

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 технології формування глютинових
полінаповнених біокомпозитних виробів /
Development of forming technology of gluten
biocomposite products reinforced with a few fillers

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ-41
Заболоцький Богдан Миколайович

(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: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“03” січня 2026 року

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

Заболоцькому Богдану Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка технології формування глютинових полінаповнених біокомпозитних виробів / Development of forming technology of glutin biocomposite products reinforced with a few 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 фізико-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 полінаповнених біокомпозитних матеріалів; 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 - 1 л ф.А4,

3. Характеристика обладнання - 1 л ф.А4, 4. Міцність на стискання біокомпозитів - 2 л ф.А4,

5. Руйнування під впливом статичного навантаження - 1 л ф.А4, 6. Висновки - 1 л ф.А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контоль</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 методики досліджень</i>	<i>12.05.26</i>	
<i>3</i>	<i>Розділ 3 Властивості полінаповнених біокомпозитних матеріалів</i>	<i>19.05.26</i>	

Здобувач вищої освіти _____ *Заболоцький Б.М.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

АНОТАЦІЯ

Заболоцький Б.М. Розробка технології формування глютинових полінаповнених біокомпозитних виробів. 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 подано аналіз літературних джерел, визначено перспективи та особливості формування біокомпозитних матеріалів на основі компонентів природного походження.

В роботі представлено характеристики матеріалів у вихідному стані, подано опис методу визначення міцності на стискання біокомпозитних матеріалів та описано технологію формування біокомпозитних зразків. Досліджено вплив гранулометричного складу та ступеня втрати вологи на механічні характеристики біокомпозитних матеріалів.

Бакалаврська робота складається з графічної частини та пояснювальної записки.

Пояснювальна записка містить 42 сторінки формату А4, 12 рисунків та 28 літературних джерел. Графічна частина містить 7 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: розчин глютину, стебла рослин, порошок шкаралуп горіха, міцність на стискання, ступінь втрати вологи.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка технології формування глютинових полінаповнених біокомпозитних виробів	Літ.	Арк.	Аркушів	
Розробив	Заболоцький						3	42	
Перевірив	Кашицький								
Н.контр	Мисковець					ЛНТУ, кафедра матеріалознавства, гр. ПМ-41			
Затв.	Імбінович								

ANNOTATION

Zabolotsky B.M. Development of technology for forming gluten polyfilled biocomposite products. Manuscript.

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

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

The work presents an analysis of literary sources, identifies prospects and features of forming biocomposite materials based on components of natural origin.

The work presents a characteristic of materials in the initial state, describes the method for determining the compressive strength of biocomposite materials, and describes the technology for forming epoxy composite samples. The influence of the particle size distribution and the degree of moisture loss on the mechanical characteristics of biocomposite materials is studied.

The bachelor's work consists of a graphic part and an explanatory note.

The explanatory note contains 42 A4 pages, 12 figures and 28 references. The graphic part contains 7 A4 sheets in Appendix A.

Keywords: gluten solution, plant stems, walnut shell powder, compressive strength, moisture loss rate.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Перспективи розвитку індустрії біокомпозитних матеріалів.....	7
1.2. Способи обробки природніх волокон.....	12
1.3. Висновки і постановка задач досліджень.....	14
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	18
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	18
2.2. Методи дослідження механічних характеристик.....	25
2.3. Технологія формування біокомпозитних зразків.....	26
РОЗДІЛ 3 ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІНАПОВНЕНИХ БІОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	29
3.1. Дослідження міцності на стискання біокомпозитів.....	29
3.2. Аналіз характеру руйнування біокомпозитних зразків.....	35
ВИСНОВКИ.....	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	39
Додатки	

ВСТУП

Зростання екологічних вимог до промислового виробництва, необхідність раціонального використання природних ресурсів і впровадження принципів циркулярної економіки сприяють розвитку технологій отримання матеріалів нового покоління. Біокомпозити розглядаються як перспективна альтернатива традиційним полімерним матеріалам завдяки можливості часткового або повного використання відновлюваної сировини, зменшенню вуглецевого сліду та потенціалу для повторного використання або біодеструкції після завершення життєвого циклу виробу.

Біокомпозиційні матеріали являють собою багатокомпонентні системи, у яких полімерна матриця поєднується з наповнювачами природного або змішаного походження. Залежно від призначення та умов експлуатації як матриця можуть використовуватися термопластичні, термореактивні або біополімерні системи, а роль армувальних або дисперсних компонентів виконують волокна рослинного походження, целюлозовмісні матеріали, лігнін, крохмаль, деревне борошно, природні мінерали та інші функціональні добавки. Введення декількох типів наповнювачів дозволяє створювати полінаповнені композиції зі складною структурною організацією та керованими експлуатаційними характеристиками.

Особливістю полінаповнених біокомпозитів є можливість поєднання декількох механізмів зміцнення та модифікування матеріалу одночасно. Використання різних за природою та дисперсністю наповнювачів дозволяє впливати на процеси структуроутворення, підвищувати жорсткість і міцність виробів, покращувати теплофізичні характеристики, регулювати водопоглинання та забезпечувати необхідні технологічні властивості під час формування. Разом із тим багатокомпонентний склад таких систем ускладнює прогнозування їх поведінки та потребує детального дослідження взаємодії між усіма компонентами композиції.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Перспективи розвитку індустрії біокомпозитних матеріалів

Зростаюча кількість індустріалізованих економік у всьому світі починає прагнути виробництва нових матеріалів, виготовлених переважно з полімерів, завдяки їхнім перевагам та ключовій ролі в концепції та моделі циркулярної економіки [1]. Незважаючи на це, відходи з небіорозкладних матеріалів з роками зросли через збільшення та постійне використання некомпостованих матеріалів та низьку матеріальну ефективність лінійної системи індустріалізації. Класифікація відходів визначається джерелами виробництва, а також рівнем шкоди для навколишнього середовища, тварин, здоров'я людини або людського життя [2]. Хоча утворення відходів призвело до низки екологічних проблем, управління відходами, з іншого боку, є цікавим шляхом до створення робочих місць. Зусилля багатьох країн, що розвиваються, зосереджені на відновленні ресурсів шляхом повторного використання та переробки матеріалів, щоб зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та мінімізувати тиск на природні ресурси.

На жаль, використання матеріалів на основі пластику та зростаюча перевага споживачів до небіорозкладних матеріалів стає серйозною проблемою для експертів-екологів. Через свій забруднювальний вплив, відходи, що утворюються з цих матеріалів, загрожують природним, ресурсам, таким як ґрунт, вода та повітря, тим самим підриваючи цілі та завдання циркулярної економіки. Повторне використання та переробка у промислових процесах можуть допомогти пом'якшити негативні наслідки утворення відходів та забезпечити основу для ініціатив сталого споживання [3]. Однак багато споживачів цієї продукції віддають перевагу використанню звалищ для багатоматеріальних продуктів (наприклад, вітрових, турбін, використаних

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

шин, сонячних панелей тощо) через високу вартість, пов'язану з переробкою, ці матеріали. Захоронення небіорозкладних продуктів на звалищах добре вкорінене та широко застосовується у всіх сферах промислового та побутового секторів. Розкладання відкладених матеріалів призводить до викидів небезпечних фільтратів та газів. В роботі [4] зазначено, що найбільше газів, що викидаються зі звалищ, – це метан та вуглекислий газ, тоді як фільтрат може потрапляти в ґрунтові або навіть поверхневі води через тріщини в облицюваннях та створювати проблему для водоносних горизонтів. Як наслідок, ці забруднювачі можуть загрожувати як якості довкілля, так і здоров'ю населення. Оскільки цілі сталого розвитку та скорочення кількості відкладень на звалищах продовжують вимагати більшої кількості дій завдяки цілеспрямованій політиці та прогресу досліджень, існує потреба в нових альтернативах для розробки матеріалів з відмінними характеристиками, що відповідають сучасним вимогам.

