

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів технологій та гостиності
Кафедра матеріалознавства**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**РОЗРОБКА ВОЛОКНИСТИХ БІОКОМПОЗИТІВ
НА ОСНОВІ КРОХМАЛЬНОГО В'ЯЖУЧОГО /
DEVELOPMENT OF FIBROUS BIOCOMPOSITES
BASED ON STARCH BINDER**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ – 41
Огороднік Микола Степанович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Садова Оксана Леонідівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.
к.т.н., професор
Гарант освітньої програми:
Кашицький Віталій Павлович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

ІМБІРОВИЧ Н.Ю.

“ ” 20 року

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

Огородніку Миколі Степановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка волокнистих біокомпозитів на основі крохмального в'язучого

керівник роботи Садова О.Л., к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “31” 12.2025 р. № 540/01-02

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

3. Вихідні дані до роботи літературні джерела, властивості вихідних матеріалів, методи досліджень властивостей матеріалів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ; Розділ 1. Технічне обґрунтування; 2. Характеристика вихідних матеріалів та методики досліджень; 3. Експериментальна частина; Висновки; Список використаних джерел; Додатки

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

Слайд 1 – Завдання роботи і хімічний склад мікросфер (1 л. ф. А4);

Слайд 2 – Склад розроблених біокомпозитних матеріалів (1 л. ф. А4);

Слайди 3-6 – Дослідження властивостей композитних зразків (7 л. ф. А4);

Слайд 7 – Технологічний процес (1 л. ф. А4);

Слайд 8 – Загальні висновки (1 л. ф. А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Розділ 1. Технічне обґрунтування	05.05.2026 р.	
2	Розділ 2. Характеристика вихідних матеріалів та методики досліджень	12.05.2026 р.	
3	Розділ 3. Експериментальна частина	19.05.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Огороднік М.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Садова О.Л.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Огороднік М.С. Розробка волокнистих біокомпозитів на основі крохмального в'язучого. 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 та додатків.

У першому розділі даної роботи описано технологію отримання крохмалю та вказано область застосування. У другому розділі подано характеристику використовуваних матеріалів та методику дослідження фізико-механічних властивостей біокомпозитів. У третьому розділі приведено склад розроблених біокомпозитних матеріалів, технологію їх формування та режим термічної обробки, а також дослідження фізико-механічних властивостей біокомпозитів, наповнених крохмалем.

Бакалаврська робота складається з пояснювальної записки та додатків. Пояснювальна записка містить 40 сторінок, 17 рисунків, 2 таблиці, та включає список з 13 літературних джерел. Графічна частина складається з 6 листів формату А4, представлених у додатку А.

Ключові слова: полімери, біокомпозити, крохмаль, солома, міцність на стискання.

					БР 0426.00.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка волокнистих біокомпозитів на основі крохмального в'язучого			Літ.	Арк.	Акрушів
Розробила		Огороднік								
Перевірив		Садова							3	40
								ЛНТУ, каф. матеріалознавства гр. ПМ-41		
Н. Контр		Мисковець								
Затв.		Імбірович								

ANNOTATION

Ogorodnik M.S. Development of fibrous biocomposites based on starch binder. 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 sources used and appendices.

The first chapter of this work describes the technology of starch production and indicates the scope of application. The second chapter presents the characteristics of the materials used and the methodology for studying the physical and mechanical properties of biocomposites. The third chapter presents the composition of the developed biocomposite materials, the technology of their formation and the mode of heat treatment, as well as the study of the physical and mechanical properties of biocomposites filled with starch.

The bachelor's thesis consists of an explanatory note and appendices. The explanatory note contains 40 pages, 17 figures, 2 tables and includes a list of 13 literary sources. The graphic part consists of 6 A4 sheets, presented in Appendix A.

Keywords: polymers, biocomposites, starch, chopped straw, compressive strength.

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	7
1.1. Властивості, структура, види та використання крохмалю.....	7
1.2. Отримання термопластичного крохмалю.....	10
1.3. Наповнювачі для біокомпозитів на основі крохмальної матриці.....	13
1.4. Висновки і постановка завдань досліджень.....	16
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	17
2.1. Характеристика вихідних компонентів.....	17
2.2. Методики дослідження властивостей композитів.....	20
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	22
3.1. Вплив складу композиції та режимів термічної обробки на властивості біокомпозитних матеріалів.....	22
3.2. Вплив температури термічної обробки на міцність на стискання біокомпозитів.....	26
3.3. Вплив вмісту подрібненої соломи на міцність на стискання біокомпозитів.....	30
3.4. Вплив тривалості витримки біокомпозитів на спокійному повітрі на їх міцність на стискання.....	33
ВИСНОВКИ.....	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	39
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Сучасний розвиток матеріалознавства дедалі більше орієнтується на використання відновлюваних природних ресурсів, що пов'язано як із зростанням екологічної свідомості суспільства, так і з необхідністю зменшення залежності від вичерпної сировини. Одним із перспективних напрямів є створення біополімерних матеріалів на основі природних компонентів, серед яких особливе місце займає крохмаль. Крохмаль є доступним, екологічно безпечним і біорозкладним полімером, який широко використовується як сировина для виготовлення біокомпозитів. Завдяки своїй хімічній структурі він може піддаватися різним модифікаціям, що дозволяє регулювати його механічні, термічні та бар'єрні властивості.

Біокомпозити на основі крохмалю поєднують у собі переваги традиційних полімерів і здатність до повної утилізації без шкоди для довкілля. Дослідження у цій сфері спрямовані на вдосконалення методів переробки крохмалю, підвищення його сумісності з іншими полімерними компонентами, а також на покращення експлуатаційних характеристик отриманих матеріалів. У цій роботі проаналізовано сучасні підходи до створення біокомпозитів на основі крохмалю, їхні властивості, переваги, недоліки та потенційні напрями застосування в різних галузях промисловості.

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

1.1. Властивості, види та використання крохмалю

Потенціал біорозкладних полімерів, і, зокрема, полімерів, отриманих з агроресурсів, таких як полісахариди, зокрема крохмаль, вже давно визнаний. Специфічні структури та наступні властивості контролюються багатьма специфічними факторами, такими як форма наповнювача, розмір та розвинутість поверхні, умови обробки та навколишнього середовища [1].

Крохмаль – це важливий природний вуглеводний полімер рослинного походження, який широко застосовується як у харчовій, так і в нехарчовій промисловості. Це зумовлено його доступністю, відновлюваністю, здатністю до біорозкладу, низькою вартістю, біосумісністю та відсутністю токсичності. Кожен вид крохмалю має унікальну форму та розмір зерен, що визначає його технологічні властивості [2].

Картопляний крохмаль найпопулярніший, має сніжно-білий колір. Властивості: дає прозорий, дуже в'язкий клейстер. Використовують зазвичай у харчовій промисловості (м'ясні вироби, киселі). Водночас крохмаль має низьку термостійкість, під час тривалого нагрівання його гранули втрачають структуру, розпадаються на дрібні частинки, що призводить до швидкого розрідження сумішей.

Кукурудзяний крохмаль білий з легким жовтуватим відтінком, матовий. Клейстер з кукурудзяного крохмалю менш в'язкий, ніж у картопляного, і непрозорий. Після застигання утворює досить щільний гель. Використання в основному також у харчовій промисловості (соуси, кондитерські креми). Цей складний вуглевод має відносно високу температуру желатинізації серед інших крохмалей. Тому для ефективного загущення суміші потрібне нагрівання до вищих температур.

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пшеничний крохмаль має низьку в'язкість і високу еластичність. Використовується також в харчовій промисловості (хлібна випічка).

Тапіоковий крохмаль отримують з коренів маніоки. найчистіший вид крохмалю. Дас дуже прозорий клейстер без сторонніх запахів. Як і картопляний крохмаль, він містить відносно мало амілози, і менш стійкий до тривалої термічної обробки, також добре витримує заморожування. При плавленні та нагріванні його в'язкість нижча, ніж у картопляного крохмалю, але після охолодження він утворює еластичну та волокнисту структуру.

Рисовий крохмаль має найдрібніші зерна. Утворює дуже ніжні та стабільні гелі. Використовується у дитячому харчуванні, білих соусах, парфумерії [3].

Первинний крохмаль – це відновлюваний ресурс, якого є багато у природі і може бути отриманий з недорогих матеріалів. Його можна витягувати з різних частин рослин, включаючи насіння, плоди, листя, бульби і коріння. Приклади цих відновлюваних рослинних ресурсів включають посіви кукурудзи, рису, пшениці та картоплі. Крохмаль може бути перероблений в жорсткий матеріал, відомий як термопластичний крохмаль (TPS), який виробляється шляхом поєднання первинного крохмалю з пластифікатором. TPS – це біополімер, отриманий з первинного крохмалю, який зазнає трансформації своєї гранульованої структури. Крохмаль і пластифікатор нагріваються разом протягом тривалого періоду, щоб роздути молекули крохмалю, викликаючи желатинізацію. Під час желатинізації гранули крохмалю розпадаються, що дозволяє молекулам амілози розчинитися, а кристаліти амілопектину розплавитися, що в кінцевому підсумку призведе до утворення гелю.

