

**Міністерство освіти і науки України**

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

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

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ  
БІОКОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ГЛЮТИНОВОЇ  
МАТРИЦІ / DEVELOPMENT OF FORMING  
TECHNOLOGY OF BIOCOMPOSITES BASED ON  
GLUTIN MATRIX**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи Мм – 21  
**Сергійчук Денис Іванович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

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

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
к.т.н., доцент  
Гарант освітньої програми:  
Мельничук Микола Дмитрович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2025 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Імбирович Н.Ю.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

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

\_\_\_\_\_ Сергійчуку Денису Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка технології формування біокомпозитів на основі глютинової матриці

керівник роботи \_\_\_\_\_ Садова О.Л., к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “05” 06.2025 р. № 282/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи  
«06» грудня 2025 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 – Мета та завдання роботи (1 л. ф. А4);

Слайд 2 – Методики досліджень (1 л. ф. А4);

Слайди 3-9 – Результати досліджень (7 л. ф. А4);

Слайд 10 – Загальні висновки (1 л. ф. А4);



## АНОТАЦІЯ

Сергійчук Д.І. Розробка технології формування біокомпозитів на основі глютинової матриці. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку літератури та додатків.

В даній кваліфікаційній роботі встановлено оптимальний режим формування біокомпозитів. Визначено механічні властивості біокомпозитів залежно від співвідношення компонентів наповнювача та кісткового клею). Досліджено вплив термічної обробки на механічні властивості біокомпозитів. Досліджено ударну в'язкість біокомпозитів залежно від тиску пресування.

Магістерська робота складається з пояснювальної записки та додатків. Пояснювальна записка містить 51 сторінку, 20 рисунків, 5 таблиць та включає список з 33 літературних джерел. Графічна частина складається з 10 листів формату А4, представлених у додатку А.

Ключові слова: біокомпозит, кістковий клей, подрібнена солома, деревне борошно, термічна обробка, міцність на стискання, ударна в'язкість.

					MP 1025.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка технології формування біокомпозитів на основі глютинової матриці	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробила	Сергійчук						3	51
Перевірив	Садова							
Н. Контр	Мисковець							
Затв.	Імбірович							
						ЛНТУ, каф. матеріалознавства гр. ПМм-21		

## ANNOTATION

Serhiychuk D.I. Development of forming technology of biocomposites based on gluten matrix. Manuscript.

Master's qualification work of EP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Master's qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, list of references and applications.

In this qualification work, the optimal mode of formation of biocomposites was established. The mechanical properties of biocomposites were determined depending on the ratio of filler and bone glue components. The influence of heat treatment on the mechanical properties of biocomposites was studied. The impact strength of biocomposites was studied depending on the pressing pressure. The master's thesis consists of an explanatory note and appendices. The explanatory note contains 51 pages, 20 figures, 5 tables and includes a list of 33 literary sources. The graphic part consists of 10 sheets of A4 format, presented in Appendix A.

Keywords: biocomposite, bone glue, crushed straw, wood flour, heat treatment, compressive strength, impact toughness.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ .....	7
1.1 Огляд природних матриць для формування біокомпозитних матеріалів ...	7
1.2. Вплив параметрів на властивості біокомпозитів .....	11
1.3 Висновки і постановка задач дослідження.....	15
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	17
2.1. Характеристика вихідних матеріалів .....	17
2.2. Методи дослідження властивостей та структури біокомпозитів .....	22
2.3. Технологія отримання біокомпозитних зразків.....	23
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА .....	27
3.1. Дослідження міцності на стискання біокомпозитів залежно від вмісту наповнювачів та температури термічної обробки .....	27
3.2. Дослідження ударної в'язкості біокомпозитів, сформованих за різного тиску пресування, залежно від типу наповнювача.....	43
3.3. Порівняльний аналіз розроблених біокомпозитів із аналогами .....	45
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48
ДОДАТКИ	

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

## ВСТУП

У сучасному світі, де екологічні виклики набувають глобального масштабу, біокомпозити стають перспективною альтернативою традиційним матеріалам. Їх використання є актуальним з огляду на потребу в сталому розвитку, зменшення залежності від сировинних ресурсів та впровадження екологічно безпечних технологій.