Використання композитів, армованих синтетичним волокном, в аерокосмічній, автомобільній та пакувальній промисловості є широким завдяки їхній дуже перспективній міцності, гнучкості, жорсткості та потенціалу для важливого та різноманітного спектру застосувань [5]. Для багатьох галузей промисловості композити були важливою сировиною у виробничих процесах, особливо для таких продуктів, як автомобілі, будівництво або будівельні матеріали. З широкого погляду, унікальність композитів показує, що вони містять щонайменше два мікроскопічно різні компоненти, які можна комбінувати для усунення деяких недоліків, які не обмежуються лише проблемами слабкості та сумісності. Незважаючи на цю привабливу перевагу, звичайні композити менш бажані для високоякісних застосувань через їх високу енергоємність. Ще одним особливим недоліком є те, що їх важко розібрати після закінчення фази використання [6]. Щоб уникнути цих недоліків, синтетичні волокна були замінені біоволокнами як композити. Цікаво, що екологічні проблеми, такі як утворення пластикових

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

відходів та дефіцит палива, а також зростаюча стурбованість людей, зосереджена на стратегіях зменшення вуглецевого сліду, спонукали людство переглянути споживання пластмас. Згідно зі статистикою, у світі щорічно виробляється понад 300 метричних тонн пластмас, що демонструє велику кількість відходів, що утворюються в секторі пластмас.

Тому нещодавні дослідження шукають можливі альтернативи за допомогою більш екологічних та стійких полімерів і матеріалів. Варто зазначити, що поява концепції циркулярної біоекономіки привернула значну увагу завдяки новій екологічній політиці. Таким чином, багато промислових побічних продуктів потребують вирішення за допомогою планів та політик сталого розвитку, щоб знайти їхнє можливе застосування.

Крохмаль, целюлоза та деревна біомаса, серед багатьох інших біосировинних матеріалів, добре зарекомендували себе як біополімери [7]. Вони значно сприяють зниженню вуглецевого сліду порівняно зі звичайними пластиками [8]. Крохмаль, целюлоза, альгінат та багаті на волокна матеріали, такі як льон, коноплі, сизаль, джут тощо, можуть бути частково поєднані з іншим матеріалом або змішані для утворення композитів. Унікальність кінцевого продукту привернула увагу з наукової та комерційної точок зору, і їх використання для нових застосувань зараз набирає обертів.

Поєднання натуральних волокон та матричного полімеру формують біокомпозити. Для створення матриці можуть бути використані біорозкладні або небіорозкладні полімери. В роботі [9], полімерні матричні біокомпозити складаються з натуральних (PLA, PHA, PCL) або синтетичних матричних матеріалів (термопластичних та термореактивних пластмас) у поєднанні з додаванням одного або кількох армуючих елементів, таких як вуглецеві волокна, скловолокна або натуральні волокна. Волокна надають матеріалу міцності, а смола утримує його разом, що забезпечує жорсткість виробу та захищає волокна від вологи. Вплив армування на полімерний композит був розглянутий у роботі авторів [10]. Автори зазначили, що композити з

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

полімерної матриці тваринного походження, білка та біохімічно армованих матеріалів мають механічну міцність, що робить їх потенційним матеріалом для каркасів та імплантатів у біомедичних застосуваннях, але порадили, що відповідні дослідження повинні зосередити свої зусилля на пошуку інших потенційних застосувань для композитів з полімерною матрицею. Співвідношення сторін та розмір волокон відіграють важливу роль у міцності композиту. Хоча інтеграція дрібних частинок у обробне обладнання є ефективною, низькі співвідношення сторін призводять до концентрації напружень, що призводить до нижчої міцності порівняно з чистим полімером [11]. Більше співвідношення сторін призводить до кращих механічних характеристик, оскільки навантаження передається ефективніше зі збільшенням співвідношення L/D. Біокомпозити, виготовлені з біополімерів та натуральних волокон, є дуже привабливими завдяки своїй здатності виконувати необхідні функції за нижчою ціною [12]. Вони біорозкладні та підлягають переробці, їх можна легко утилізувати після того, як вони виконали своє призначення, не впливаючи негативно на навколишнє середовище. Це неможливе у випадку синтетичних композитів, отриманих з викопного палива. Пластикові композити ефективно замінюються біокомпозитами [13].

Рослинні волокна, такі як луб'яні, листові та деревні, викликали інтерес багатьох вчених і розглядаються як армуючі компоненти. Вони містять целюлозу, лігнін, геміцелюлозу та пектин у різних кількостях [14]. Хімічний склад рослинних волокон також залежить від періоду росту, висоти стебла та ботанічної класифікації волокон. Коноплі, льон, кенаф та джут, які є компонентами луб'яного волокна, отримуються зі стебла рослини та широко використовуються для армування композитів завдяки їхній більшій довжині, а також високій міцності та жорсткості. Різні недеревні волокна (наприклад, льон, кенаф, сизаль та коноплі) також зараз комерційно використовуються в біокомпозитах пропорційно до поліпропілену для застосування в автомобільному секторі.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Волокна місцевих трав також привертають увагу вчених як армуючі волокна. Деякі з широкодоступних волокон - це волокна рисової, пшеничної або кукурудзяної соломи, які можна використовувати як дуже економічне армування для біокомпозитних матеріалів [15]. Низьке енергоспоживання, хороший вплив на сільське господарство та поглинання CO₂ – це деякі з переваг використання натуральних волокон у композитних матеріалах. Натуральні волокна підлягають переробці та біорозкладанню, що призвело до збільшення використання цих волокон у композитних армуючих застосуваннях. Натуральні волокна поглинають CO₂ під час росту, що зрештою зменшує їхній вуглецевий слід порівняно з волокнами на основі нафти. В роботі [16] провели порівняльний аналіз вуглецевого, екологічного та водного слідів композитів на основі поліпропілену (ПП), що містять волокна бавовни, джуту та кенафу. Їхні результати показали, що завдяки додаванню 30% бавовняних, джутових та кенафових волокон до поліпропіленової матриці вуглецевий слід зменшився на 3%, 18% та 18% відповідно. Тим не менш, джутові та кенафові волокна показали кращі результати, ніж скловолокно, для цих слідів. Ще однією перевагою натуральних волокон порівняно зі скловолокном є їхня відносно низька вартість. Питомий модуль натуральних волокон порівнянний з модулем скловолокна, що робить їх особливо цікавими в інженерних композитах. Заміна скловолокна натуральними волокнами при розробці каркаса люка на даху призвела до зниження ваги на 50% у Mercedes Benz [17].

Натуральне волокно визначає механічні характеристики композиту. Існує кілька факторів, які впливають на характеристики волокон, включаючи клімат та географічне розташування, де вони були зібрані. Щільність насіння, сорт культури, методи екстракції, подальша обробка тощо – це деякі інші фактори. Волокна, отримані з різних джерел, мають різні властивості. Як результат, не можна просто вибрати одне натуральне волокно над іншим, і вибір здебільшого визначається потребами застосування. Оскільки основною

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

галуззю застосування є конструкційне застосування, механічні властивості волокна є найважливішими параметрами, оскільки вони, безсумнівно, впливають на характеристики композиту.

Питомий модуль пружності, питома міцність, співвідношення сторін, видовження при розриві, вміст вологи та вартість є основними критеріями оцінки вибору волокон [18]. Використання безперервних волокон дозволяє створювати композити з хорошими структурними характеристиками для конструкційного застосування.

Однак, натуральні волокна не доступні в природі в безперервній формі, і зазвичай їх довжина становить від кількох міліметрів до 20...30 мм [19].

Натуральні волокна мають гідрофільну природу, тобто вони притягують молекули води. Гідрофільність натуральних волокон призводить до розшарування між волокном і полімерною матрицею, що знижує механічні характеристики отриманих композитів. Поганий міжфазний зв'язок призводить до явища висмикування волокна, що ще більше погіршує механічні властивості [20]. Температура термічної деградації натуральних волокон низька (близько 200 °C). Наявність восків на поверхнях волокон ускладнює досягнення хорошого зв'язку між волокном і матрицею.