TPS, однак, дуже чутливий до вологи, що викликає структурну переорієнтацію під час зберігання. Ця властива характеристика зменшує термін його зберігання і призводить до появи негативних фізичних властивостей, таких як поверхнева липкість. Додатково TPS демонструє

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

низьку термостійкість і слабкі механічні властивості. Для усунення цих обмежень TPS можна посилити за допомогою хімічної модифікації, змішування з іншими біополімерами або додавання різних армуючих частинок. TPS добре підходить для традиційних формувальних та інших методів термопластичної обробки, оскільки він поводить себе подібно до розплавлених термопластичних полімерів. Властивості крохмалю можна порівняти з властивостями синтетичного термопласту, що робить TPS перспективним матеріалом для виробництва широкого асортименту продукції в різних галузях.

Останніми роками галузі промисловості все частіше використовують волокна, отримані з природних ресурсів, таких як трави, листя та сільськогосподарські відходи, як арматуру в композитах для широкого спектру застосувань. До них відносяться автомобільна, будівельна, реміснична галузі, підлога, утеплювач, стельові панелі, шафи та пакувальна промисловість. Натуральні волокна пропонують зручну альтернативу синтетичним волокнам завдяки їх низькій вартості, біорозкладності, низькій щільності, відсутності токсичності, високій питомій міцності, в'язкості та універсальності виробництва.

Рослинні волокна є гідрофільними завдяки гідроксильним групам, присутнім у лігноцелюлозі. Ця характеристика робить їх несумісними з гідрофобними термопластами, що обмежують їх ефективність для армування полімерів. Для вирішення цих проблем часто потрібні модифікації поверхні, щоб посилити адгезію між волокнами та полімерною матрицею, одночасно зменшуючи поглинання вологи. Були розроблені такі методи, як лужні обробки, силанове з'єднання та різні інші хімічні методи, для покращення сумісності між компонентами, зокрема міжфазної взаємодії між волокнами та матрицею, що дозволяє підвищити фізико-механічні характеристики біокомпозитів в цілому [3].

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Отримання термопластичного крохмалю

Полімери можуть бути широко класифіковані як біорозкладні або нерозкладні. Біорозкладні полімери отримуються з різних біоресурсів або відходів, включаючи відходи тваринного, харчового та сільськогосподарського, а також з крохмалю та целюлози. Ці матеріали є економічно ефективними та погіршуються протягом обмеженого періоду часу після утилізації. Біорозкладні полімери є одним з найбільш швидкозростаючих сегментів світової індустрії пластмас, з виробничою потужністю у всьому світі 1,2 мільйона тонн у 2020 році. Біорозкладні полімери можна додатково класифікувати на два типи на основі їх джерела: натуральні та синтетичні біополімери. Природні біополімери в основному отримують з відновлюваних або біологічних джерел, таких як тварини, рослини, морські організми та мікроорганізми, тоді як синтетичні біополімери виробляються хімічно.

Природні біорозкладні полімери можуть бути або природними, або штучно вироблені, і в основному отримані з відновлюваної сировини, такої як ліпіди (жири та олії), білки (наприклад, желатин, казеїн, вовна та шовк) та полісахариди (наприклад, крохмаль та целюлоза). Синтетичні біорозкладні полімери створюються шляхом хімічної полімеризації мономерів на біоосновні, таких як полімолочна кислота (PLA), полікапролактон, полібутилен сукцинат, полібутилен сукцинат адипат, аліфатичні-ароматичні сополіестери, полібутиленадипат/терефталат.

TPS – це біополімер, що виробляється шляхом перетворення гранульованої структури рідного крохмалю з використанням пластифікаторів, таких як сорбіт, вода та гліцерин. Первинний крохмаль, відновлюваний природний ресурс, є одним з найпоширеніших біополімерів у природі і може бути отриманий з недорогих джерел. Виводиться з різних рослинних частин, включаючи коріння, бульби, насіння, плоди і листя. Поширені приклади цих

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відновлюваних ресурсів включають врожаї кукурудзи, рису, пшениці та картоплі.

За словами Ріваденейра-Веласко та Перін і Мурано і Раїва та інших, гранули крохмалю складаються з лінійного компонента амілози, розгалужуючого компонента амілопектину та інших речовин, таких як ліпіди, фосфатні групи та білки. Ці компоненти визначають функціональність і застосовність крохмалю. Співвідношення амілози/амілопектину впливає на такі властивості, як водопоглинання, морфологія та загальні функціональні характеристики крохмалю. Структура крохмалю є напівкристалічною, з кристалічною областю, що містить короткі амілопектинові ланцюги, і аморфною областю, що складається з амілози та довгих амілопектинових ланцюгів. Більш високий вміст амілози змінює організацію кристалічних ламель у гранулах. На рисунку 1.1 подано хімічну структуру природного крохмалю.

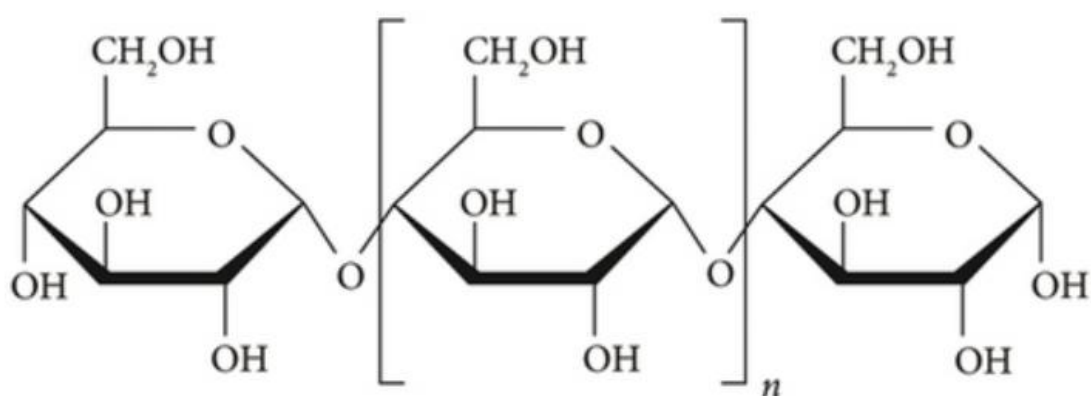


Рисунок 1.1 – Хімічна структура природного крохмалю

TPS виробляється шляхом змішування первинного крохмалю з пластифікатором. Суміш нагрівається, щоб розбити впорядковані структури всередині гранульованих молекул крохмалю, тим самим викликаючи желатинізацію. Після цього суміш повинна охолонути перед використанням в наступних процесах. Роль пластифікатора полягає у викликанні

мікроструктурних змін у крохмалі, що призводить до бажаних характеристик кінцевого продукту, як показано на рисунку 1.2.

Згідно з аналізом на сканувальному електронному мікроскопі, первинний крохмаль має зернисту, переривчасту структуру, тоді як термопластичний крохмаль (TPS) вирізняється однорідною поверхнею майже без дефектів. У природному крохмалі чітко видно мікроструктуру: його гранули мають різний розмір і збиваються у великі групи (агломерати). Поверхня таких гранул гладка, без тріщин чи пор. Натомість термопластичний крохмаль має рівномірну текстуру. Він складається з міцної еластичної сітки та м'яких ділянок.

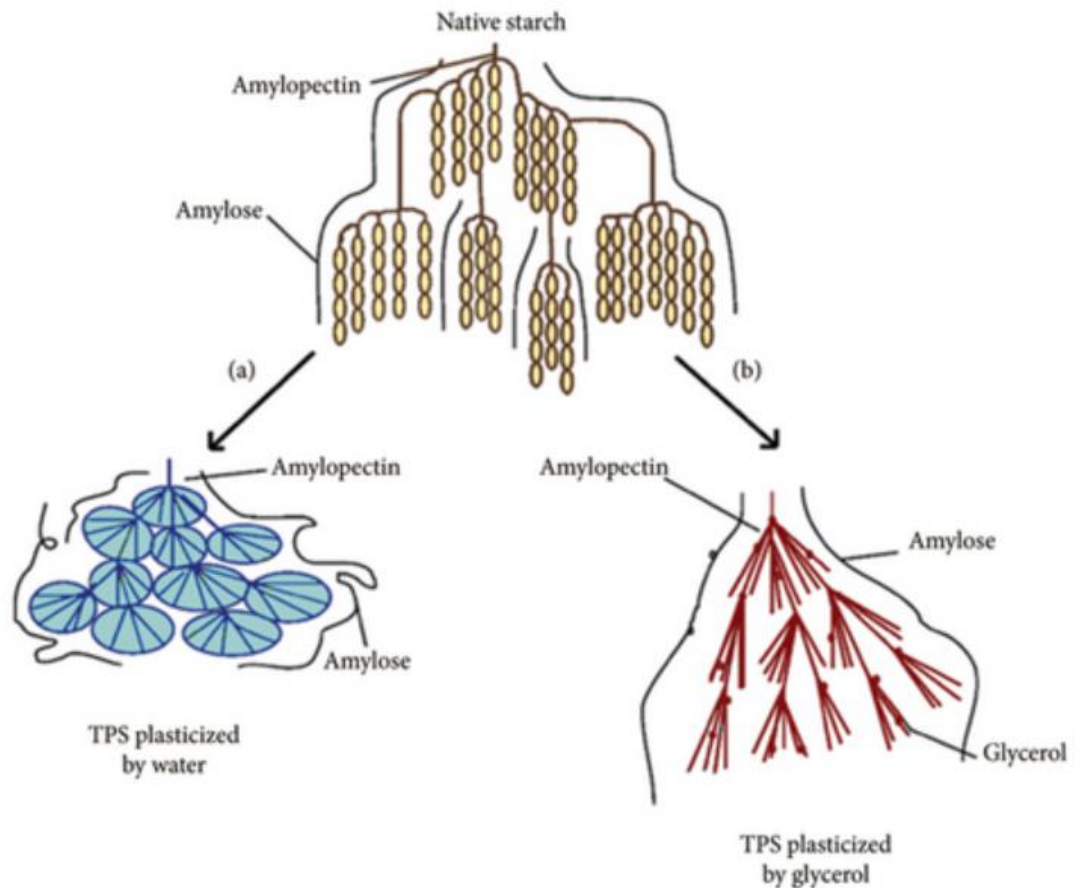


Рисунок 1.2 – Вплив модифікатора на структуру крохмалю

Для ефективної взаємодії пластифікатор повинен бути меншим, ніж молекули крохмалю, щоб розсіюватися в міжмолекулярних просторах. Поширені пластифікатори, такі як сорбіт, вода та гліцерин, містять гідроксильні групи, що робить їх сумісними з крохмалем. Вони порушують початкове кристалічне розташування крохмалю, розриваючи водневі зв'язки між макромолекулами, дозволяючи амілопектиновим і амілозним ланцюгам текти в міру підвищення температури, що призводить до утворення TPS [3].