Біокомпозити – це матеріали, створені на основі природних полімерів (наприклад, крохмалю, целюлози, лігніну) з додаванням наповнювачів рослинного або мінерального походження. Вони поєднують у собі механічну міцність, легкість, біорозкладність і можливість вторинної переробки.

Біокомпозитні матеріали використовують відновлювані ресурси, мають менший вплив на навколишнє середовище та можуть використовуватися в різних галузях промисловості, таких як упаковка, будівництво та автомобілебудування. Прикладами рослинних матеріалів, що використовуються, є конопі, льон, бамбук, стебла кукурудзи та рисове лушпиння.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

# РОЗДІЛ 1

## ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

### 1.1. Огляд природних матриць для формування біокомпозитних матеріалів

Біовідходи з домогосподарств та промисловості є великою проблемою для світу, проте перетворення їх на цінні композитні матеріали може запропонувати перспективний підхід до її вирішення. Це передбачає перетворення відходів з різних біоджерел, таких як целюлозні відходи від сільського господарства та лісництва, хітинові відходи з морепродуктів та грибів, а також кератинові відходи з волосся, нігтів та пір'я, на натуральні волокна. Ці волокна потім ефективно змішуються з іншими матеріалами для створення композитних матеріалів з унікальними властивостями, такими як висока міцність та жорсткість, добра тепло- та електропровідність, а також кращі бар'єрні властивості. Розробка цих матеріалів не тільки корисна для навколишнього середовища, оскільки зменшує кількість відходів на звалищах та залежність від невідновлюваних ресурсів, але й може мати економічний сенс для виробників [1].

Природні матриці для біокомпозитів включають біополімери, такі як крохмаль, целюлоза та хітозан, а також біорозкладні полімери на основі нафти, такі як полімолочна кислота (PLA) та полікапролактон (PCL). Інші варіанти включають соєвий білок, натуральний латекс, хітин та біологічні епоксидні смоли, які можна поєднувати з різними натуральними волокнами для створення біокомпозитного матеріалу з покращеними структурними характеристиками [2].

Одним із найпоширеніших прикладів для формування біополімерної матриці є крохмаль. Його легко добути, він дешевий і широко доступний, тому часто використовується як матриця. Крохмаль легко добувається з куку-

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

рудзи, картоплі, пшениці та інших рослин, що робить його економічно вигідним і екологічно чистим матеріалом. Проте його механічні властивості поступаються іншим матеріалам, що обмежує сферу застосування. Водночас біорозкладність крохмалю є однією з найвищих серед біополімерів: крохмаль швидко розкладається в природному середовищі, не залишаючи токсичних залишків [2, 3].

Завдяки своїй хімічній структурі, крохмаль добре змішується з іншими компонентами, особливо після модифікації. Проте в натуральному вигляді він має низьку водостійкість і обмежену механічну міцність. Це означає, що біокомпозити на основі крохмалю можуть втрачати форму або розм'якшуватись при контакті з вологою. Щоб покращити ці властивості, крохмаль часто модифікують, наприклад, ацетилюють або змішують з іншими полімерами, такими як PLA чи PCL [4, 5].

Механічні властивості крохмальної матриці залежать від її концентрації та способу обробки. Обробка крохмалю як матриці потребує точного контролю вологості та температури. При надмірному нагріванні він може втратити свої властивості, а при недостатньому – не забезпечити належну адгезію. Тому технологи часто додають пластифікатори або стабілізатори, щоб покращити його термопластичність і довговічність [3, 5].

