До основних властивостей глютинових полімерів відносять:

- висока адгезія до пористих матеріалів (деревина, папір, тканина, кераміка);
- механічна міцність: забезпечує міцне з'єднання, але з часом стає крихким;
- розчинність: гранули добре розчиняються у гарячій воді, утворюючи в'язкий розчин;
- термостійкість: низька, при температурі понад 70 °С втрачає властивості;
- водостійкість: слабка, у вологих умовах з'єднання руйнується;
- біосумісність: придатні для експериментів у медицині як біoadгезив.
- екологічність: повністю біорозкладний, не містить токсичних компонентів.

Традиційні сфери використання: столярні та меблеві роботи (особливо у виробництві антикварних меблів), виготовлення та реставрація музичних інструментів (скрипки, піаніно), реставрація картин, книг, антикваріату, поліграфія та пакувальні матеріали.

В роботі використано гранули кісткового клею (рисунок 2.1), які розчиняли водою у стехіометричному складі.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд гранул кісткового клею

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Ляні волокна належать до рослинних целюлозних волокон, основний компонент яких целюлоза (біля 70...80 %) [28]. Супутні речовини: геміцелюлоза (близько 10...15 %), лігнін (близько 2...5 %), пектинові речовини, воски та жири. Високий вміст целюлози забезпечує міцність і стійкість до розриву, а низький вміст лігніну робить волокна гнучкими та придатними до прядіння.

Технологія отримання полягає у вирощуванні льону та зборі стебел після дозрівання. Надалі проводять мочіння, яке полягає у біологічному або хімічному розкладанні пектинових речовин для відділення волокон від деревини. Виділення окремих волокон проводять в результаті механічного відділення луб'яних волокон від костриці та розділення волокон на довгі та короткі.

Ляні волокна мають високу міцність на розрив, низьку розтяжність, стійкість до стирання, добрі гігроскопічні властивості (вбирають вологу), висока повітропроникність, стійкі до лужних середовищ, менш стійкі до кислот, низьку теплопровідність, що забезпечує комфорт у текстильних виробках.

Області використання: текстильна промисловість (виготовлення тканин, ниток, канатів, технічні вироби (мішковина, парусина, технічні нитки, композитні матеріали), будівництво (армуючий наповнювач у біокомпозитах, теплоізоляційні матеріали), медицина та екологія (біорозкладні упаковки, неткані матеріали, екологічні композити).

В роботі використано дискретні волокна льону, які отримали в результаті подрібнення довгих волокон механічним способом (рисунок 2.2).

Гідроксид натрію – це білі кристали або гранули, гігроскопічні, добре розчиняються у воді з виділенням тепла ДСТУ EN 896:2022 «Хімікати для очищення води, призначеної для споживання людиною. Гідроксид натрію». Гідроксид натрію має температура плавлення: 318 °С, добре розчиняється у воді, спиртах, гліцерині, утворює сильно лужні розчини.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд дискретних лляних волокон

## 2.2. Методи дослідження механічних характеристик

Межу міцності на стискання визначали за стандартною методикою ASTM D695. Для досліджень використано зразки циліндричної форми висотою 15 мм та діаметром 10 мм, які стискали під дією зростаючого навантаження зі швидкістю 2 мм/хв.

Межу міцності на стискання визначали за формулою:

$$\sigma_{cm} = \frac{P}{S}, \quad (2.1)$$

де  $P$  – максимальне навантаження, за якого відбулось руйнування зразка, Н;

$S$  – площа поперечного перерізу зразка,  $\text{см}^2$ .

Ударну в'язкість епоксикомпозитів визначали згідно класичної методики ASTM D256, ISO 180. Дана методика полягає у впливі динамічного навантаження на зразок у вигляді паралелепіпеда, який розташований на двох

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

опорах маятникового копра. Дослідження проведено на біокомпозитних зразках з квадратним перерізом 10×10 мм та довжиною 60 мм.