1.3. Наповнювачі для біокомпозитів на основі крохмальної матриці

Різні природні волокна (льон, рамі, джут, пальма та сизаль серед інших) використовуються для армування термопластичних полімерів на основі крохмалю. Більшість натуральних волокон складаються з целюлози, геміцелюлози та лігніну з різними відносними кількостями, за винятком бавовни, яка має в основному целюлозу в своєму складі. Коли натуральні волокна змішуються з полісахаридами (термопластичним крохмалем і його сумішами), їх механічні властивості стають помітними. Цей факт був віднесений до хімічної подібності крохмалю та рослинних волокон, що забезпечує хорошу сумісність між ними. Хороша адгезія між природним волокном і полімерною матрицею необхідна для визначення хорошої взаємодії волокна/матриці, який може передавати зовнішні навантаження на волокнистий наповнювач за допомогою напружень зсуву над міжфазною взаємодією [4].

Відомо, що в області біокомпозитів, найбільшою проблемою в роботі з натуральними волокнами є їх велика варіація властивостей і характеристик. На їх властивості та обробку композитів, які посилені природними волокнами, впливають багато факторів, таких як хімічний склад, морфологія, розмір, дисперсія/розподіл, міжфазна адгезія та вміст частинок. Більшість дослідників зосередили свій інтерес на вивченні впливу розміру та вмісту

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

волокон на механічні властивості. Вони виявили, що збільшення розміру волокна збільшувало міцність на розрив і модуль пружності композитів, в той час як ударна міцність і подовження при розриві зменшились. Крім того, чим вищий вміст природного волокна, тим вища міцність, жорсткість і менша ударна міцність [5].

В роботі [6] для створення екологічних композитів на основі крохмалю використано три види натуральних волокон: сизаль, джут і кабун у пропорціях від 2,5% до 12,5%. Щоб зробити матеріал пластичним, додавали воду та гліцерин. Дослідження показали, що чим більше у складі волокон, тим міцнішим стає композит. Найкращу стійкість до розриву забезпечило додавання 10% сизалю, а найвищу ударну міцність продемонстрували композити з волокнами кабуї.

Дослідження [7] присвячене розробці екологічних біокомпозитів, які повністю складаються з побічних продуктів переробки пшениці – клейковини (глютену) та соломи. Матеріали виготовляли термомеханічним способом без використання хімічних розчинників, що робить технологію екологічно безпечною. У роботі порівнювали три типи волокон соломи різного розміру, отримані шляхом послідовного подрібнення. Встановлено, що додавання соломи до 11,1% за об'ємом суттєво підвищує жорсткість та міцність матеріалу на розрив. Важливим висновком стало те, що дрібніші волокна мають вищу гідрофобність, а це забезпечує краще зчеплення з білковою матрицею. Найвищу якість з'єднання на межі розділу фаз продемонстрували найменші частинки, отримані в кульковому млині. Використання соломи не лише покращує механічні властивості, а й дозволяє значно знизити вартість кінцевого продукту. Таким чином, результати підтверджують перспективність переробки сільськогосподарських відходів у міцні та дешеві біопластики.

У науковій роботі [8] досліджено розроблених екологічних біокомпозитів на основі природних гранул крохмалю та деревних волокон

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сосни без використання хімічних добавок. Для виготовлення матеріалів автори застосували два методи пресування – термічне та ультразвукове, порівнюючи їхній вплив на структуру крохмалю. Дослідження показало, що метод термічного пресування дозволяє краще зберегти цілісність гранул, що забезпечує матеріалу високу механічну міцність. Найкращі результати, які можна порівняти з властивостями технічних термопластів, було отримано при використанні вибіленої крафт-целюлози. Високі показники міцності на згин (до 70 МПа) досягалися завдяки формуванню стійкої внутрішньої сітки з волокон, які ефективно взаємодіють із крохмальною матрицею. В роботі доведено, що звичайний крохмаль може служити ефективною основою для створення міцних біодеградабельних матеріалів майбутнього.

Було успішно розроблено серію екологічно чистих біокомпозитів на основі крохмалю (PS), пластифікованого гліцерином, із використанням нанокристалів целюлози рамі (RN) у концентрації від 0 до 40 мас. % як наповнювача. Нанокристали целюлози рамі, що мають середню довжину $538,5 \pm 125,3$ нм та діаметр $85,4 \pm 25,3$ нм, були отримані з волокон рамі методом кислотного гідролізу. Морфологію, термічну поведінку та механічні властивості отриманих композитів досліджували за допомогою сканувальної електронної мікроскопії, диференціального сканувального термічного аналізу, динамічного механічного термічного аналізу, а також шляхом вимірювання механічних показників і водопоглинання. Результати вказують, що синергетична взаємодія між частинками наповнювача, а також між наповнювачем і крохмальною матрицею, відіграє ключову роль у зміцненні композитів. У композитах PS/RN, витриманих за відносної вологості 50%, спостерігалось зростання міцності на розрив з 2,8 МПа (для чистої плівки крохмалю) до 6,9 МПа, а модуля Юнга – з 56 МПа до 480 МПа у випадку збільшення вмісту RN від 0 до 40 мас. %. Крім того, введення наповнювачів RN у крохмальну матрицю призвело до зниження чутливості біокомпозитів до води [9].

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4. Висновки і постановка завдань досліджень

Використання крохмалю в поєднанні з натуральними матрицями відкриває широкі можливості для створення нових екологічних матеріалів. Завдяки його унікальним властивостям, таким як висока стабільність, антиоксидантна активність і здатність до хімічної модифікації, крохмаль може стати основою для розробки інноваційних біоматеріалів. Подальші дослідження у цій галузі сприятимуть розширенню сфер застосування крохмалю та підвищенню ефективності його використання у промисловості, медицині та екології.

У даному розділі описано види, властивості та методи використання крохмалю. Проаналізовано методи отримання та очищення крохмалю. Охарактеризовано види матриць природного походження для формування біокомпозитів.

В бакалаврській роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- сформувати біокомпозитні матеріали на основі крохмалю;
- дослідити вплив вмісту наповнювача на механічні властивості біокомпозитів;
- дослідити вплив режимів термічної обробки на властивості біокомпозитів;
- проаналізувати характер руйнування біокомпозитів.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика вихідних компонентів

Крохмаль (рисунок 2.1) є одним із найважливіших природних полімерів, що слугує основним джерелом енергії для рослин та незамінною сировиною для харчової й технічної промисловості. З хімічної точки зору, це суміш двох полісахаридів: амілози та амілопектину. Крохмаль характеризується здатністю до клейстеризації, біодеградабельністю та високою реакційною здатністю завдяки наявності численних гідроксильних груп, що робить його ключовою сировиною для створення біополімерних матеріалів та композитів. Первинний крохмаль – це високомолекулярна сполука, що складається з двох основних фракцій: лінійної амілози та розгалуженого амілопектину. Він має вигляд білого порошку, не розчиняється у холодній воді, але при нагріванні формує в'язкі колоїдні розчини (клейстери). Крохмаль є екологічно безпечним, відновлюваним ресурсом із низькою вартістю, що дозволяє застосовувати його як основну матрицю або наповнювач у технологіях сталого розвитку.

Харчова промисловість – як природний загущувач, стабілізатор консистенції та структуроутворювач у виробництві соусів, кондитерських та м'ясних виробів.

Фармацевтика та медицина – як інертний наповнювач (зв'язуюча речовина) при пресуванні таблеток, а також компонент для створення капсул із контрольованим вивільненням ліків.

Паперова та текстильна промисловість – для проклеювання паперу з метою підвищення його міцності та гладкості, а також для шліхтування ниток у ткацтві.

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд крохмалю

Виробництво біопластиків – як основний компонент біорозкладних пакувальних матеріалів, що є альтернативою синтетичним полімерам на нафтовій основі.

Хімічна технологія – як сировина для отримання декстринів, патоки, глюкози та етилового спирту шляхом гідролітичного розщеплення.

Пшенична солома (рисунок 2.2) – це масовий побічний продукт сільськогосподарського виробництва, що залишається після обмолоту зерна пшениці. Вона належить до лігноцелюлозної біомаси та широко розглядається як перспективна відновлювана сировина для виготовлення композитних матеріалів, біопалива, целюлозно-паперової продукції та інших екологічно орієнтованих виробів. Завдяки значним обсягам утворення, низькій вартості та доступності пшенична солома є одним із найбільш поширених рослинних відходів у сільському господарстві.