Ще одним доступним варіантом для формування полімерної матриці є целюлоза. Вона є основним компонентом клітинних стінок рослин і може бути виділена з деревини або бавовни. Завдяки своїй структурі целюлоза забезпечує достатню міцність і стабільність. Завдяки своїй волокнистій структурі та здатності формувати міцні міжмолекулярні зв'язки, зокрема водневі, целюлоза забезпечує [6, 7]:

- стабільність біокомпозиту (матеріал не деформується або не розпадається під дією навантажень);
- стабільність під час обробки (целюлозні матриці добре поведуться під час пресування, формування або екструзії);

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

– стабільність у вологому середовищі (хоча целюлоза гігроскопічна, її модифіковані форми можуть бути стійкими до набухання).

Цікавим прикладом для формування біополімерної матриці є хітозан. Його отримують з хітину, який міститься в панцирах ракоподібних. Завдяки своїй біосумісності, біорозкладності та здатності до хімічної модифікації, хітозан є перспективним матеріалом для створення біополімерних матриць у різних галузях науки та промисловості. Основні властивості, корисні для біополімерної матриці: гідрофільність (добре поглинає воду, що корисно для медичних імплантів), антимікробна активність (пригнічує ріст бактерій і грибів), формування плівок, гелів, мікросфер (дозволяє створювати різноманітні форми для доставки ліків або захисту рослин), хімічна модифікація (можна додавати функціональні групи для покращення властивостей). Переваги використання хітозану в біокомпозитах [8, 9]:

– можливість поєднання з іншими біополімерами (желатин, альгінат, PLA);

– регульована пористість і механічна міцність;

– екологічна безпечність і відновлюваність ресурсу.

Соевий білок є ще один природний кандидат. Він утворює матрицю на основі білка, що дозволяє створювати матеріали з унікальними властивостями, хоча його стабільність може залежати від умов навколишнього середовища. Властивості соєвого білка як основи матриці композиту [10, 11]:

– плівкоутворення: соєвий білок здатен формувати гнучкі, прозорі плівки.

– біорозкладність: повністю розкладається мікроорганізмами.

– біосумісність: не викликає токсичних реакцій, хоча може мати алергенний потенціал.

– механічні властивості: залежні від умов сушіння, пластифікаторів (гліцерин, сорбіт), рН і температури.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

– чутливість до вологи: плівки на основі соєвого білка гігроскопічні, що обмежує їх застосування без модифікації.

Кістковий клей належить до групи глютинових клеїв тваринного походження. Його виготовляють із очищених і знежирених кісток, рогів або копит тварин. Основу клею становлять білки – переважно колаген, який при гідролізі утворює желатиноподібну речовину.

Властивості кісткового клею:

- висока адгезія до деревини, паперу, тканин.
- температура використання: 50...70 °С – клей застосовується лише в гарячому стані.
- водорозчинність: легко розчиняється у воді, але не є водостійким.
- біорозкладність: повністю розкладається природними шляхами.
- біосумісність: може використовуватись у реставраційних роботах, але не в медичних імплантах.

Обмеження використання кісткового клею: низька водостійкість, складність приготування (потребує замочування, нагрівання, постійного контролю температури), обмежена термостійкість (при перегріві втрачає властивості) [12, 13].

Окрім природних біополімерів, існують синтетичні, але біорозкладні варіанти, які також отримують з біологічних джерел. Наприклад, PLA – полімолочна кислота, яку виготовляють із кукурудзяного або цукрового крохмалю. Вона широко використовується в упаковці, 3D-друці та медицині. PCL – полікапролактон – ще один біорозкладний поліестер, що вирізняється гнучкістю та стабільністю.

Вибір матриці – це завжди баланс між трьома ключовими факторами: продуктивністю (механічні властивості кінцевого матеріалу залежать від того, як матриця взаємодіє з волокнами), біорозкладністю (саме матриця визначає, чи буде продукт екологічно чистим) та обробкою (хоча біополімери мають

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

багато переваг, їх обробка може бути складнішою порівняно з традиційними синтетичними матеріалами).