Ударну в'язкість розраховували за формулою:

$$KC = \frac{Q \cdot l \left[ (\cos \beta - \cos \alpha) - (\cos \gamma - \cos \alpha) \frac{\alpha + \beta}{\alpha + \gamma} \right]}{S}, \quad (2.2)$$

де  $Q$  – маса молота маятникового копра, Н;

$l$  – відстань від осі обертання до центру ваги молота, м;

$\alpha$  – кут зарядки молота, град;

$\beta$  – кут відхилення маятника після руйнування зразка, град;

$\gamma$  – кут холостого ходу маятника, град;

$S$  – площа поперечного перерізу зразка, м<sup>2</sup>.

### 2.3. Технологія формування біокомпозитних зразків

Формування біокомпозитних зразків полягає у змішуванні глютинового розчину з наповнювачем. Глютиновий розчин готують з гранул кіскового клею, які попередньо дозують ваговим методом після чого поміщаються у герметичну посудину і заливають водою у визначеному співвідношенні. В роботі використано 60% глютиновий розчин, який забезпечує високі механічні властивості біокомпозитних матеріалів і має достатню рідкотекучість. Посудину гранул клею з водою поміщають у сушильну шафу з температурою 50 °С на 3 год з періодичним перемішуванням композиції для отримання однорідного розчину. Волокна льону подрібнюють механічним способом, після чого поміщають у термостійку колбу з 5% розчином гідроксиду натрію (NaOH) і нагрівають до температури 100 °С. Після заданої витримки дискретні волокна промивають у воді і підсушують за температури 100 °С до повного видалення вологи. Оброблені волокна змішують з розчином глютину у співвідношенні 80 мас.ч. на 100 мас.ч. розчину з глютину. Отриману

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

композицію поміщають в порожнину матриці прес-форми (рисунок 2.3) і закривають пуансонами і піддають пресуванню під тиском 150 МПа за допомогою гідравлічного пресу (рисунок 2.4). З метою уникнення пружної післядії пуансони після пресування фіксують і прес-форму поміщають в сушильну шафу на 2 год за температури 140 °С. Після охолодження прес-форми зразки видаляють і досліджують.



Рисунок 2.3 – Матриця та пуансони прес-форми



Рисунок 2.4 – Гідравлічний прес

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

## РОЗДІЛ 3

### ВЛАСТИВОСТІ БІОКОМПОЗИТІВ З ВМІСТОМ МОДИФІКОВАНИХ ЛЛЯНИХ ВОЛОКОН

#### 3.1. Дослідження механічних властивостей біокомпозитів

Межа міцності біокомпозитних матеріалів, що містять необроблені лляні волокна становить 25,7 МПа (рисунок 3.1). У випадку використання 5% розчину гідроксиду натрію з витримкою волокон протягом 5 хв та 10 хв відбувається підвищення на 10% та 18% відповідно міцності на стискання біокомпозитних матеріалів. Це пов'язано з очищенням поверхні дискретних волокон від воскового покриття, а також появою гідроксильних груп на поверхні волокон. Наступне підвищення тривалості витримки до 15 хв та 20 хв міцність на стискання знижується, оскільки лужне середовище спричиняє руйнування целюлози, в результаті чого волокна втрачають міцність.