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд подрібненої соломи

Хімічний склад пшеничної соломи представлений переважно целюлозою, геміцелюлозою та лігніном. Вміст целюлози зазвичай становить 35...45 %, геміцелюлози 20...30 %, а лігніну 15...25 %. Також у її складі присутні мінеральні домішки, зола, воски та екстрактивні речовини. Саме високий вміст целюлозних волокон обумовлює можливість використання соломи як армувального наповнювача у полімерних і біокомпозитних матеріалах.

Фізико-механічні характеристики пшеничної соломи залежать від гатунку пшениці, умов вирощування, вологості та методу обробки. Солома вирізняється невисокою густиною, помірною жорсткістю та добрими теплоізоляційними якостями. Завдяки цьому її використовують у виготовленні теплоізоляційних плит, будівельних виробів, пакувальних виробів та композитів. Важливою перевагою пшеничної соломи є її екологічність та відновлюваність. Застосування цієї біомаси посприє зменшенню обсягу аграрних відходів, скороченню викидів вуглекислого газу

та розвитку економіки. Окрім того, переробка соломи у вторинну сировину дозволяє збільшити ефективність застосування природних ресурсів та зменшити залежність від штучних матеріалів. [9,10,11,12,13].

2.2. Методики дослідження властивостей композитів

Формування та пресування біокомпозитних зразків здійснювали в прес формі (рисунок 2.3).

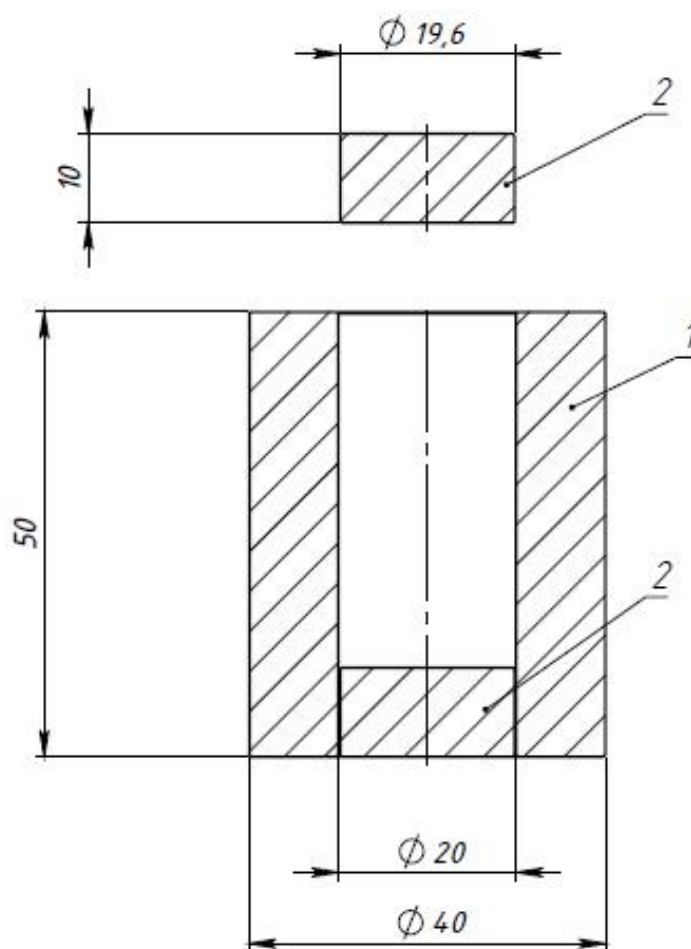


Рисунок 2.3 – Ескіз прес-форми для формування біокомпозитних зразків для дослідження міцності на стискання

Механічні дослідження композитних зразків проводять для оцінювання ключових експлуатаційних властивостей матеріалу, зокрема:

Визначення межі міцності на стискання проводять на стандартному пресовому обладнанні згідно з відповідною методикою ASTM D256. Під час дослідження зразки діаметром 20 мм та висотою 30 мм піддають осьовому стискальному навантаженню до моменту їх руйнування, фіксуючи при цьому максимальне значення навантаження.

Межу міцності на стискання розраховували за формулою:

$$\sigma_{ст} = \frac{P}{S}$$

де P – навантаження, при якому зразок зруйнувався, Н;

S – площа поперечного перерізу зразка, см^2

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Вплив температури термічної обробки та вмісту води на міцність на стискання біокомпозитів

У процесі дослідження розроблені зразки біокомпозитних матеріалів на основі крохмалю та подрібненої соломи з різним співвідношенням компонентів та різним вмістом води (таблиця 3.1). Варіювання кількості води проводилося для визначення її впливу на структуру матеріалу, щільність і механічні характеристики отриманих зразків.

Таблиця 3.1 – Склад біокомпозитних матеріалів

№ зразка	Вміст крохмалю, мас. ч.	Вміст подрібненої соломи, мас. ч.	Вміст води, мл
1	100	100	2
2	100	100	1
3	100	100	0,5
4	100	100	-

Встановлено, що температура термічної обробки суттєво впливає на процес взаємодії компонентів композиції та кінцеві властивості матеріалу. Охолодження біокомпозитних зразків проводять на спокійному повітрі в прес-формах, затиснутих в струбцинах, з метою уникнення пружної післядії, яка спричиняє порушення суцільності матеріалу у вигляд тріщин та розшарувань. Після кожних 30 хвилин термічної обробки проведено додаткове підпресування біокомпозиції з метою забезпечення щільності біокомпозитного матеріалу, оскільки під дією температури відбувається видалення залишкової вологи з об'єму матеріалу, що призводить до утворення пор та пустот в об'ємі матеріалу. З метою видалення надлишку вологи з композиції проведено її підсушування перед етапом пресування.

Дослідження виконувалося з метою визначення оптимального температурного режиму, який забезпечує належне формування структури матеріалу та покращення його механічних характеристик.

За результатами експериментальних досліджень проаналізовано вплив температури термічної обробки та кількості води у композиції на міцність зразків під час стискання. Термічну обробку біокомпозитів здійснювали протягом 1 години за різних температур: 140 °С, 160 °С та 180 °С. Результат проведених досліджень встановив, що біокомпозитні зразки, виготовлені без додавання води, мали вищу міцність на стискання 35,0...54,1 МПа (рисунок 3.1) порівняно зі зразками з різним вмістом води у композиції 7,9...39,8 МПа. Це може бути пов'язано зі зменшенням пористості матеріалу та формуванням більш щільної структури композиту за рахунок відсутності води, яку додавали з метою полегшення формування біокомпозитних зразків. Результати показали, що для всіх температурних режимів спостерігається загальна закономірність: зі зменшенням кількості води у складі композиції міцність на стискання зростає.

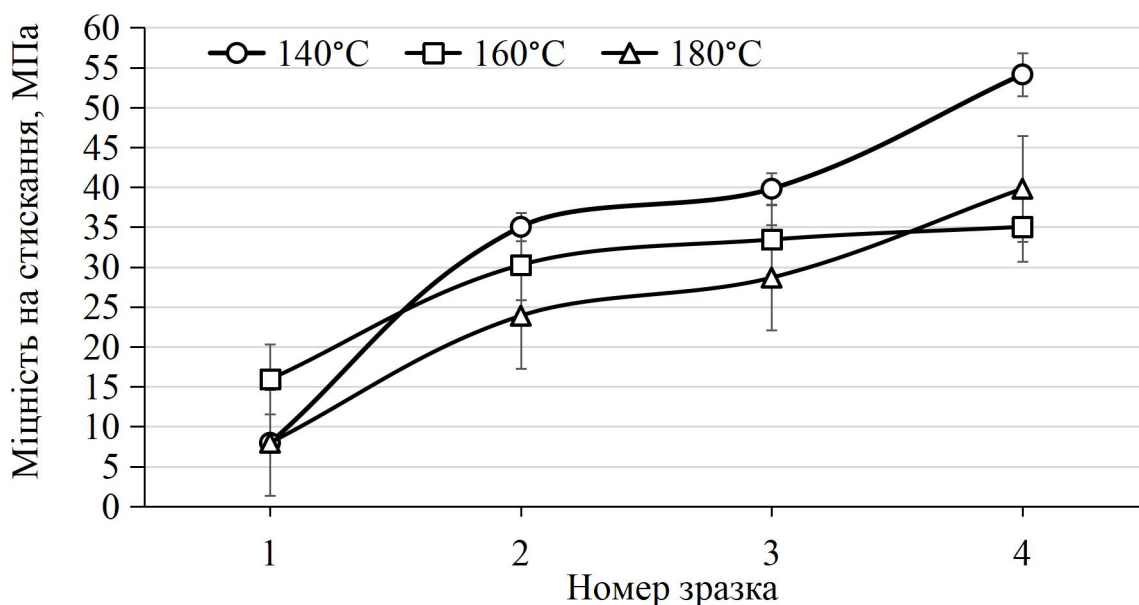


Рисунок 3.1 – Залежність міцності на стискання біокомпозитів від температури термічної обробки та вмісту води

Для біокомпозитів, сформованих за температури 140 °С, спостерігається різке зростання міцності від 7,96 МПа до 54,14 МПа, тобто збільшення приблизно у 6,8 рази (рисунок 3.1) у випадку зменшення вмісту води. За температури 160 °С результати показують, що збільшення міцності на стискання в 1,9 раз відбувається більш плавно від 15, 9 МПа для зразка, що містить 2 мл води, до 35,0 МПа для зразка без вмісту води. У випадку підвищення температури до 180 °С відбувається підвищення в 4,4 рази міцності на стискання біокомпозитів, який містить 2 мл води, від 7,9 МПа до 35,0 МПа для біокомпозитів без вмісту води.