Основні функції матриці включають [14]:

- захист арматури як під час виробничого процесу, так і під час використання;
- запобігання вигину волокон, утримання їх на відповідних відстанях для ефективноної передачі навантажень;
- перерозподіл напружень та запобігання поширенню тріщин, що сприяє довговічності композиту.

## 1.2. Вплив параметрів на властивості біокомпозитів

Загальні властивості композитних матеріалів залежать від кількох важливих факторів (рисунок 1.1) [15].

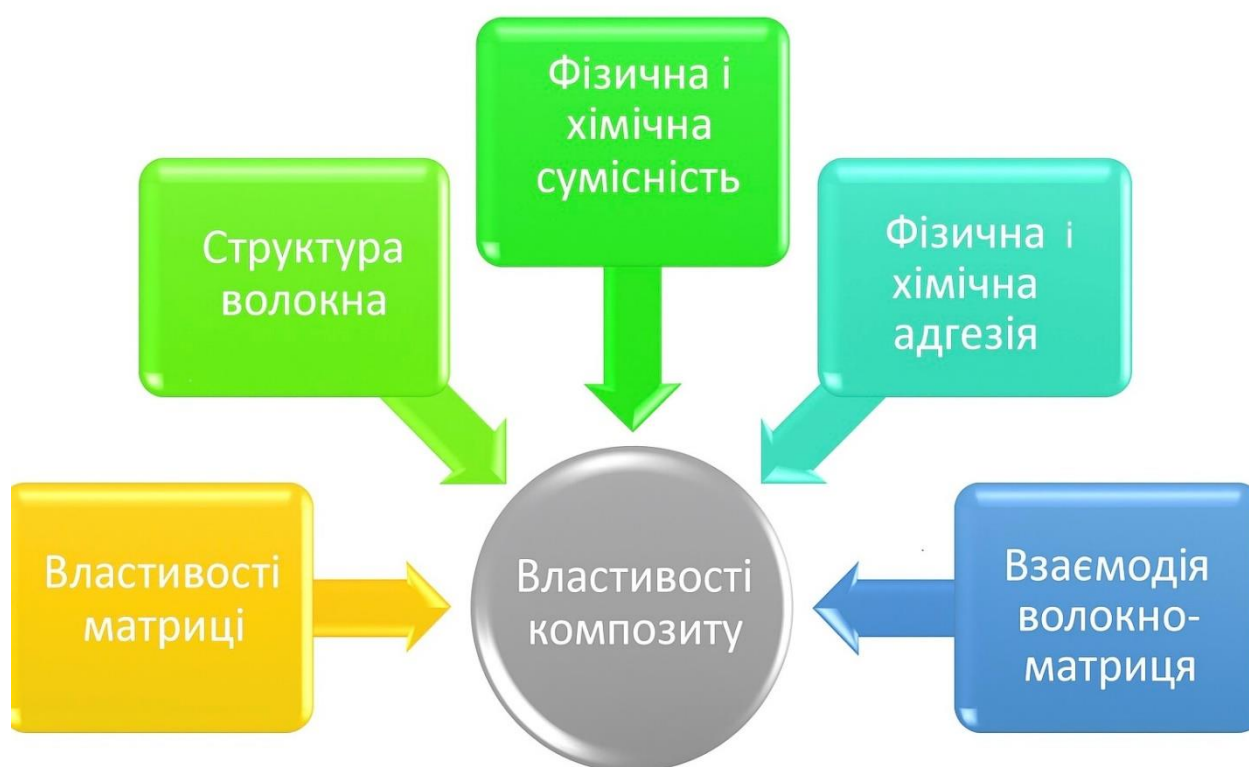


Рисунок 1.1 – Властивості біокомпозитів

Кожен компонент композиту, будь то матриця, армування чи технологічна добавка, повинен бути ретельно підібраний виходячи з конкретних вимог застосування. Рівномірність розподілу складових фаз безпосередньо впливає на здатність матеріалу поглинати та перерозподіляти механічні навантаження. Молекулярний контакт та когезія на межі розділу волокно-матриця є важливими для загальної продуктивності композитного матеріалу. Тому важливо вибирати комбінації матеріалів, які запобігають руйнівним впливам, таким як небажані хімічні реакції [15].