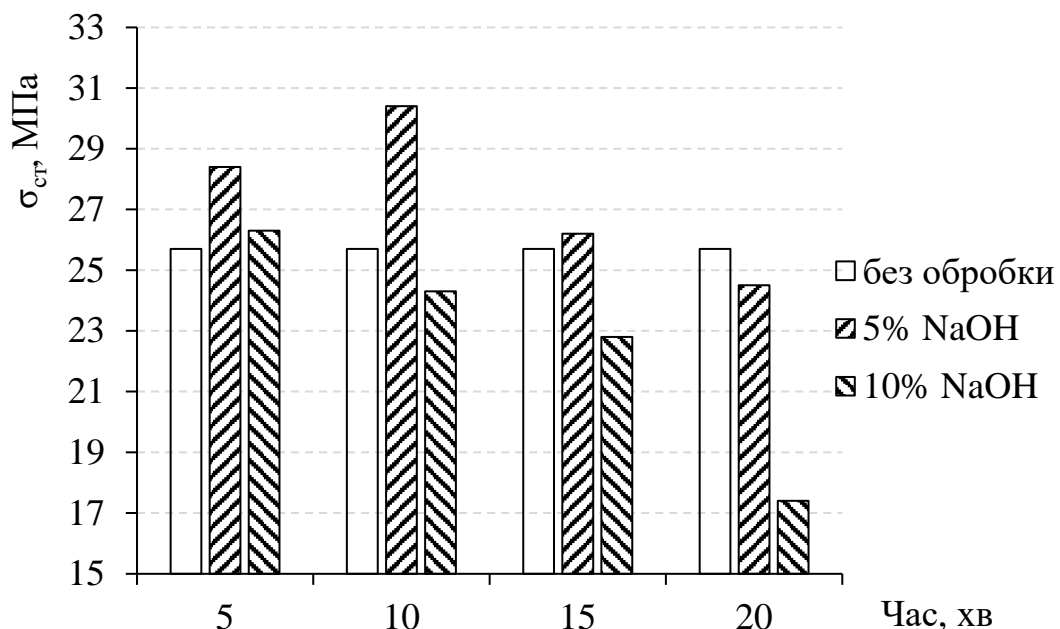


Рисунок 3.1 – Вплив тривалості витримки лляного волокна в розчині гідроксиду натрію на міцність на стискання біокомпозитів

Проведення обробки розчином гідроксиду натрію з концентрацією 10% призводить до зниження міцності на стискання біокомпозитних матеріалів, що пов'язано з значним руйнуванням поверхневого шару лляних волокон.

Ударна в'язкість біокомпозитних матеріалів, що містять лляні волокна без обробки, становить 6,8 кДж/м<sup>2</sup> (рисунок 3.2). Проведення витримки лляного волокна у 5% розчині гідроксиду натрію забезпечує підвищення ударної в'язкості на 5% та 23% відповідно, що пояснюється утворенням додаткових хімічних зв'язків між активними групами глютинового в'язучого та функціональними групами на поверхні лляного волокна. Кількість функціональних груп на поверхні волокна визначається тривалістю витримки, однак за тривалості витримки 15 хв та 20 хв відбувається розчинення целюлози, що призводить до руйнування волокна. Тому оптимальна тривалість обробки лляного волокна становить 10 хв, що забезпечує формування біокомпозитного матеріалу з високою адгезійною міцністю між компонентами.