Ці недоліки, які включають гідрофільність, поганий зв'язок і термічну нестабільність, можна подолати, піддаючи волокна фізичній та хімічній обробці.

1.2. Способи обробки природніх волокон

Якість композитів визначається низкою параметрів, включаючи адгезію волокна до матриці, довжину волокна, вміст волокна, обробку волокна та дисперсію волокна в матриці [21]. В результаті, за останні роки було досягнуто прогресу в розумінні поведінки матеріалів під впливом будь-якого з цих параметрів. Обробка біокомпозитів набрала обертів і все більше приваблює

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

численні внески від вчених. В роботі [22] визначено типи натуральних волокон, які можна розглядати як біокомпозити. Однак автори зазначили, що міжфазна адгезія між натуральними волокнами та матрицею через різні процеси обробки продовжуватиме бути найважливішим питанням з точки зору загальної продуктивності, оскільки вона визначає кінцеві характеристики композитів. Фізичні обробки, такі як плазмовий розряд та коронний розряд, покращують зв'язок між волокном та матрицею, не змінюючи хімічних характеристик волокон. Однак ці методи фізичної обробки впливають лише на поверхневі характеристики волокна. У той час як плазмовий розряд робить поверхню волокна шорсткою для покращення міжфазного зв'язку, коронний розряд, з іншого боку, призводить до окислення поверхні та покращує сумісність між волокном та матрицею [23]. Інші приклади методів фізичної обробки включають ультрафіолетове бомбардування, лазер та гамма-випромінювання. Хімічна обробка біокомпозитів дещо схожа на плазмовий розряд, але зазвичай вона здійснюється за допомогою хімічної реакції. Найчастіше в літературі згадуються методи хімічної обробки: обробка лугами (мерсеризація) [24] та ацетилювання. Тим не менш, у літературі широко описані хімічні обробки, такі як обробка силаном, обробка бензоїлюванням, малеїнованими зв'язуючими агентами, обробка перманганатом та обробка пероксидом. Обробка лугами порушує зв'язок Н-Н у структурі та, отже, збільшує шорсткість поверхні волокна, сприяючи кращому зчепленню між матрицею та волокнами. Крім того, воски, олії та лігнін, присутні на зовнішній поверхні волокна, змиваються, деполімеризуючи целюлозу, а короткі кристаліти оголюються завдяки цій обробці [25]. При обробці ацетилюванням ацетильна група вводиться в клітинну стінку волокон, замінюючи гідроксильну групу. Ацетильна група відштовхує молекули води, роблячи волокна гідрофобними. Гігроскопічність натуральних волокон може бути зменшена за допомогою обробки ацетилюванням. В результаті отримані композити мають підвищену розмірну стабільність [26].

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.3. Висновки і постановка задач досліджень

Розробка технологій формування полінаповнених біокомпозитних виробів є одним із найбільш актуальних напрямів розвитку сучасного матеріалознавства та полімерної інженерії. Зростання вимог до екологічної безпечності виробництва, раціонального використання природних ресурсів, зниження енерговитрат та створення матеріалів із прогнозованими експлуатаційними властивостями обумовлює активне впровадження біокомпозиційних матеріалів у різні галузі промисловості. Використання полімерних матриць у поєднанні з наповнювачами природного походження дозволяє отримувати матеріали з оптимальним співвідношенням міцності, маси, вартості та екологічних характеристик.

Установлено, що полінаповнені біокомпозити являють собою складні багатокомпонентні системи, структура та властивості яких формуються в результаті взаємодії полімерної матриці, дисперсних або волокнистих наповнювачів, поверхнево-активних речовин, модифікаторів і технологічних факторів переробки. Введення декількох типів наповнювачів дозволяє реалізувати комбінований ефект зміцнення, регулювати структуроутворення та забезпечувати покращення фізико-механічних, теплофізичних і технологічних характеристик готових виробів.

Серед найбільш поширених природних наповнювачів для створення біокомпозитів використовуються целюлозні волокна, деревне борошно, льон, конопля, джут, сизаль, рисове лушпиння, крохмаль, лігнін та інші рослинні компоненти. Використання таких матеріалів забезпечує часткове заміщення синтетичних компонентів, зменшення маси виробів та підвищення рівня екологічності. Водночас природні наповнювачі мають низку особливостей,

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

серед яких найбільш суттєвими є гігроскопічність, неоднорідність складу, обмежена термостійкість та недостатня сумісність із більшістю полімерних матриць.

Встановлено, що одним із визначальних факторів ефективності полінаповнених біокомпозитів є формування стабільної міжфазної взаємодії між компонентами системи. Недостатня адгезія між полімерною матрицею та природним наповнювачем призводить до погіршення механічних характеристик, нерівномірного розподілу напружень та виникнення структурних дефектів. Для усунення зазначених недоліків широко застосовуються різноманітні методи поверхневої модифікації наповнювачів, використання агентів сумісності, хімічна обробка поверхні, введення функціональних добавок та застосування наномодифікаторів.

Значний вплив на властивості полінаповнених біокомпозитів мають технологічні параметри їх формування. До основних факторів належать температура переробки, тривалість теплового впливу, швидкість перемішування, величина тиску, ступінь диспергування компонентів та режим охолодження виробів. Порушення оптимальних умов формування може призводити до термічної деструкції природних компонентів, виникнення внутрішніх дефектів та погіршення експлуатаційних характеристик матеріалу.

Аналіз існуючих технологій показав, що для виготовлення полінаповнених біокомпозитних виробів найбільш поширеними є методи компресійного пресування, лиття під тиском, екструзії, гарячого пресування, термоформування та формування у відкритих і закритих прес-формах. Кожен із зазначених методів має власні переваги та обмеження залежно від типу полімерної матриці, природи наповнювачів і вимог до кінцевих характеристик виробів. Серед них особливу увагу привертають технології пресування, які

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечують отримання матеріалів із більш щільною структурою, рівномірним розподілом компонентів та стабільними механічними характеристиками.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється використанню багатокомпонентного наповнення та комбінованого модифікування біокомпозитів. Поєднання природних волокон із мінеральними, органічними або нанорозмірними наповнювачами дозволяє компенсувати недоліки окремих компонентів і досягати синергетичного ефекту. Зокрема, використання наночастинок оксидів металів, наноглин, графенових структур або функціоналізованої целюлози сприяє покращенню міцності, теплостійкості та бар'єрних властивостей матеріалів.

Встановлено також, що перспективним напрямом розвитку технологій формування полінаповнених біокомпозитних виробів є використання біорозкладних полімерних матриць. Такі системи дозволяють створювати матеріали зі зменшеним негативним впливом на довкілля та забезпечують можливість повторної переробки або контрольованої деградації після завершення експлуатації. Найбільш перспективними в цьому напрямі є композиції на основі полілактиду, полігідроксиалканоатів, крохмальовмісних систем та інших біополімерів.

Незважаючи на значний прогрес у розробленні полінаповнених біокомпозитів, аналіз літератури показав наявність низки невирішених питань. Подальших досліджень потребують закономірності структуроутворення багатокомпонентних систем, механізми міжфазної взаємодії, оптимізація режимів формування та прогнозування довговічності матеріалів у реальних умовах експлуатації. Особливо актуальними залишаються питання

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

забезпечення стабільності властивостей біокомпозитів за умов підвищеної вологості та змінних температурних режимів.

Метою роботи є визначення технології формування та оптимального складу полінаповненої композиції для формування глютинових біокомпозитів конструкційного призначення.

Для досягнення мети необхідно виконати основні завдання:

- визначити оптимальний вміст природніх наповнювачів полінаповненої системи;
- визначити стійкість біокомпозитних матеріалів до впливу статичних навантажень;
- дослідити характер руйнування біокомпозитів під впливом статичного навантаження.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

Кістковий клей належить до групи природних білкових клеїв тваринного походження та є одним із найдавніших клеючих матеріалів, що використовуються людиною. Незважаючи на активний розвиток синтетичних полімерних клеїв, кістковий клей і сьогодні зберігає практичне значення завдяки екологічності, доступності сировини, добрим адгезійним властивостям та здатності формувати міцні з'єднання з пористими матеріалами. Найбільш широке застосування кістковий клей знайшов у деревообробній промисловості, виробництві меблів, реставраційних роботах, будівельній сфері та окремих напрямках виготовлення композиційних матеріалів.