Властивості композитних матеріалів значною мірою залежать від характеристик складових матеріалів, їх розподілу та взаємодії.

Описуючи композитний матеріал як систему, окрім визначення складових матеріалів та їхніх властивостей, важливо згадати геометрію арматури. Її можна описати формою, розмірами (пропорціями) та розподілом (розміром та концентрацією). Системи, що містять арматуру з однаковою геометрією, можна розрізнити за концентрацією, розподілом концентрацій та орієнтацією арматури. Форму дискретної одиниці переривчастої фази можна апроксимувати сферами або циліндрами, і загалом арматура, як природна, так і промислова, нагадує призматичні перерізи [16].

Орієнтація армування впливає на ізотропію системи. Коли армування представлене частинками приблизно однакового розміру, композит поводить себе як ізотропний матеріал, з властивостями, незалежними від напрямку. Якщо частинки мають нерівний розмір, композит стає квазіізотропним, особливо у випадку армування з випадково орієнтованими короткими волокнами. У композитах, армованих довгими та безперервними волокнами, такими як од-носпрямовані, анізотропія стає ключовою характеристикою. Основною перевагою цих композитів є можливість контролювати анізотропію шляхом проектування та виробництва.

Розподіл концентрації частинок стосується просторового співвідношення між ними, вимірюючи однорідність та однорідність системи.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Частинки повинні бути рівномірно розподілені в композиті, щоб утворювати безперервну мережу, яка їх з'єднує, що можливо при низьких концентраціях і має значний вплив на електричні властивості композитів [17].

На властивості біокомпозитів (рисунок 1.2) впливає низка ключових параметрів, включаючи тип складових матеріалів, їх пропорції та розподіл волокон. Біорозкладна матриця, така як полімери PLA або PHA, разом з натуральними волокнистими армуючими елементами визначають механічну та теплову поведінку матеріалу. Крім того, розмір і форма волокон, а також їх орієнтація в матриці, відіграють суттєву роль в ізотропії та анізотропії біокомпозиту.