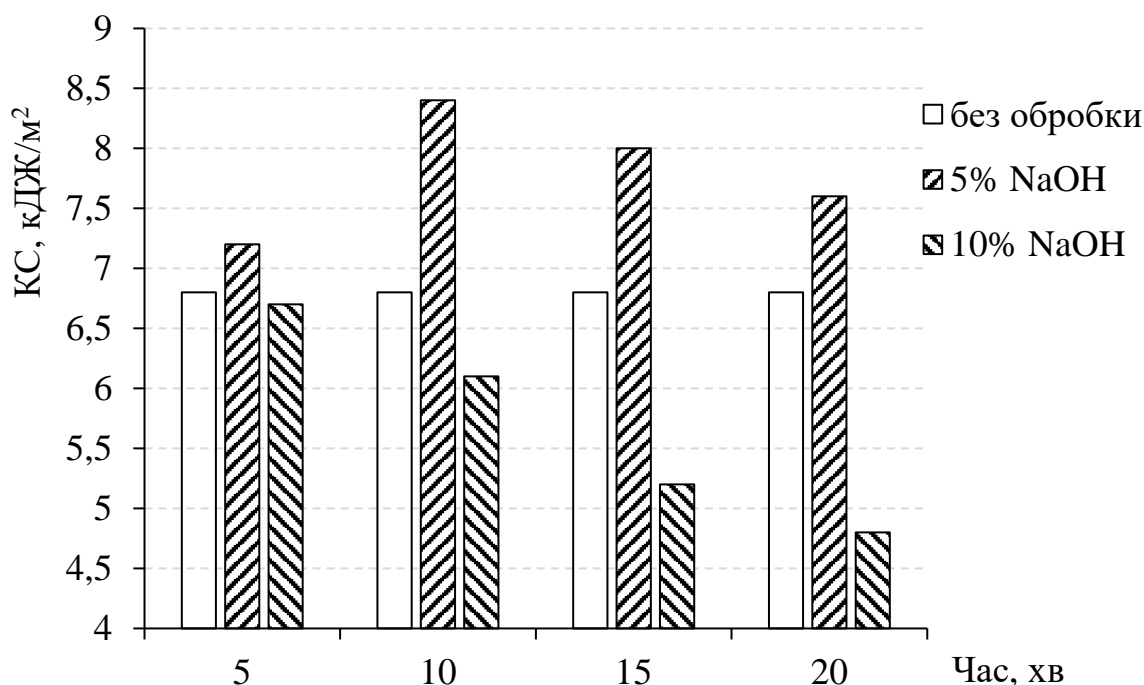


Рисунок 3.2 – Вплив тривалості витримки лляного волокна в розчині гідроксиду натрію на ударну в'язкість біокомпозитів

### 3.2. Структура лляних волокон та характер руйнування зразків

Хімічна обробка за допомогою 5% розчину гідроксиду натрію змінює морфологію поверхні, в результаті чого покращується та збільшується адгезія між волокном та матрицею, а також їхні механічні властивості. Поверхня волокна без обробки містить різні домішки (рисунок 3.3, а), які ускладнюють утворення хімічних зв'язків між активними групами компонентів біокомпозитного матеріалу. Після обробки поверхня волокна очищається від домішок та дрібних елементів структури (рисунок 3.3, б), які виступають концентраторами напружень і знижують когезійну міцність біополімерної матриці.