За результатами проведених випробувань встановлено, що найкращі механічні характеристики було отримано для біокомпозитних зразків, термічно оброблених за температури 140 °С. Це можна пояснити формуванням більш оптимальної структури матеріалу та ефективнішою взаємодією між компонентами композиції. За нижчих температур процеси структуроутворення могли проходити недостатньо інтенсивно, тоді як при вищих температурах можливе часткове погіршення структури матеріалу внаслідок надто високого термічного впливу.

З рисунка 3.2, а-г видно, що поверхні мають достатньо рівномірну структуру поверхні. Частинки волокон подрібненої соломи орієнтовані хаотично в біокомпозитному матеріалів. Внаслідок пресування переважає горизонтальне розміщення частинок волокон подрібненої соломи. Під час аналізу виявлено незначну кількість дрібних пор і відсутність макротріщин на всіх біокомпозитних зразках.

На рисунку 3.3 подано загальний вигляд біокомпозитів наповнених крохмалем та соломою, оброблені за температури 140°С, які містять різний вміст води після руйнування. Під дією стискаючого навантаження в біокомпозитних матеріалах розпочинаються процеси руйнування, які супроводжуються відокремленням фрагментів матеріалу різних розмірів (рисунок 3.3, а -г).

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б



в



г

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд поверхні біокомпозитів, на основі крохмалю та соломи, оброблені за температури 140°C, з різним вмістом води: а – 2 мл.; б – 1 мл.; в – 0,5 мл.; г – без води



а



б



в



г

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд біокомпозитів, наповнених крохмалем та соломкою, оброблені за температури 140°C, які містять різний вміст води, після руйнування:

а – 2 мл.; б – 1 мл.; в – 0,5 мл.; г – без води

3.2. Вплив температури термічної обробки на міцність на стискання біокомпозитів

Проаналізовано вплив температури термічної обробки на механічні властивості біокомпозитних матеріалів на основі крохмалю та соломи без додаткового вмісту води. За результатами попередніх випробувань біокомпозити без додаткового вмісту води (зразок № 4, таблиця 3.1) мають найкращі показники міцності на стискання (рисунок 3.1). Термічна обробка зразків здійснювалася в печі протягом однієї години при температурах 100 °С, 120 °С, 140 °С, 160 °С, 180 °С та 200 °С.

Біокомпозитний зразок, який проходив термічну обробку за температури 100 °С, має міцність 39,81 МПа (рисунок 3.4). При підвищенні температури до 120 °С відбулося незначне зростання міцності до 41,40 МПа, що може свідчити про покращення процесів структуроутворення в матеріалі. Найбільше значення міцності було отримано за температури 140 °С, де значення міцності становить 54,14 МПа. Порівняно із зразком, обробленим за температури 100 °С, спостерігається збільшення міцності на стискання на 36 %. Отримане вище значення міцності може бути пов'язане із найбільш ефективним формуванням внутрішньої структури матеріалу, покращенням адгезійної взаємодії між крохмальною матрицею та волокнами соломи, а також оптимальним перебігом процесів термічного ущільнення композиції. При подальшому підвищенні температури до 160 °С спостерігається різке зниження міцності до 35,03 МПа. Порівняно з максимальним значенням при температурі 140 °С, зниження складає близько 35 %. За температури 180 °С відбулося часткове збільшення міцності до 39,81 МПа, однак даний показник залишається нижчим від максимального значення. Найнижче значення серед високотемпературних режимів було отримано для зразків, оброблених за температури 200 °С, де міцність склала 33,04 МПа. Зменшення механічних характеристик за підвищених температур може

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

пояснюватися початком термічної деградації компонентів біокомпозиту. За надмірного нагрівання можуть відбуватися структурні зміни крохмальної матриці, руйнування міжмолекулярних зв'язків та погіршення взаємодії між матрицею і рослинним наповнювачем. Таким чином, аналіз підтвердив значний вплив температури термічної обробки на механічні властивості біокомпозитних матеріалів. Встановлено, що оптимальним температурним режимом є 140 °С при тривалості термічної обробки 1 година, оскільки саме за цих умов отримано максимальну міцність на стискання 54,14 МПа.

На рисунку 3.5 подано загальний вигляд біокомпозитів, витриманих за різної температури, під час випробувань на стискання. Руйнування всіх зразків відбувалося переважно за крихким механізмом. Початкове руйнування супроводжувалося появою локальних тріщин у приповерхневих шарах з подальшим відколюванням окремих фрагментів матеріалу. Для зразків, виготовлених за температури 140 °С, руйнування є більш рівномірним, що свідчить про однорідність структури біокомпозиту.

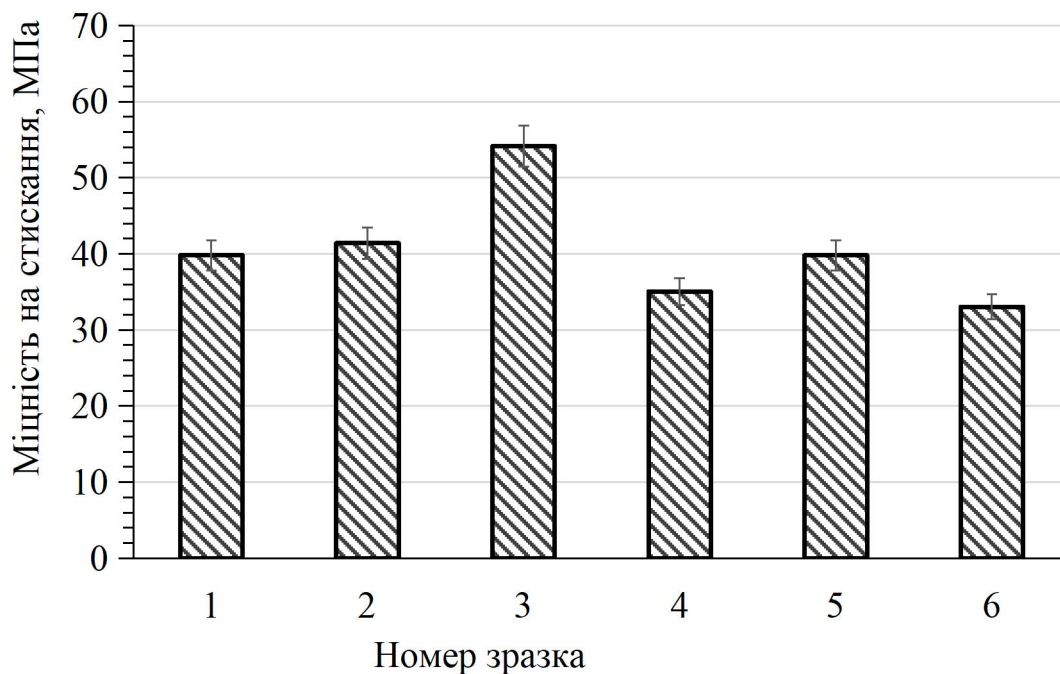


Рисунок 3.4 – Залежність міцності на стискання біокомпозитних матеріалів без води (склад № 4) від температури термічної обробки:
1 – 100 °С; 2 – 120 °С; 3 – 140 °С; 4 – 160 °С; 5 – 180 °С; 6 – 200 °С

На рисунку 3.5 подано загальний вигляд біокомпозитів витриманих при різній температурі. Візуальний аналіз показав, що зі збільшенням температури термічної обробки відбуваються зміни кольору, щільності та характеру поверхні матеріалу. При підвищенні температури структура біокомпозиту стає більш щільною та однорідною. Кількість пор зменшується, а поверхня набуває більш рівномірного вигляду. Це свідчить про інтенсифікацію процесів клейстеризації крохмалю та покращення взаємодії між компонентами композиції.