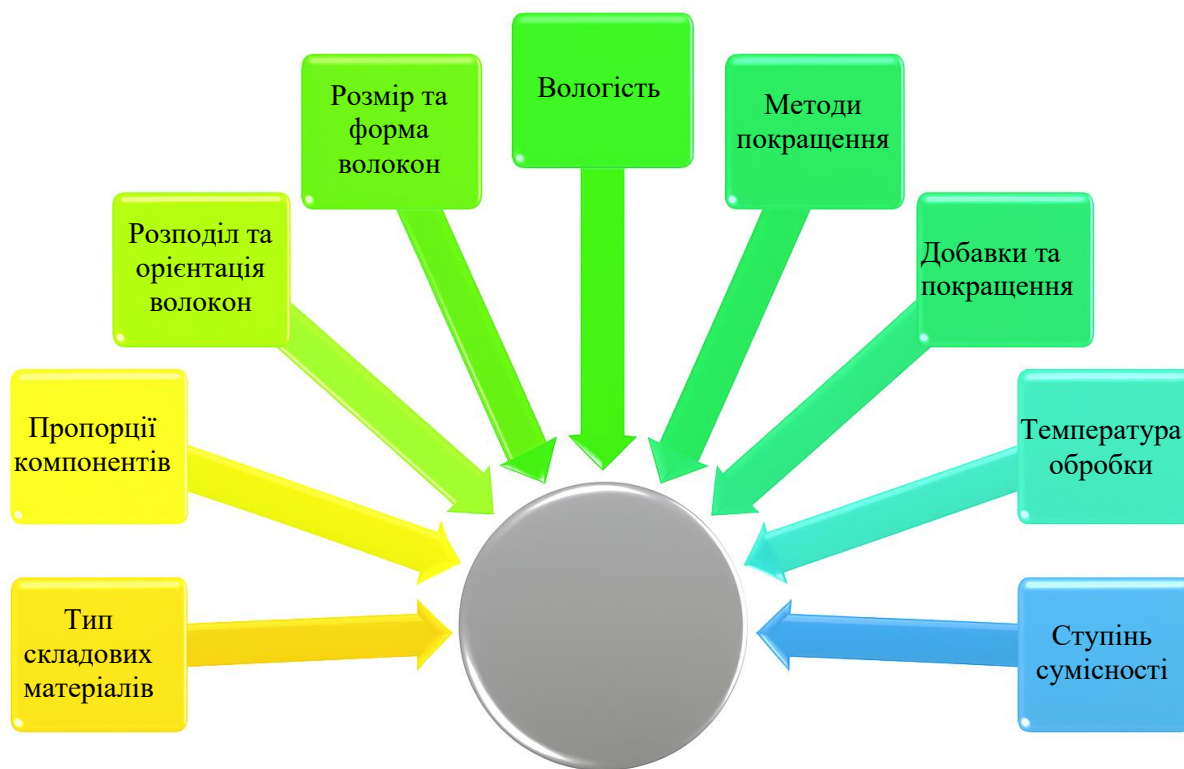


Рисунок 1.2 – Параметри, що впливають на властивості біокомпозитів

Вологість та температура обробки впливають як на кінцеві властивості, так і на стабільність матеріалу, тоді як ступінь сумісності між матрицею та армуванням впливає на адгезію та передачу напружень. Тому глибоке ро-

зуміння цих параметрів є важливим для розробки біокомпозитів з оптимальними характеристиками для різних застосувань [14].

Переваги композитних матеріалів.

Забезпечують одночасне проектування та оптимізацію як властивостей матеріалів, так і структурної конфігурації компонентів.

Пропонують широкий спектр регульованих змінних, що сприяє багатопільовій оптимізації за допомогою комплексних та передових аналітичних методів. Компоненти, виготовлені з композитних матеріалів, демонструють підвищену експлуатаційну безпеку та надійність.

Демонструють високі механічні характеристики як за статичних, так і за динамічних умов навантаження, у поєднанні з вигідним співвідношенням міцності до ваги, яке перевершує більшість традиційних матеріалів.

Деякі композитні матеріали можна розробити таким чином, щоб вони зберігали свою цілісність та експлуатаційні характеристики в агресивних середовищах протягом тривалого часу.

Демонструють чудові можливості гасіння вібрацій, що сприяє зменшенню шуму та покращує довговічність конструкції.

Хоча армуючі волокна зазвичай демонструють низьку в'язкість, це обмеження компенсується пластичністю матриці та розсіюванням енергії на межі між волокнами та матрицею.

Мають значну хімічну стабільність і зберігають високу міцність за підвищених температур (наприклад, кевларові волокна витримують температури до 500 °C, тоді як керамічні волокна, такі як  $Al_2O_3$  та SiC, зберігають структурну цілісність між 1400 °C і 2000 °C).

Характеризується низькою щільністю порівняно з металевими матеріалами, що сприяє загальному зниженню ваги в різних застосуваннях.

Забезпечують високу стійкість до поширення тріщин та зносу, що забезпечує тривалий термін служби в механічно складних умовах.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Забезпечують регульований коефіцієнт теплового розширення, що забезпечує сумісність з різними матеріалами та умовами навколишнього середовища.

Мають чудову стійкість до атмосферних впливів, що робить їх придатними для тривалого використання на відкритому повітрі.

Можуть бути виготовлені у складних геометріях та налаштовані відповідно до конкретних функціональних вимог.