Кістковий клей являє собою продукт переробки органічної сировини тваринного походження, основу якої складає колаген – природний волокнистий білок, що входить до складу кісткової тканини, сухожиль та сполучних тканин тварин. У процесі спеціальної обробки колаген зазнає часткового гідролізу та переходить у водорозчинну форму – глютин, який і забезпечує клеючі властивості матеріалу.

Основним способом отримання кісткового клею є гідротермічна переробка попередньо очищеної кісткової сировини. Виробничий процес починається зі збору та підготовки кісток, які очищають від жирових залишків, механічних домішок та органічних включень. Після очищення сировину піддають подрібненню для збільшення площі контакту та підвищення ефективності подальшої екстракції.

Наступним етапом є знежирення кісткової маси, яке проводять гарячою водою, органічними розчинниками або іншими технологічними методами.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Після цього здійснюється термічна обробка у водному середовищі за контрольованої температури. У результаті часткового руйнування структури колагену утворюється розчин глютину, який після очищення концентрують шляхом випарювання та висушують до отримання готового клею у вигляді гранул, пластин або порошку.

За зовнішнім виглядом кістковий клей являє собою тверду речовину світло-жовтого, коричневого або бурштинового кольору (рисунок 2.1) [27]. Перед використанням його переводять у робочий стан шляхом набухання у воді та подальшого нагрівання до температури приблизно 50...70 °С. У цьому стані формується в'язкий клеючий розчин, придатний для нанесення на поверхню матеріалів.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд гранул глютину

Основною властивістю кісткового клею є здатність створювати достатньо міцне адгезійне з'єднання за рахунок проникнення клею в пори матеріалу та формування міжмолекулярної взаємодії після висихання. Найкращі результати кістковий клей демонструє при склеюванні деревини, картону, паперу, тканин, шкіри та інших пористих матеріалів.

До важливих фізико-хімічних властивостей кісткового клею належать його водорозчинність, здатність до утворення гелевої структури при охолодженні, добра адгезія до природних матеріалів та біологічна сумісність. Готові клеєві шви характеризуються достатньою механічною міцністю за нормальних умов експлуатації та відносно високою еластичністю.

Кістковий клей також характеризується задовільними реологічними властивостями. В'язкість клеєвого розчину залежить від концентрації, температури та ступеня гідролізу білкових компонентів. Одним із важливих показників є желатинізаційна здатність, яка визначає швидкість утворення структурованого клеєвого шару після нанесення.

До основних переваг кісткового клею належать природне походження, екологічна безпечність, доступність сировини, простота отримання та переробки, добра адгезія до багатьох природних матеріалів і можливість відновлення клейового з'єднання шляхом повторного нагрівання або зволоження. Завдяки цим властивостям кістковий клей широко використовується в реставраційній практиці, де важливим є збереження автентичності матеріалів та можливість подальшого демонтажу з'єднань без пошкодження виробу.

Важливою перевагою є також його здатність до біологічного розкладання та відсутність токсичних продуктів полімеризації, що робить кістковий клей перспективним компонентом екологічно орієнтованих матеріалів і технологій.

Разом із тим кістковий клей має певні недоліки, які обмежують сферу його застосування. Насамперед це низька водостійкість, оскільки при підвищеній вологості клейовий шов може втрачати міцність. Крім того, білкова природа клею обумовлює його чутливість до біологічного руйнування під дією мікроорганізмів. Недоліками також є необхідність попереднього нагрівання перед використанням, обмежена теплостійкість та порівняно нижча довговічність порівняно із сучасними синтетичними клеями.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порошок на основі подрібнених шкаралуп горіха є природним дисперсним наповнювачем органічного походження, який останніми роками набуває широкого застосування у виробництві композиційних матеріалів, полімерних систем, будівельних сумішей та екологічно орієнтованих виробів. Використання такого наповнювача відповідає сучасним тенденціям ресурсозбереження та повторного використання відходів агропромислового комплексу, оскільки дозволяє залучати вторинну рослинну сировину для створення матеріалів із покращеними властивостями.

Шкаралупа горіха являє собою природний лігноцелюлозний матеріал, який складається переважно з целюлози, геміцелюлози та лігніну. Залежно від виду горіха (волоський горіх, фундук, мигдаль та інші) співвідношення компонентів може змінюватися, однак у середньому вміст лігніну становить близько 35...50 %, целюлози – 20...35 %, геміцелюлози – 15...30 %. Також у складі можуть міститися незначні кількості екстрактивних речовин, мінеральних компонентів та органічних сполук природного походження. Завдяки такому складу матеріал характеризується достатньою жорсткістю, малою густиною та високою стабільністю форми.

Отримання порошку зі шкаралуп горіха передбачає кілька послідовних технологічних етапів. На першому етапі проводиться очищення сировини від залишків органічних домішок і механічних забруднень. Далі шкаралупу висушують до необхідного рівня вологості, що забезпечує стабільність подальшої механічної обробки. Після сушіння матеріал подрібнюють за допомогою дробарок, кульових млинів або інших подрібнювальних установок до отримання частинок необхідної дисперсності. За потреби порошок додатково просіюють для забезпечення однорідного гранулометричного складу та можуть піддавати поверхневій модифікації для покращення сумісності з полімерними матрицями.

Порошок на основі подрібнених шкаралуп горіха характеризується низькою густиною, відносно високою питомою жорсткістю та доброю

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

технологічністю при введенні до складу композиційних матеріалів. Розмір частинок може змінюватися в широкому діапазоні – від декількох мікрометрів до сотень мікрометрів залежно від технології отримання та сфери застосування (рисунок 2.2). Важливою властивістю є розвинена поверхня частинок, що сприяє ефективній взаємодії з полімерними зв'язувальними.



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд порошку зі шкаралупи горіха

Серед основних переваг порошку зі шкаралуп горіха слід відзначити природне походження, екологічну безпечність, доступність сировини та низьку собівартість. Використання такого наповнювача дозволяє зменшувати витрати полімерного зв'язувального, знижувати масу композиційних матеріалів та покращувати окремі фізико-механічні характеристики виробів. У багатьох випадках введення порошку сприяє підвищенню жорсткості, зменшенню усадки та покращенню стабільності геометричних розмірів композитів.

Водночас використання природного наповнювача має певні особливості. Через наявність гідроксильних груп лігноцелюозна структура характеризується гігроскопічністю, що може впливати на водопоглинання

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

композиційних матеріалів та адгезійну взаємодію з полімерною матрицею. Для усунення цього недоліку часто застосовують попередню хімічну або фізико-хімічну модифікацію поверхні частинок, використання агентів сумісності або спеціальних функціональних добавок.

Основними напрямками застосування порошку зі шкаралуп горіха є виробництво полімерних композиційних матеріалів, біокомпозитів, декоративних покриттів, пресованих виробів, будівельних композицій та екологічно орієнтованих матеріалів. У полімерних системах його використовують як функціональний наповнювач для епоксидних, поліефірних, поліуретанових і термопластичних композицій. Крім того, порошок застосовують у виробництві абразивних матеріалів, фільтрувальних середовищ, сорбентів і декоративно-оздоблювальних виробів.

Подрібнені стебла дикорослих трав є природним рослинним наповнювачем органічного походження, який останніми роками активно досліджується як компонент композиційних матеріалів, біокомпозитів, будівельних виробів та екологічно орієнтованих технологій. Використання рослинної сировини як наповнювача дозволяє розширити ресурсну базу виробництва, зменшити споживання синтетичних компонентів та забезпечити більш раціональне використання природних ресурсів [28].