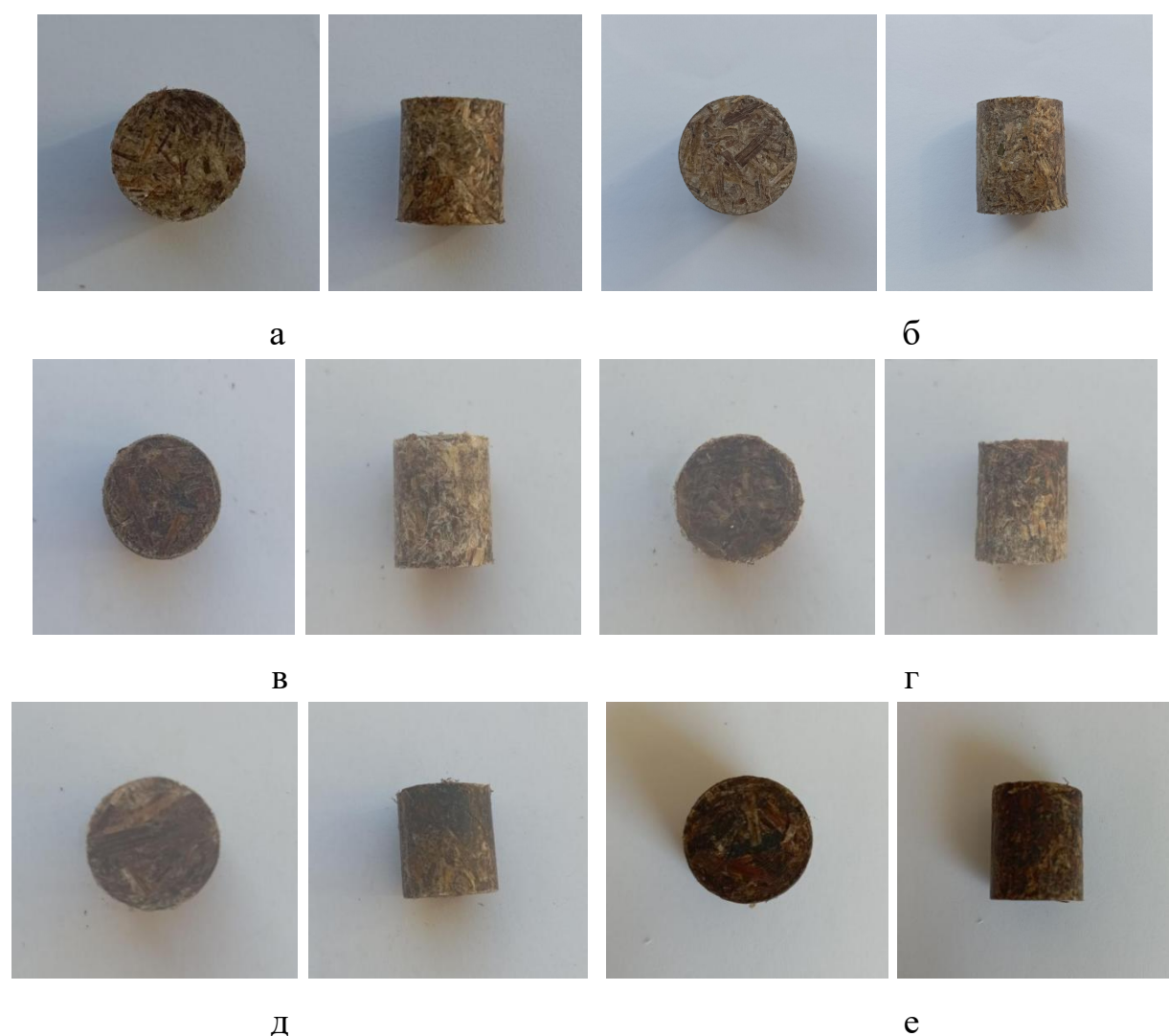


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків, витриманих при різній температурі:

а – 100 °C; б – 120 °C; в – 140 °C; г – 160 °C; д – 180 °C; е – 200 °C

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

На рисунку 3.5 подано загальний вигляд біокомпозитів витриманих при різній температурі, після дослідження їх міцності при стисканні. Початкове руйнування супроводжувалося появою локальних тріщин у приповерхневих шарах з подальшим відколюванням окремих фрагментів матеріалу. Для зразків, виготовлених при температурі 140 °С, руйнування було більш рівномірним, що свідчить про вищу цілісність та однорідність структури біокомпозиту.

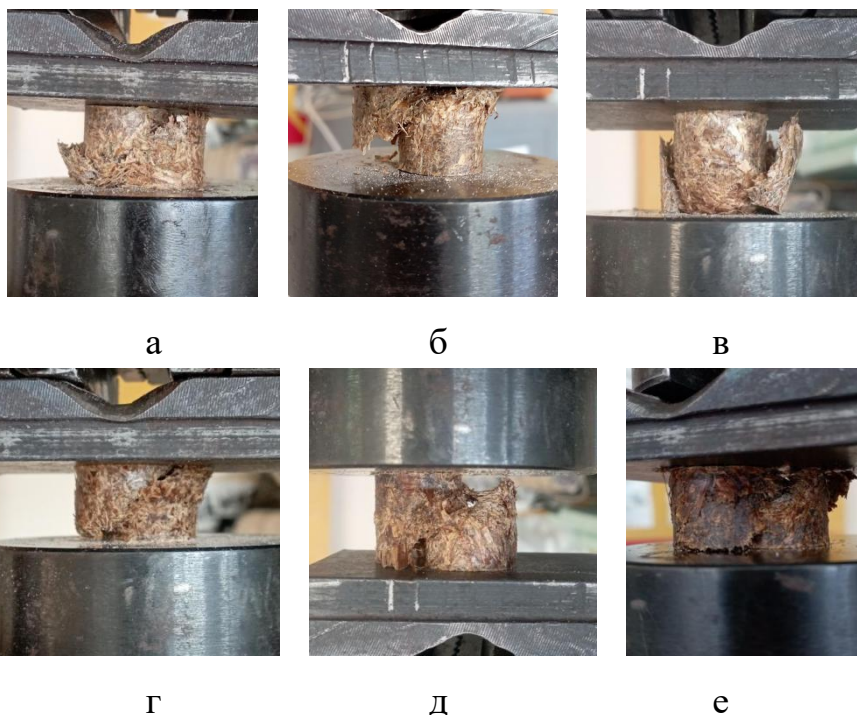


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків, витриманих при різній температурі, після дослідження їх міцності при стисканні:
а – 100 °С; б – 120 °С; в – 140 °С; г – 160 °С; д – 180 °С;
е – 200 °С.

3.3. Вплив вмісту подрібненої соломи на міцність на стискання біокомпозитів

Проведено аналіз впливу вмісту наповнювача на механічні властивості біокомпозитних матеріалів на основі крохмалю. Для забезпечення однакових умов експерименту всі зразки виготовлялися без додавання води та проходили термічну обробку за температури 140 °С, яка за результатами попередніх досліджень була визначена як оптимальна. У якості наповнювача використовувалася солома у кількості 83, 120 та 150 масових частин на 100 масових частин матриці з порошку крохмалю (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Склад біокомпозитних матеріалів

№ зразка	Вміст крохмалю, мас. ч.	Вміст подрібненої соломи, мас. ч.
1	100	83
2	100	100
3	100	120
4	100	150

Згідно з отриманими результатами встановлено, що вміст наповнювача суттєво впливає на механічні властивості біокомпозитного матеріалу. За збільшення кількості подрібненої соломи від 83 мас. ч. до 120 мас. ч. спостерігається підвищення міцності на стискання від 44,47 МПа до 50,16 МПа, що становить приблизно 12,8 %. Підвищення міцності на стискання може пояснюватися покращенням армувального ефекту волокон соломи. Наповнювач сприяє більш рівномірному розподілу навантаження всередині матеріалу та підвищує опір поширенню тріщин, що позитивно впливає на механічні характеристики композиту.

Однак при подальшому збільшенні вмісту соломи до 150 мас. ч. спостерігається зменшення міцності на стискання до 37,82 МПа, що приблизно на 24,6 % менше порівняно зі зразком із вмістом 120 мас. ч. Зниження міцності на стискання за надмірного вмісту наповнювача може

бути пов'язане з недостатньою кількістю крохмальної матриці для ефективного зв'язування частинок соломи. У результаті утворюються ділянки з нерівномірним розподілом компонентів, збільшуватися кількість порожнин та погіршуватися адгезійна взаємодія між матрицею і наповнювачем. Таким чином, проведені дослідження показали, що оптимальний вміст наповнювача становить 120 масових частин соломи на 100 масових частин крохмалю, оскільки саме за такого співвідношення отримано найбільше значення міцності на стискання – 50,16 МПа.

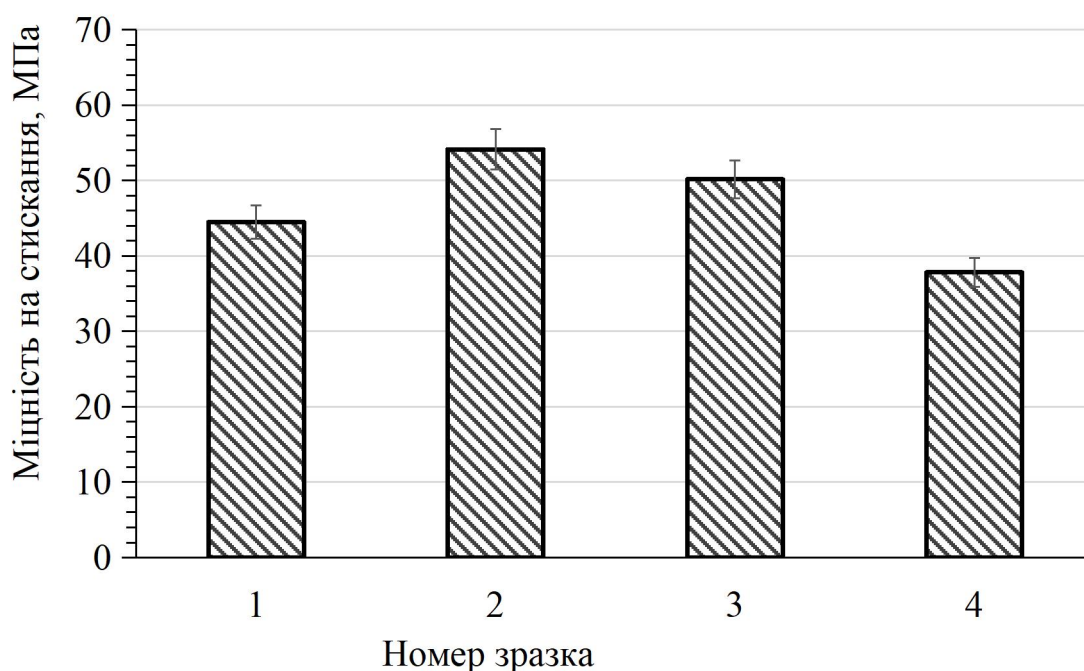


Рисунок 3.7 – Залежність міцності на стискання біокомпозитних матеріалів від вмісту подрібненої соломи (склад в таблиці 3.2)

На рисунку 3.8 подано загальний вигляд біокомпозитних зразків із різним вмістом наповнювача. На поверхні зразків чітко спостерігаються частинки подрібненої соломи, які рівномірно розподілені в об'ємі крохмальної матриці. Для зразків із вмістом соломи 83 мас. ч. характерна найбільш однорідна структура. Збільшення вмісту соломи до 120 мас. ч. призводить до підвищення кількості армувальних волокон у структурі біокомпозиту. При цьому зберігається достатня суцільність матеріалу, а

волокна рівномірно розподілені по всьому об'єму зразка. У зразках із вмістом соломи 150 мас. ч. спостерігається більш пухка структура та збільшення кількості поверхневих нерівностей. Внаслідок недостатньої кількості крохмального в'язучого для повного покриття всіх частинок наповнювача. Також збільшується ймовірність утворення локальних порожнин і зон концентрації напружень, що негативно впливає на механічні властивості біокомпозиту.