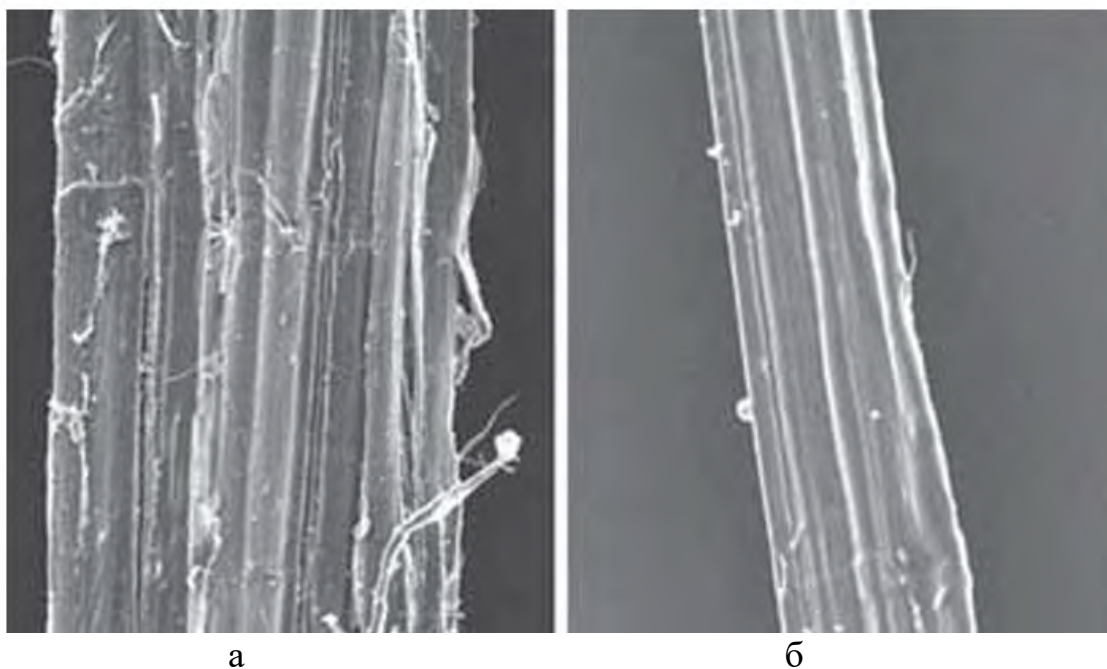


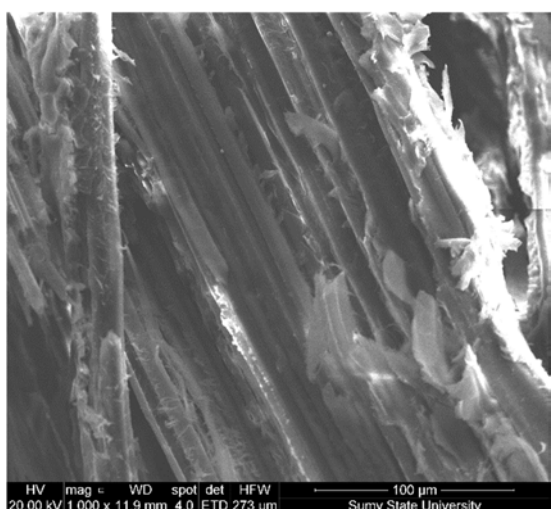
Рисунок 3.3 – Мікроструктура лляного волокна:

а – необроблене; б – оброблене гідроксидом натрію

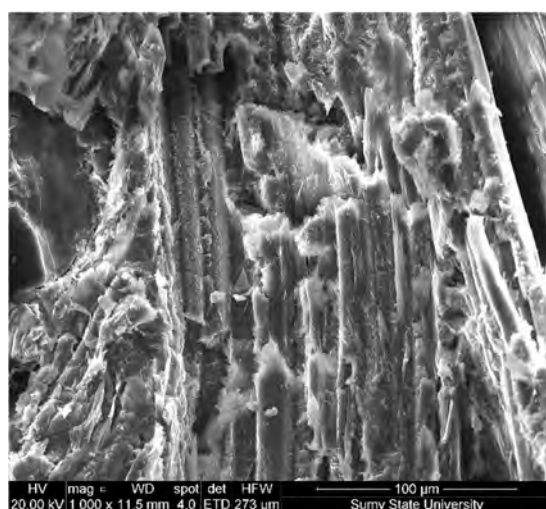
На поверхні лляних волокон, обробка яких тривала 5хв, присутня незначна кількість глютинової матриці (рисунок 3.4, а), що вказує на погане змочування поверхні волокна в'язучим. У випадку обробки волокон тривалістю 10 хв на фрактограмі зламу зафіксовано залишки глютинової

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

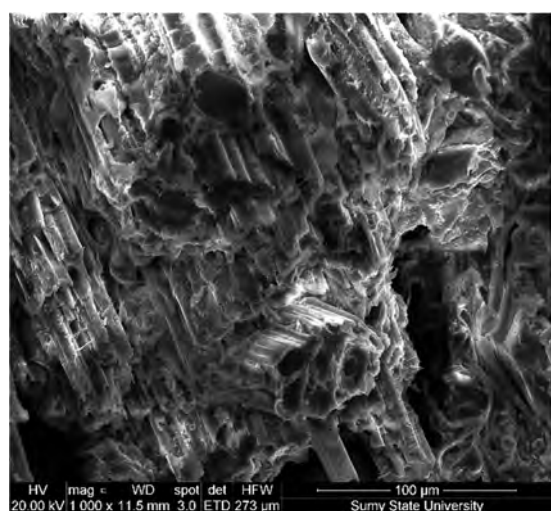
матриці (рисунок 3.4, б), оскільки адгезійна міцність досягає максимального значення. У випадку обробки волокон тривалістю 15 хв відбувається руйнування частини волокон (рисунок 3.4, в) через втрату целюлози та міцності, що підтверджується наявністю коротких волокон в глютиновій матриці. Обробка волокон тривалістю 20 хв призводить до втрати міцності волокон, які хаотично розташовані у глютиновій матриці (рисунок 3.4, г).