Стебла дикорослих трав являють собою лігноцелюлозний матеріал, основу якого складають целюлоза, геміцелюлоза та лігнін. Залежно від виду рослин, кліматичних умов росту та ступеня зрілості вміст компонентів може змінюватися. У середньому масова частка целюлози становить 30...45 %, геміцелюлози – 20...35 %, лігніну – 10...25 %, також присутні водорозчинні органічні сполуки, воски, мінеральні речовини та природні пігменти. Такий склад забезпечує відносно невелику густину, достатню механічну міцність та добрі теплоізоляційні характеристики матеріалу.

Отримання подрібнених стебел дикорослих трав передбачає декілька послідовних технологічних етапів. Спочатку проводиться збір рослинної

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

сировини та її очищення від сторонніх домішок, ґрунту, листя та інших органічних включень. Після цього матеріал висушують до досягнення стабільної вологості, що забезпечує якісне подальше подрібнення та знижує ризик біологічного руйнування. Висушені стебла подають на механічне подрібнення за допомогою ножових дробарок, молоткових млинів або інших подрібнювальних установок. Для отримання більш однорідного гранулометричного складу матеріал може додатково просіюватися та фракціонуватися.

Подрібнені стебла характеризуються невеликою густиною, яка зазвичай перебуває в межах $0,1...0,4 \text{ г/см}^3$ у насипному стані, що дозволяє використовувати їх для створення легких композиційних матеріалів. Частинки мають розвинену поверхню та волокнисту структуру, що сприяє механічному закріпленню в полімерних або мінеральних матрицях (рисунок 2.3). Завдяки пористій будові рослинний матеріал має добрі тепло- та звукоізоляційні властивості.



Рисунок 2.3 – Подрібнені стебла дикорослих трав

2.2. Методи дослідження механічних характеристик

Визначення міцності на стискання біокомпозитних зразків виконали за класичною методикою ASTM D695. В даному випадку циліндричні зразки висотою 30 мм і діаметром 20 мм (рисунок 2.4) стискають з швидкістю наближення нижньої траверси 2 мм/хв та визначають руйнівне навантаження.

Межу міцності при стисненні розраховано за формулою:

$$\sigma_{cm} = \frac{P}{S},$$

де P – максимальне навантаження, яке витримує зразок до руйнування, Н;

S – площа поперечного перерізу циліндричного зразка, м².



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд зразка для визначення міцності на стискання

Дослідження макроструктури біокомпозитних зразків проводили з використанням оптичних мікроскопів типу МБС-9 із збільшенням в діапазоні 30...50 раз.

2.3. Технологія формування біокомпозитних зразків

Формування біокомпозитних зразків полягає в отриманні глютинового розчину та підготовці наповнювача.

Глютиновий розчин отримують в результаті розчинення дозованої кількості гранул кісткового клею у воді. Для цього ваговим методом визначають необхідну кількість води на гранул клею, після чого компоненти поміщають у герметичну посудину і нагрівають до температури 50°C з періодичним перемішування з метою отримання однорідного розчину (рисунок 2.5).

Шкаралупи горіха подрібнюють механічно в лабораторному млині (рисунок 2.6) та проводять класифікацію частинок за допомогою набору сит. В результаті в роботі використано фракцію порошку розміром 0,04...0,05 мм. Перед використанням порошок піддають просушуванню за температури 110°C протягом 1 год з метою видалення вологи і створення однакових умов для формування біокомпозитних зразків.

Стебла дикорослих трав сушать до максимальної втрати вологи в стеблах, після чого подрібнюють в млині молоткового типу. Отримані частинки стебел автоматично відділяються сіткою в млині, а довші стебла далі подрібнюються до розміру 7...8 мм. Перед використанням частинки стебел також підсушують за температури 110°C протягом 1 год для видалення вологи перед змішуванням компонентів.

Залежно від співвідношення суміші, що складається з частинок дикорослих трав та порошку шкаралуп горіха, компоненти дозують ваговим методом та змішують спочатку між собою, а потім з розчином глютину. Необхідно врахувати, що розчин глютину на момент дозування потрібно зберігати в термостаті, оскільки після охолодження його в'язкість зростає, що ускладнює або унеможлиблює процес дозування та змішування в'язучого з наповнювачем.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Змішування проводять механічним способом за допомогою лабораторного змішувача з високою частотою обертання лопатей, що дозволяє отримати однорідну суміш.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд розчину глютину



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд механічного змішувача

Отриману композицію поміщають в порожнину матриці прес-форми (рисунок 2.7) закривають пуансонами і піддають стисненню. Для уникнення пружної післядії пуансони фіксують.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд прес-форми для отримання циліндричних зразків

Термічну обробку сформованих зразків проводять в сушильній шафі згідно визначеного режиму (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Камера сушильної шафи

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

РОЗДІЛ 3

ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІНАПОВНЕНИХ БІОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1. Дослідження міцності на стискання біокомпозитів

Перша серія експериментальних досліджень була спрямована на визначення межі міцності на стискання біокомпозитних зразків, для яких після вилучення з прес-форми не проводили додаткової термічної обробки. Особливістю дослідження було варіювання ступеня попереднього сушіння композиції перед формуванням. Сушіння здійснювали за температури 50 °С протягом 20...30 хв залежно від поставлених технологічних умов. Ступінь видалення вологи змінювали в діапазоні від 0 до 30 %.

Установлено, що межа міцності на стискання біокомпозитних матеріалів без попереднього сушіння композиції ($W = 0\%$), які містять подрібнені стебла дикорослих трав у співвідношенні до порошку шкаралуп горіха від 0 до 100 %, перебуває в межах 4,0...5,6 МПа (рисунок 3.1). При цьому збільшення вмісту частинок стебел не забезпечує підвищення міцності матеріалу.

Отримані результати можна пояснити особливостями формування структури біокомпозитів за надлишкового вмісту вологи. Вода в композиції виконує функцію розчинника глютинового зв'язувального та забезпечує його технологічну рухливість на етапі змішування компонентів. Однак під час термічного формування за температури 140 °С відбувається інтенсивне випаровування вологи безпосередньо в об'ємі матеріалу, що супроводжується локальним руйнуванням сформованих міжмолекулярних взаємодій між компонентами системи. У результаті утворюється неоднорідна дефектна структура з підвищеною кількістю пор, порожнин і зон неповного контакту між матрицею та наповнювачем, що негативно впливає на механічні характеристики біокомпозитів.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