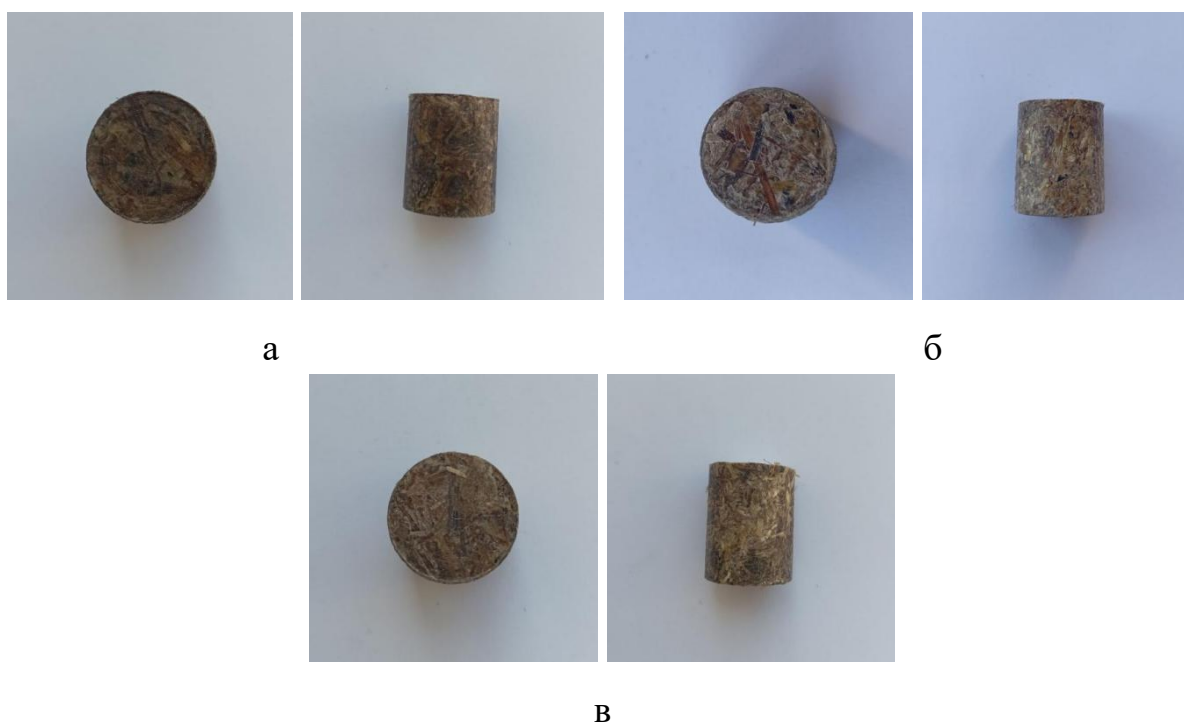


Рисунок 3.8 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків із різним вмістом наповнювача:

а – 83 мас. ч.; б – 120 мас. ч.; в – 150 мас. ч.

На рисунку 3.9 подано загальний вигляд біокомпозитних зразків після дослідження міцності на стискання із різним вмістом наповнювача. У процесі навантаження спостерігалось утворення поздовжніх і похилих тріщин з подальшим відколюванням окремих фрагментів. Для зразків із підвищеним вмістом соломи характерне більш інтенсивне розшарування структури та

висмикування окремих волокон із крохмальної матриці. Це свідчить про зниження ефективності зв'язку між компонентами композиції при надмірному вмісті наповнювача.



а

б

в

Рисунок 3.9 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків після дослідження міцності на стискання із різним вмістом наповнювача;

а – 83 мас. ч.; б – 120 мас. ч.; в – 150 мас. ч.

3.4. Вплив тривалості витримки біокомпозитів на спокійному повітрі на їх міцність на стискання

Для дослідження впливу часу витримки на механічні властивості біокомпозитних матеріалів використовувалися зразки на основі крохмалю та соломи, які за результатами попередніх досліджень продемонстрували найкращі показники міцності на стискання. Зразки виготовлялися без додавання води та проходили термічну обробку при температурі 140 °С протягом 1 години, оскільки саме такі параметри забезпечили максимальні механічні характеристики матеріалу. Після виготовлення зразки зберігалися в природних умовах на повітрі протягом 1, 7, 14 та 21 діб, після чого проводилися випробування на стискання з метою визначення впливу тривалості витримки на міцність матеріалу.

Результати експериментальних досліджень показали (рисунок 3.10, що для зразка після 1 доби витримки значення міцності на стискання становило

54,14 МПа. Після 7 діб зберігання показник міцності практично не змінився та становив 53,94 МПа, що свідчить про стабільність структури матеріалу протягом початкового періоду витримки. Однак подальше збільшення часу зберігання призводить до поступового зниження механічних характеристик. Після 14 діб витримки міцність матеріалу зменшилася до 43,59 МПа, що приблизно на 19,5 % менше порівняно з початковим значенням.

Для зразка після 21 доби витримки міцність на стискання становить 39,61 МПа, що на 26,8 % нижче порівняно зі зразком після першої доби витримки. Отримані результати свідчать про суттєвий вплив часу витримки на повітрі на механічні властивості біокомпозитного матеріалу. Зменшення міцності може бути пов'язане зі зміною внутрішньої структури матеріалу під впливом факторів навколишнього середовища.

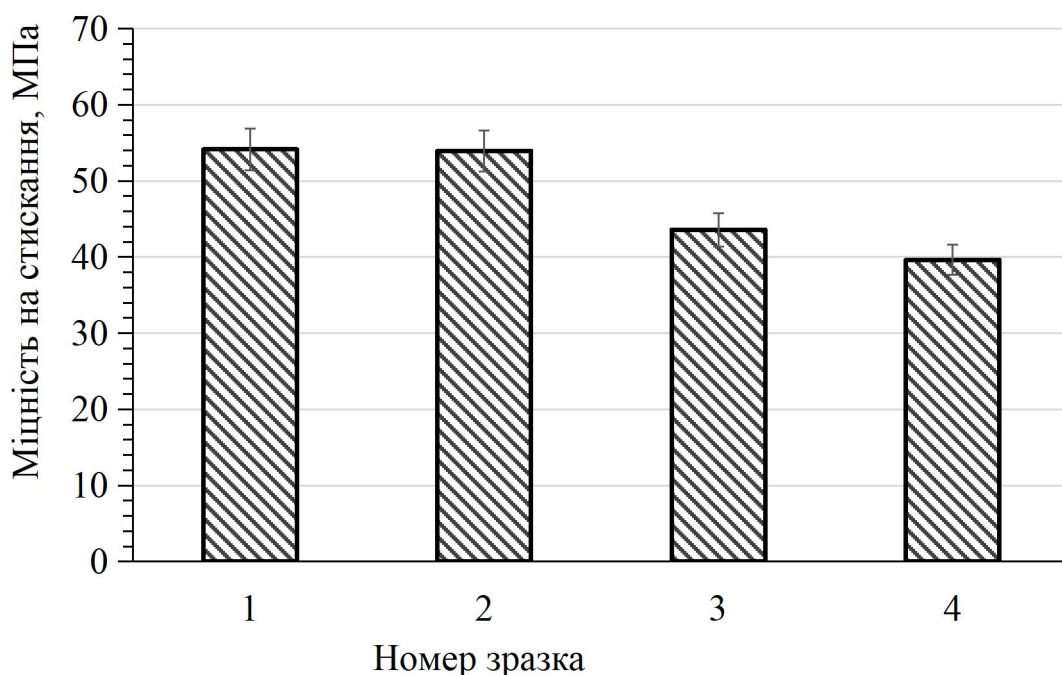


Рисунок 3.10 – Залежність міцності на стискання біокомпозитних матеріалів від тривалості витримки на повітрі:

а – 1 доба; б – 7 діб; в – 14 діб; г – 21 доба

Оскільки крохмаль є природним полімером, у процесі зберігання можуть відбуватися зміни залишкової вологості матеріалу, виникнення

внутрішніх напружень та поступове послаблення взаємодії між крохмальною матрицею та солом'яним наповнювачем. Таким чином, проведені дослідження показали, що тривалість витримки біокомпозитів на повітрі суттєво впливає на їх механічні властивості. Найвищі показники міцності були отримані для зразків після 1 доби витримки, де міцність при стисканні становила 54,14 МПа, а зі збільшенням часу зберігання спостерігається поступове зниження механічних характеристик матеріалу.

На рисунку 3.11 подано загальний вигляд біокомпозитних зразків із різним часом витримки на повітрі. Аналіз зовнішнього вигляду зразків після витримки на повітрі показав, що зі збільшенням часу витримки відбуваються певні зміни у структурі біокомпозитного матеріалу. Зразки після однієї доби витримки характеризувалися найбільш щільною структурою та однорідною поверхнею без видимих дефектів. Поверхня матеріалу мала рівномірне забарвлення, а волокна подрібненої соломи були добре зв'язані крохмальною матрицею.