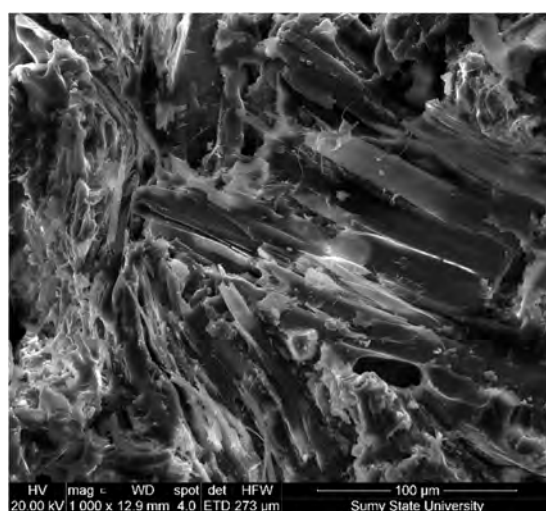
а



б



в



г

Рисунок 3.4 – Мікроструктура біокомпозитних зразків з вмістом льняного волокна обробленого протягом: а – 5 хв; б – 10 хв; в – 15 хв; г – 20 хв

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР 0126.00.00.000 ПЗ

Арк.

31

## ВИСНОВКИ

Використання 5% розчину гідроксиду натрію з витримкою волокон протягом 10 хв призводить до підвищення на 18% міцності на стискання біокомпозитних матеріалів. Це пов'язано з очищенням поверхні дискретних волокон від воскового покриття, а також появою гідроксильних груп на поверхні волокон.

Проведення витримки лляного волокна у 5% розчині гідроксиду натрію забезпечує підвищення ударної в'язкості на 23%, що пояснюється утворенням додаткових хімічних зв'язків між активними групами глютинового в'язучого та функціональними групами на поверхні лляного волокна.

Хімічна обробка за допомогою 5% розчину гідроксиду натрію змінює морфологію поверхні, в результаті чого покращується та збільшується адгезія між волокном та матрицею, а також їхні механічні властивості.

Після обробки поверхня волокна очищається від домішок та дрібних елементів структури, які виступають концентраторами напружень і знижують когезійну міцність біополімерної матриці.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Thakur V.K., Thakur M.K., Raghavan P., Kessler M.R. Progress in green polymer composites from lignin for multifunctional applications: A review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2014. Vol. 2. P. 1092–1107.
2. Zhu J., Zhu H., Njuguna J., Abhyankar H. Recent development of flax fibres and their reinforced composites based on different polymeric matrices. *Materials*. 2013. Vol. 6. P. 5171–5198.
3. Fatah I.Y.A., Khalil H., Hossain M.S., Aziz A.A., Davoudpour Y., Dungani R., Bhat A. Exploration of a chemo-mechanical technique for the isolation of nanofibrillated cellulosic fiber from oil palm empty fruit bunch as a reinforcing agent in composites materials. *Polymers*. 2014. Vol. 6. P. 2611–2624.
4. Motaung T.E., Mokhena T.C. Effects of mechanical fibrillation on cellulose reinforced poly(ethylene oxide). *Materials Science and Applications*. 2015. Vol. 6. P. 713–722.
5. Frigerio P., Zoia L., Orlandi M., Hanel T., Castellani L. Application of sulphur-free lignins as a filler for elastomers: Effect of hexamethylenetetramine treatment. *BioResources*. 2014. Vol. 9. P. 1387–1399.
6. Agarwal K., Prasad M., Sharma R., Setua D.K. Novel bio-degradable lignin reinforced NBR composites. *International Journal of Energy Engineering*. 2014. Vol. 4. P. 47–55.
7. Thakur V.K., Thakur M.K. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. *Carbohydrate Polymers*. 2014. Vol. 109. P. 117–127.
8. Arjmandi R., Hassan A., Majeed K., Zakaria Z. Rice husk filled polymer composites. *Cellulose*. 2015. Vol. 25. P. 35–45.
9. Miao C., Hamad W.Y. Cellulose reinforced polymer composites and nanocomposites: a critical review. *Cellulose*. 2013. Vol. 20. P. 2221–2249.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

10. Hubbe M.A., Rojas O.J., Lucia L.A., Sain M. Cellulosic nanocomposites: a review. *BioResources*. 2008. Vol. 3. P. 929–980.