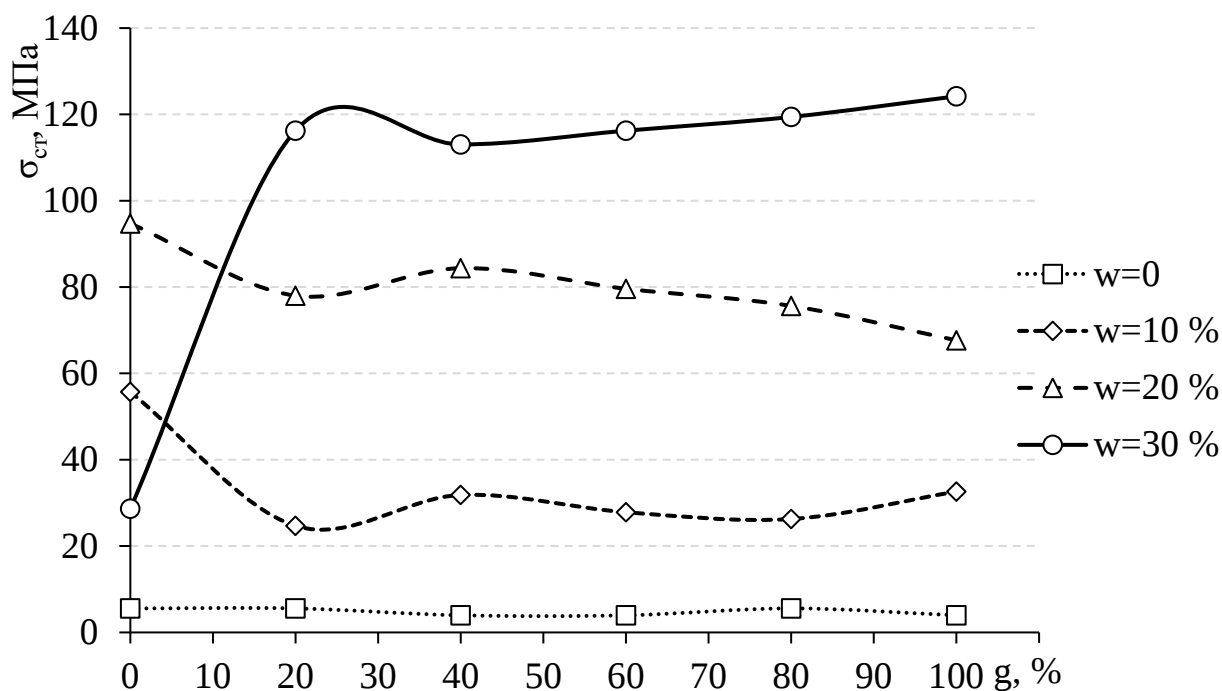


Рисунок 3.1 – Вплив вмісту подрібнених стебел дикорослих трав на міцність на стискання біокомпозитів залежно від втрати води (W) з наступною термічною обробкою ТО1 (140° С протягом 90 хв)

Під час дослідження біокомпозитів, сформованих із попередньо підсушеної композиції до ступеня видалення води $W = 10\%$, встановлено суттєве підвищення межі міцності при стисненні. Зокрема, для матеріалу, що містить 100 % порошку шкаралуп горіха та не містить частинок стебел, межа міцності досягала 58 МПа, що приблизно у 11...12 разів перевищує значення для аналогічних зразків без попереднього сушіння.

Таке зростання механічних характеристик пояснюється тим, що попередня термічна обробка композиції забезпечує видалення надлишкової води ще до етапу пресування. Це сприяє більш рівномірному формуванню глютинової матриці, зменшенню кількості внутрішніх дефектів та підвищенню ефективності міжфазної взаємодії між зв'язувальним і частинками наповнювача.

Разом із тим встановлено, що зі збільшенням частки подрібнених стебел дикорослих трав та відповідним зменшенням вмісту порошку шкаралуп горіха відбувається зниження межі міцності на стискання. Для композицій із вмістом частинок стебел від 10 до 100 % значення міцності перебувають у межах 25...33 МПа, що приблизно на 75 % нижче порівняно із зразками, наповненими виключно порошком шкаралуп горіха.

Зменшення міцності можна пояснити особливостями поглинання та утримання вологи різними типами наповнювачів. Порошок шкаралуп горіха має більш компакту та відносно ізотропну структуру частинок, тоді як частинки стебел характеризуються волокнистою будовою та розвиненою капілярною системою. Унаслідок цього вони здатні акумулювати більшу кількість вологи та повільніше її віддавати під час сушіння. Наявність залишкової вологи у волокнистому наповнювачі призводить до локального пороутворення та погіршення адгезійної взаємодії між компонентами композиції.

Подальше збільшення ступеня попереднього сушіння композиції до $W = 20 \%$ забезпечило додаткове підвищення міцності біокомпозитів. Значення межі міцності на стискання перевищували показники для композицій із сушінням $W = 10 \%$ на 62–68 %. Це свідчить про те, що оптимізація вологості композиції перед формуванням є одним із визначальних факторів отримання матеріалу зі щільною структурою та мінімальною кількістю макро- і мікродефектів.

Водночас подальше збільшення ступеня видалення вологи до $W = 30 \%$ не забезпечує подальшого підвищення міцності для всіх типів композицій. Для біокомпозитів, що містять виключно порошок шкаралуп горіха, межа міцності знижується до 29 МПа. Імовірно, надмірне видалення вологи призводить до передчасного переходу глютинового зв'язувального у високов'язкий або частково склоподібний стан ще до завершення структуроутворення.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

За таких умов зменшується рухливість макромолекул зв'язувального та обмежується формування достатньої кількості фізичних і хімічних контактів між частинками наповнювача. Оскільки частинки порошку шкаралуп горіха мають переважно дисперсну форму та розподілені відносно рівномірно в об'ємі композиції, недостатній розвиток міжчастинкових зв'язків спричиняє локальні зміщення частинок під дією стискального навантаження та крихке руйнування структури.

На відміну від цього, збільшення вмісту частинок стебел у композиції за ступеня сушіння $W = 30\%$ сприяє суттєвому підвищенню межі міцності при стисненні до максимальних значень 115...123 МПа.

Такий ефект пояснюється армувальною дією волокнистих частинок стебел. Їх дискретна волокниста форма забезпечує формування просторово орієнтованої структури з численними зонами механічного зачеплення між компонентами системи. У результаті обмежується переміщення макромолекул глютинової матриці та зростає опір деформації під дією статичного навантаження. Крім того, волокнистий наповнювач сприяє перерозподілу напружень у структурі композиту та зменшенню ймовірності локального руйнування, що забезпечує досягнення максимальних значень міцності при стисненні.

Наступним етапом експериментальних досліджень було проведення додаткової термічної обробки (ТО2) сформованих біокомпозитних матеріалів з метою завершення процесів видалення залишкової вологи та стабілізації сформованої структури матеріалу після пресування.

Установлено, що додаткова термічна обробка ТО2 позитивно впливає на механічні характеристики біокомпозитів незалежно від попереднього ступеня сушіння композиції. Найбільш виражений ефект зафіксовано для матеріалів, композиції яких перед формуванням не піддавали попередній термічній обробці (ТО0). У цьому випадку межа міцності на стискання зростає у 2,6...2,8

раза порівняно зі зразками без додаткової термічної обробки та становить 10,5...15,5 МПа (рисунок 3.2).

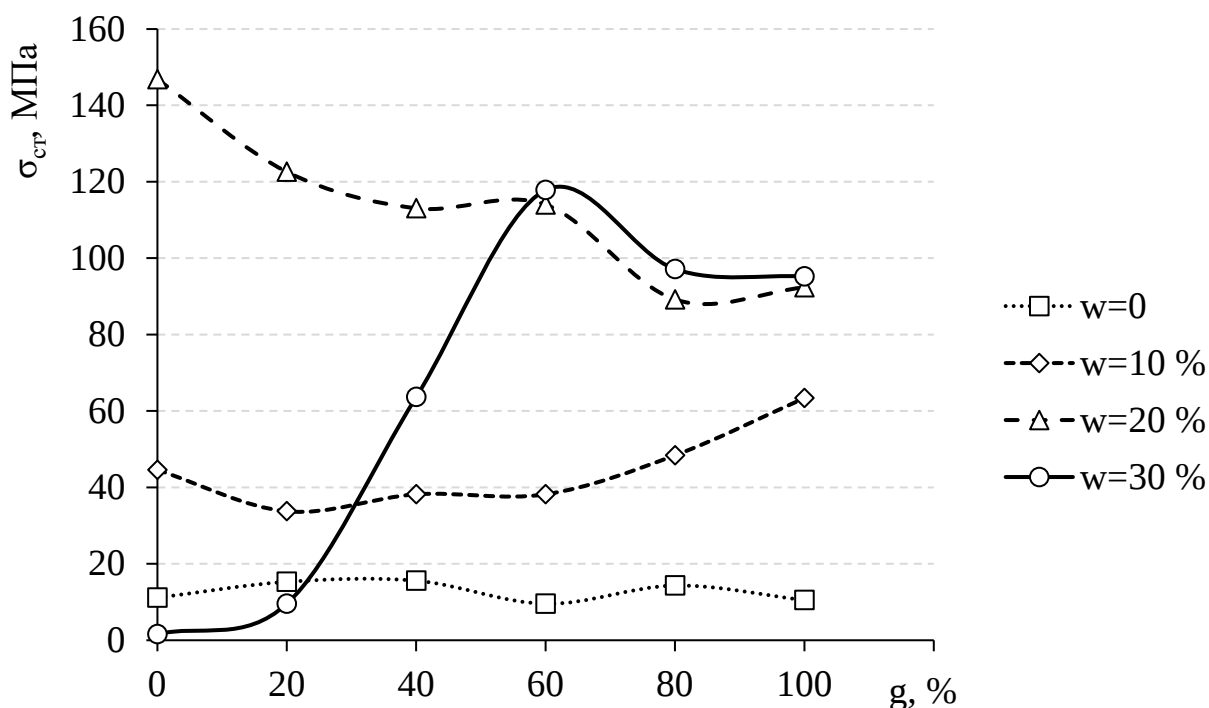


Рисунок 3.2 – Вплив вмісту подрібнених стебел дикорослих трав на міцність на стискання біокомпозитів залежно від втрати вологи (W) з наступною термічною обробкою ТО1 (140° С протягом 90 хв) + ТО2 (50° С протягом 8 год)