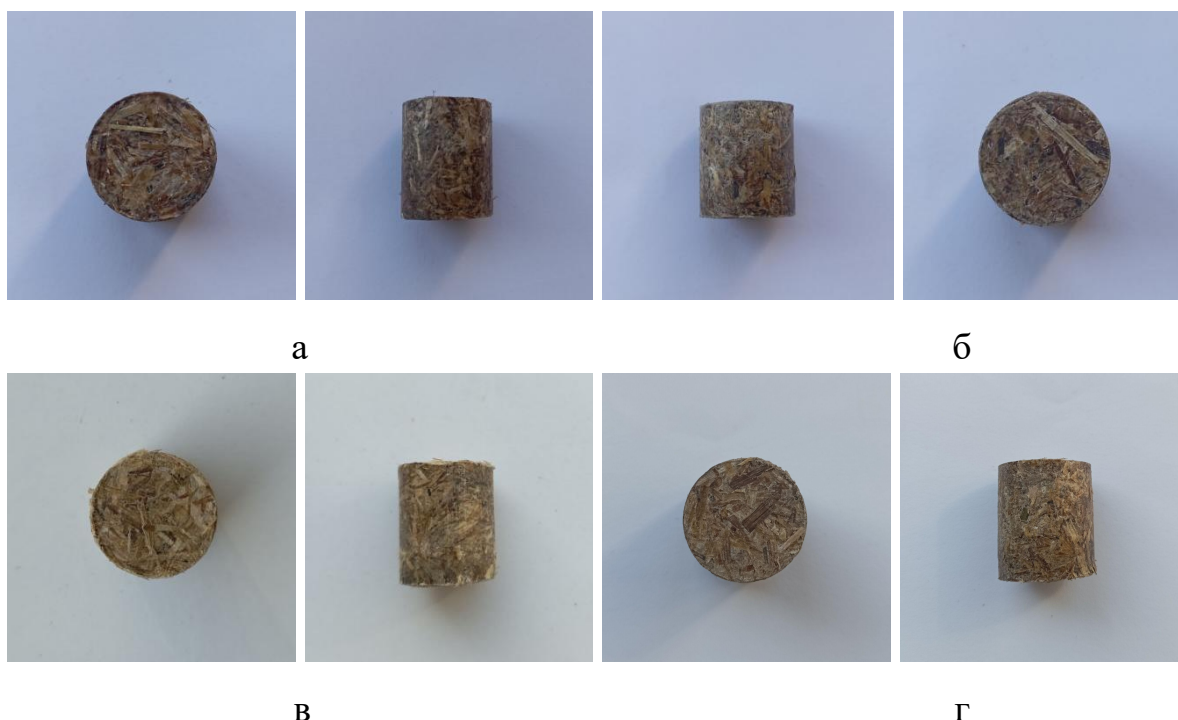


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків із різним часом витримки на повітрі:

а – 1 доба; б – 7 діб; в – 14 діб; г – 21 доба

Після 7 діб витримки суттєвих змін у зовнішньому вигляді не спостерігалось. Зразки, витримані протягом 14 діб, характеризувалися появою окремих локальних неоднорідностей структури та незначним підвищенням крихкості. Для зразків після 21 доби витримки характерним є найбільше зниження міцності на стискання. Під час навантаження руйнування відбувалося більш інтенсивно з утворенням поздовжніх тріщин та відколюванням окремих фрагментів матеріалу біля торцевих поверхонь. Це може бути пов'язано з процесами старіння крохмальної матриці, зменшенням пластичності матеріалу та послабленням міжфазної взаємодії між крохмалем і волокнами соломи.

На рисунку 3.12 подано загальний вигляд біокомпозитних зразків після дослідження міцності на стискання із різним часом витримки на повітрі.

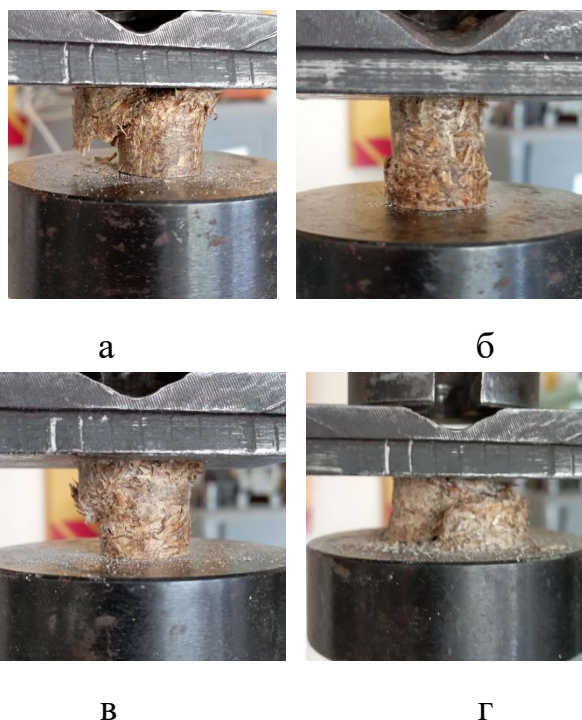


Рисунок 3.12 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків після дослідження міцності на стискання із різним часом витримки на повітрі:

а – 1 доба; б – 7 діб; в – 14 діб; г – 21 доба

Під час випробувань усіх серій зразків встановлено, що руйнування біокомпозитів має переважно крихкий характер. Руйнування розпочинається з утворення локальних зон концентрації напружень поблизу пор. Подальше збільшення навантаження призводить до розвитку тріщин та відокремлення окремих частин матеріалу. Незважаючи на поступове зниження міцності при тривалому зберіганні, усі досліджені біокомпозити зберігають достатню структурну цілісність, що підтверджує перспективність їх використання як екологічно безпечних композиційних матеріалів.

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розроблено волокнисті біокомпозитні матеріали на основі крохмального в'язучого та природних наповнювачів. Проведено аналіз літературних джерел щодо властивостей, структури, методів виробництва та сфери застосування крохмалю як основного компоненту біорозкладних матеріалів. Досліджено особливості використання природних волокон, зокрема пшеничної соломи, як армувального наповнювача для покращення механічних властивостей композитів.

Експериментально досліджено вплив вмісту води, кількості наповнювача та температурно-термічної обробки на механічні характеристики біокомпозитів. Встановлено, що зі зменшенням кількості води в складі композиції відбувається зростання міцності на стискання. Визначено оптимальний режим термічної обробки, для якого досягнуто максимальних показників міцності матеріалу.

Встановлено, що найкращі результати отримані за температури термічної обробки 140 °С, де міцність на стиснення склала 54,14 МПа. Отримані підтверджені результати перспективність використання крохмальних композицій із рослинними наповнювачами для створення екологічно безпечних біокомпозитних матеріалів із покращеними експлуатаційними властивостями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Avérous L., Halley P. J. Biocomposites based on plasticized starch. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2009. Vol. 3, Iss. 3. P. 329–343.
2. Production and Properties of Starch: Current Research / L. Wang et al. *Molecules*. 2024. Vol. 29, Iss. 3. Art. 646.
3. Natural Fibre–Reinforced Starch Biocomposites and Their Effects on the Material Mechanical Properties / M. Escamilla-García et al. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020. Art. 9905014.
4. Improved thermo-mechanical properties by the addition of natural fibres in starch-based sustainable biocomposites / G. M. Alvarez-Castillo et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. Vol. 41, Iss. 10. P. 1545–1553.
5. Study of the Influence of the Almond Shell Variety on the Mechanical Properties of Starch-Based Polymer Biocomposites / A. Valdes et al. *Polymers*. 2020. Vol. 12, Iss. 9. Art. 2049.
6. Ma X., Yu J., Kennedy J. F. Processing and mechanical properties of natural fiber reinforced thermoplastic starch biocomposites. *Carbohydrate Polymers*. 2005. Vol. 62, Iss. 1. P. 19–24.
7. Biocomposites from wheat proteins and fibers: Structure/mechanical properties relationships / S. Lepifre et al. *Industrial Crops and Products*. 2004. Vol. 20, Iss. 2. P. 179–186.
8. Müller P., Schutzius M. M., Heeren A. Microstructural and mechanical properties of biocomposites made of native starch granules and wood fibers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012. Vol. 125, Iss. S1. P. E230–E239.
9. Waterschoot J., Gommès B. C., Delcour J. A. Microstructural and mechanical properties of biocomposites made of native starch granules and wood fibers. *Starch - Stärke*. 2015. Vol. 67, Iss. 3-4. P. 314–322.

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

10. Collins M., Kristensen J. B., Thygesen L. G. et al. Variation in the chemical composition of wheat straw: the role of tissue ratio and composition. *Biotechnology for Biofuels*. 2014. Vol. 7. P. 121.

11. Janowska-Renkas E., Król A., Pochwała S. et al. Advances in straw biomass composition and utilization. *Sustainability*. 2021. Vol. 15, Iss. 1.

12. Tan J., Li Y., Tan X. et al. Advances in Pretreatment of Straw Biomass for Sugar Production. *Frontiers in Chemistry*. 2021.

13. Singh S., Dutt D., Tyagi C. H. Complete characterization of wheat straw for pulp and paper making. *BioResources*. 2011. Vol. 6, Iss. 1. P. 154–177.

					БР 0426.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40