11. Bergenstråhle M., Berglund L.A., Mazeau K. Thermal response in crystalline I $\beta$  cellulose: a molecular dynamics study. *Journal of Physical Chemistry B*. 2007. Vol. 111. P. 9138–9145.

12. Mtibe A., Liganiso L.Z., Mathew A.P., Oksman K., John M.J., Anandjiwala R.D. A comparative study on properties of micro and nanopapers produced from cellulose and cellulose nanofibres. *Carbohydrate Polymers*. 2015. Vol. 118. P. 1–8.

13. Nicolae T., Gabriel O., Dorina I., Ioana E., Vlad M., Cătălin B. Fibre reinforced polymer composites as internal and external reinforcements for building elements. *Buletinul Institutului Politehnic din Iași*. 2008. Vol. 54.

14. Fatah I.Y.A., Khalil H., Hossain M.S., Aziz A.A., Davoudpour Y., Dungani R., Bhat A. Exploration of a chemo-mechanical technique for the isolation of nanofibrillated cellulosic fiber from oil palm empty fruit bunch as a reinforcing agent in composites materials. *Polymers*. 2014. Vol. 6. P. 2611–2624.

15. Saidane E.H., Scida D., Assarar M., Ayad R. Assessment of 3D moisture diffusion parameters on flax/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016. Vol. 80. P. 53–60.

16. Cai M., Takagi H., Nakagaito A.N., Li Y., Waterhouse G.I. Effect of alkali treatment on interfacial bonding in abaca fiber reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016. Vol. 90. P. 589–597.

17. Yousefi H., Faezipour M., Hedjazi S., Mousavi M.M., Azusa Y., Heidari A.H. Comparative study of paper and nanopaper properties prepared from bacterial cellulose nanofibers and fibers/ground cellulose nanofibers of canola straw. *Industrial Crops and Products*. 2013. Vol. 43. P. 732–739.

18. Satyanarayana K.G., Arizaga G.G., Wypych F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview. *Progress in Polymer Science*. 2009. Vol. 34. P. 982–1021.

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

19. Thakur V.K., Singha A.S., Thakur M.K. Green composites from natural fibers: Mechanical and chemical aging properties. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2012. Vol. 17. P. 407–423.

20. Edeerozey A.M., Akil H.M., Azhar A., Ariffin M.Z. Chemical modification of kenaf fibers. *Materials Letters*. 2007. Vol. 61. P. 2023–2025.

21. Yu T., Ren J., Li S., Yuan H., Li Y. Effect of fiber surface-treatments on the properties of poly(lactic acid)/ramie composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. Vol. 41. P. 499–505.

22. Mohammadi-Rovshandeh J., Pouresmaeel-Selakjani P., Davachi S.M., Kaffashi B., Hassani A., Bahmeyi A. Effect of lignin removal on mechanical, thermal, and morphological properties of polylactide/starch/rice husk blend used in food packaging. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. Vol. 131.

23. Tran T.P.T., Bénézet J.-C., Bergeret A. Rice and Einkorn wheat husks reinforced poly(lactic acid) (PLA) biocomposites: Effects of alkaline and silane surface treatments of husks. *Industrial Crops and Products*. 2014. Vol. 58. P. 124–131.

24. Kumar R. A review on epoxy and polyester based polymer concrete and exploration of Polyfurfuryl Alcohol as polymer concrete. *Journal of Polymer*. 2016.

25. Molaba T.P., Chapple S., John M.J. Flame retardant treated flax fibre reinforced phenolic composites: Ageing and thermal characteristics. *Fire and Materials*. 2017.

26. Zhang J., Tu W., Dai Z. Transparent polyester polyol-based polyurethane coatings: the effect of alcohols. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2013. Vol. 10. P. 887–895.

27. Властивості глютину [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wood\\_glue](https://en.wikipedia.org/wiki/Wood_glue)

28. Властивості лляних волокон [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.textilesphere.com/2019/10/properties-of-flax-fiber.html>

					БР 0126.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35