Отримані результати пояснюються тим, що після завершення процесу пресування в структурі біокомпозиту залишається певна кількість зв'язаної та капілярної вологи, яка перешкоджає завершенню структуроутворення глютинового в'язучого. Проведення додаткової термічної обробки забезпечує поступове видалення залишкової вологи без інтенсивного пароутворення всередині матеріалу, що сприяє ущільненню структури, збільшенню площі міжфазного контакту та формуванню більшої кількості фізико-хімічних взаємодій між компонентами системи.

Для біокомпозитів, композиції яких перед формуванням підсушували до ступеня видалення вологи $W = 10\%$, межа міцності на стискання після

проведення ТО2 підвищується до 40...60 МПа. Найбільше зростання механічних характеристик зафіксовано для матеріалів із вмістом частинок стебел в межах 20...60 %, для яких приріст міцності становить близько 25 % порівняно зі зразками без додаткової термічної обробки.

Для біокомпозитів із підвищеним вмістом частинок стебел (80...100 %) додаткова термічна обробка забезпечує ще більш виражений ефект – межа міцності на стискання зростає на 40...43 % відносно аналогічних композицій без ТО2. Такий результат можна пояснити особливостями волокнистої структури стебел, яка здатна утримувати підвищену кількість зв'язаної води. Додаткова термічна обробка забезпечує ефективніше її видалення та покращує контакт між поверхнею волокон і глютиновою матрицею.

Найвищі значення межі міцності при стисненні встановлено для біокомпозитів, композиції яких попередньо підсушували до ступеня втрати води $W = 20\%$. Максимальне значення характеристики становить 147 МПа та досягається для системи, що містить 100 % порошок шкаралупи горіха як наповнювач.

Імовірно, за такого режиму сушіння та подальшої термічної обробки формується найбільш збалансований структурний стан композиції, коли забезпечується достатня рухливість глютинового в'язучого для змочування поверхні наповнювача та одночасно мінімізується утворення дефектів, пов'язаних із випаровуванням надлишкової води. Це сприяє формуванню більш однорідної структури з високою щільністю міжмолекулярних і міжфазних взаємодій.

При збільшенні вмісту частинок стебел відбувається поступове зниження межі міцності на стискання. Такий ефект пояснюється неоднорідністю структури волокнистого наповнювача, який характеризується різною довжиною, товщиною та просторовим розташуванням дискретних волокон. Це ускладнює рівномірний розподіл в'язучого та призводить до локальної концентрації напружень під час навантаження.

Для біокомпозитів із вмістом частинок стебел 0...20 %, композиції яких підсушували до ступеня видалення води $W = 30$ %, зафіксовано найнижчі значення межі міцності при стисненні – у межах 5...10 МПа.

Зниження міцності в цьому випадку пов'язане з надмірним видаленням води на стадії підготовки композиції. Оскільки вода забезпечує необхідний рівень пластичності та технологічної рухливості глютинового в'язучого, її дефіцит призводить до істотного зростання в'язкості системи та погіршення змочування поверхні наповнювача. Унаслідок цього зменшується площа міжфазного контакту та кількість сформованих фізико-хімічних зв'язків, що негативно впливає на механічні характеристики матеріалу.

Разом із тим зі збільшенням вмісту частинок стебел в композиції за ступеня сушіння $W = 30$ % спостерігається поступове підвищення межі міцності на стискання. Такий ефект обумовлений формуванням просторово армованої структури, у якій дискретні волокна частково орієнтуються в різних напрямках і створюють додатковий каркас у структурі матеріалу.

У результаті відбувається більш рівномірний перерозподіл внутрішніх напружень під час дії стискального навантаження, обмежується розвиток локальних деформацій та підвищується загальна стійкість біокомпозитної системи до руйнування.

3.2. Аналіз характеру руйнування біокомпозитних зразків

Під час випробування на стиск встановлено, що циліндричні зразки біокомпозитів, які містять 100 % порошку шкаралуп горіха та були сформовані без попереднього сушіння композиції за температури 50 °С, деформуються з утворенням характерної бочкоподібної форми (рисунк 3.3, а).

Такий характер деформування свідчить про переважання пластичного механізму руйнування матеріалу. Його можна пояснити підвищеним залишковим вмістом води в глютиновій матриці після формування. Вода у

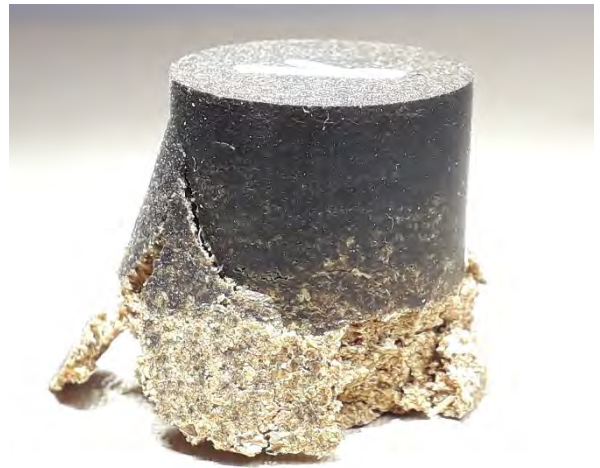
					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

цьому випадку виконує функцію пластифікатора біополімерної матриці, підвищуючи рухливість макромолекулярних ланцюгів глютину та знижуючи жорсткість композиційної системи. За дії стискального навантаження це сприяє розвитку значних поперечних деформацій без утворення локалізованих зон крихкого руйнування, що проявляється у зміні геометричної форми зразка.

Попереднє сушіння композиції до ступеня видалення вологи $W = 10\%$ суттєво змінює характер деформування біокомпозиту. У цьому випадку спостерігається підвищення опору матеріалу до стискального навантаження та перехід від переважно пластичної деформації до локалізованого руйнування зразка в нижній частині (рисунк 3.3, б).



а



б

Рисунок 3.3 – Біокомпозити з вмістом 100 % порошку:

а – $W = 0\%$; б – $W = 10\%$

Імовірною причиною такого характеру руйнування є нерівномірний розподіл залишкової вологи в об'ємі композиції під час формування. Через часткову негерметичність прес-форми в зоні торців відбувалося інтенсивніше видалення вологи, що призвело до локального підвищення жорсткості глютинової матриці у приповерхневих шарах. Унаслідок цього під час навантаження виникає нерівномірний розподіл напружень та концентрація деформацій у нижній частині зразка, де й відбувається початкове руйнування.

Для біокомпозитів, що містять 100 % частинок стебел та були сформовані без попередньої термічної обробки композиції, під час випробувань також спостерігається пластичне деформування з утворенням бочкоподібної форми (рисунок 3.4, а). При цьому ступінь деформації є більш вираженим порівняно зі зразками, наповненими порошком шкаралуп горіха.

Зазначений ефект пов'язаний із особливостями волокнистої структури частинок стебел, які здатні утримувати більшу кількість зв'язаної та капілярної води. Наявність додаткової води сприяє підвищенню пластичності глютинової матриці та зменшенню її опору переміщенню макромолекул під навантаженням. У результаті матеріал демонструє підвищену здатність до об'ємного деформування без формування виражених тріщин руйнування.

Після попереднього сушіння композиції до ступеня видалення води $W = 10\%$ характер руйнування біокомпозитів із вмістом 100 % частинок стебел змінюється. Під дією статичного навантаження зразки демонструють лише незначну пластичну деформацію без утворення магістральних тріщин та без повної втрати цілісності структури (рисунок 3.4, б).



а



б

Рисунок 3.4 – Біокомпозити з вмістом 100 % частинок стебел:

а – $W = 0\%$; б – $W = 10\%$

ВИСНОВКИ

Максимальну міцність на стискання (147 МПа) мають біокомпозити з втратою вологи (20 %) за умови наповнення порошком шкаралупи горіха в кількості 100 %, що зумовлено формуванням однорідної структури біокомпозиту.

Високі та стабільні значення міцності на стискання мають біокомпозити в широкому інтервалі співвідношень наповнювачів різного гранулометричного складу за умови видалення вологи в кількості 30% та термічної обробки ТО1 (140° С протягом 90 хв). Це пов'язано з оптимальним вмістом вологи, яка підвищує змочуваність в'язучого і утворення додаткових хімічних зв'язків.

Механічне змішування суміші забезпечує формування біокомпозиту з хаотичним розташуванням частинок стебел в різних напрямках, що є основною перешкодою до зміщення макромолекул глютинової матриці під час статичних навантажень.

Використання попереднього підсушування композиції забезпечує підвищення жорсткості скелету макромолекул амінокислот за одночасного формування значної кількості хімічних зв'язків між компонентами біокомпозитного матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Korniejenko K., Kozub B., Bak A., Balamurugan P., Uthayakumar M., Furtos G. Tackling the Circular Economy Challenges—Composites Recycling: Used Tyres, Wind Turbine Blades, and Solar Panels. *J. Compos. Sci.*. 2021. Vol. 5. P. 243.
2. Ryłko-Polak I., Komala W., Białowiec A. The Reuse of Biomass and Industrial Waste in Biocomposite Construction Materials for Decreasing Natural Resource Use and Mitigating the Environmental Impact of the Construction Industry: A Review. *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 4078.
3. Ginga C.P., Ongpeng J.M.C., Daly M.K.M. Circular Economy on Construction and Demolition Waste: A Literature Review on Material Recovery and Production. *Materials*. 2020. Vol. 13. P. 2970.
4. Danthurebandara M., Passel S., Nelen D., Tielemans Y., Van Acker K. Environmental and Socio-Economic Impacts of Landfills. *Linnaeus Eco-Tech*. 2012. Vol. 2012. P. 40–52.
5. Rajak D.K., Pagar D.D., Kumar R., Pruncu C.I. Recent Progress of Reinforcement Materials: A Comprehensive Overview of Composite Materials. *J. Mater. Res. Technol.*. 2019. Vol. 8. P. 6354–6374.
6. Chandramohan D., Marimuthu K. A Review on Natural Fibers. *Int. J. Res. Rev. Appl. Sci.*. 2011. Vol. 8. P. 194–206.
7. Falua K.J., Pokharel A., Babaei-Ghazvini A., Ai Y., Acharya B. Valorization of Starch to Biobased Materials: A Review. *Polymers*. 2022. Vol. 14. P. 2215.
8. Dolza C., Fages E., Gonga E., Gomez-Caturla J., Balart R., Quiles-Carrillo L. Development and Characterization of Environmentally Friendly Wood Plastic Composites from Biobased Polyethylene and Short Natural Fibers Processed by Injection Moulding. *Polymers*. 2021. Vol. 13. P. 1692.

9. Sharma A.K., Bhandari R., Aherwar A., Rimaškauskienė R. Matrix Materials Used in Composites: A Comprehensive Study. Mater. Today Proc.. 2020. Vol. 21. P. 1559–1562.

10. Das Lala S., Deoghare A.B., Chatterjee S. Effect of Reinforcements on Polymer Matrix Bio-Composites – an Overview. Sci. Eng. Compos. Mater.. 2018. Vol. 25. P. 1039–1058.

11. Gamstedt E.K., Nygård P., Lindström M. Transfer of Knowledge from Papermaking to Manufacture of Composite Materials. In: Proc. 3rd Wood Fibre Polymer Composites Int. Symp.. Bordeaux, France, 26–27 March 2007. Vol. 12.

12. Satyanarayana K.G., Arizaga G.G.C., Wypych F. Biodegradable Composites Based on Lignocellulosic Fibers–An Overview. Prog. Polym. Sci.. 2009. Vol. 34. P. 982–1021.

13. Drzal L., Mohanty A., Misra M. Bio-Composite Materials as Alternatives to Petroleum-Based Composites for Automotive Applications. Magnesium. 2001. Vol. 40. P. 1–3.

14. Sorieul M., Dickson A., Hill S.J., Pearson H. Plant Fibre: Molecular Structure and Biomechanical Properties, of a Complex Living Material, Influencing Its Deconstruction towards a Biobased Composite. Materials. 2016. Vol. 9. P. 618.

15. Aladejana J., Wu Z., Fan M., Xie Y. Key Advances in Development of Straw Fibre Bio-Composite Boards: An Overview. Mater. Res. Express. 2020. Vol. 7. P. 012005.

16. Korol J., Hejna A., Burchart-Korol D., Wachowicz J. Comparative Analysis of Carbon, Ecological, and Water Footprints of Polypropylene-Based Composites Filled with Cotton, Jute and Kenaf Fibers. Materials. 2020. Vol. 13. P. 3541.

17. Ramamoorthy S.K., Skrifvars M., Persson A. A Review of Natural Fibers Used in Biocomposites: Plant, Animal and Regenerated Cellulose Fibers. Polym. Rev.. 2015. Vol. 55. P. 107–162.

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Mahajan A., Binaz V., Singh I., Arora N. Selection of Natural Fiber for Sustainable Composites Using Hybrid Multi Criteria Decision Making Techniques. Compos. Part C Open Access. 2022. Vol. 7. P. 100224.

19. Staiger M.P., Tucker N. Natural-Fibre Composites in Structural Applications. In: Pickering K.L. (Ed.). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Sawston: Woodhead Publishing, 2008. P. 269–300. ISBN 978-1-84569-267-4.

20. Khan A., Rangappa S.M., Siengchin S., Asiri A.M. Biobased Composites: Processing, Characterization, Properties, and Applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2021.

21. Adeniyi A.G., Onifade D.V., Ighalo J.O., Adeoye A.S. A Review of Coir Fiber Reinforced Polymer Composites. Compos. Part B Eng.. 2019. Vol. 176. P. 107305.

22. Khan M.Z.R., Srivastava S.K., Gupta M.K. A State-of-the-Art Review on Particulate Wood Polymer Composites: Processing, Properties and Applications. Polym. Test.. 2020. Vol. 89. P. 106721.

23. Ragoubi M., George B., Molina S., Bienaimé D., Merlin A., Hiver J.-M., Dahoun A. Effect of Corona Discharge Treatment on Mechanical and Thermal Properties of Composites Based on Miscanthus Fibres and Polylactic Acid or Polypropylene Matrix. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.. 2012. Vol. 43. P. 675–685.

24. Abdullah N.S.E., Salim N., Roslan R. Investigation on the Effect of Alkaline Treatment on Seaweed/Polypropylene (SW/PP) Blend Composites. Mater. Today Proc.. 2022. Vol. 51. P. 1362–1366.

25. Li X., Tabil L.G., Panigrahi S. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. J. Polym. Environ.. 2007. Vol. 15. P. 25–33.

26. Sabri M.N.I.M., Bakar M.B.A., Masri M.N., Mohamed M., Noriman N.Z., Dahham O.S., Umar M.U. Effect of Chemical Treatment on Mechanical and

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Physical Properties of Non-Woven Kenaf Fiber Mat Reinforced Polypropylene Biocomposites. AIP Conf. Proc.. 2020. Vol. 2213. P. 20262.

27. Властивості кісткового клею [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Animal_glue

28. Властивості стебел дикорослих трав [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Plant_stem

					БР 0926.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42