Демонструють виняткову довговічність у суворих умовах, включаючи морські, хімічні та цивільні інфраструктурні застосування [18, 19].

Біокомпозитні матеріали пропонують низку суттєвих переваг порівняно з традиційними матеріалами, особливо в контексті сталого розвитку та захисту навколишнього середовища. По-перше, вони біорозкладні, тобто природним чином розкладаються в біологічному середовищі, зменшуючи вплив на забруднення. Крім того, біокомпозити виготовляються з відновлюваних ресурсів, що сприяє циркулярній економіці. Механічні властивості біокомпозитів можуть перевершувати властивості звичайних пластмас, пропонуючи хорошу міцність і гнучкість, що ідеально підходить для широкого спектру застосувань, від упаковки до конструкційних компонентів. Крім того, біокомпозити можна налаштувати відповідно до конкретних вимог різних застосувань, маючи чудові можливості щодо гасіння вібрацій та стійкості до різних атмосферних умов. Ці переваги роблять їх дедалі популярнішим вибором у сучасних галузях промисловості, де інновації та сталий розвиток є ключовими пріоритетами [14].

### 1.3. Висновки і постановка задач дослідження

Біокомпозити, підкатегорія композитних матеріалів, являють собою сучасне та екологічне рішення. Вони використовують натуральні волокна та

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

біорозкладні матриці для виробництва міцних матеріалів, що вирішують сучасні проблеми, пов'язані зі сталим розвитком та зменшенням вуглецевого сліду. Натуральні волокна, такі як льон, коноплі або бамбук, забезпечують біокомпозитам механічну міцність та жорсткість, тоді як біорозкладні матриці (натуральні або синтетичні полімери) забезпечують зчеплення матеріалу та сприяють його екологічним властивостям. На відміну від традиційних композитів, виготовлених із синтетичних волокон та матриць на основі нафти, біокомпозити можуть бути інтегровані в циклічний життєвий цикл, будучи перероблюваними або компостованими.

Біокомпозитні матеріали продовжують знаходити все більшого застосування завдяки своїй гнучкості дизайну, чудовим властивостям та естетичній привабливості. Однак застосовність цих біокомпозитів залежить від взаємодії на межі розділу волокно-матриця.

В магістерській роботі необхідно було вирішити наступні завдання:

- встановити оптимальний режим формування біокомпозитів;
- визначити механічні властивості біокомпозитів залежно від співвідношення компонентів наповнювача та кісткового клею);
- дослідити вплив термічної обробки біокомпозитів на їх механічні властивості;
- дослідити ударну в'язкість біокомпозитів залежно від тиску пресування;
- порівняти механічні властивості розроблених біокомпозитів з відомими аналогами.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

## РОЗДІЛ 2

### ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Характеристика вихідних матеріалів

Кістковий клей – це білковий клей тваринного походження, який отримують шляхом тривалого кип'ятіння демінералізованих кісток. Його основою є колаген, що при гідролізі перетворюється на глютин, який забезпечує клейові властивості. У сухому вигляді він має вигляд плиток або гранул жовтувато-бурого кольору, ламкий на злам і з характерним білковим запахом. Перед використанням клей замочують у воді, а потім розчиняють на водяній бані при температурі близько 60...70 °С, отримуючи густу колоїдну масу [20].

Зазвичай поставляється кістковий клей в гранулах (рисунок 2.1, а). Як вихідний матеріал для формування біополімерної матриці використано подрібнений кістковий клей (рисунок 2.1, б).

За класифікацією кістковий клей належить до білкових клеїв разом із міздровим, який виготовляють із обрізків шкіри, сухожиль та хрящів. Міздровий клей вважається міцнішим, проте кістковий має ширше промислове застосування завдяки дешевшій сировині. Його випускають у різних формах – плитках, гранулах, порошку – і поділяють на сорти залежно від прозорості та кольору: світлі сорти вважаються якіснішими, темні – менш міцними [21].

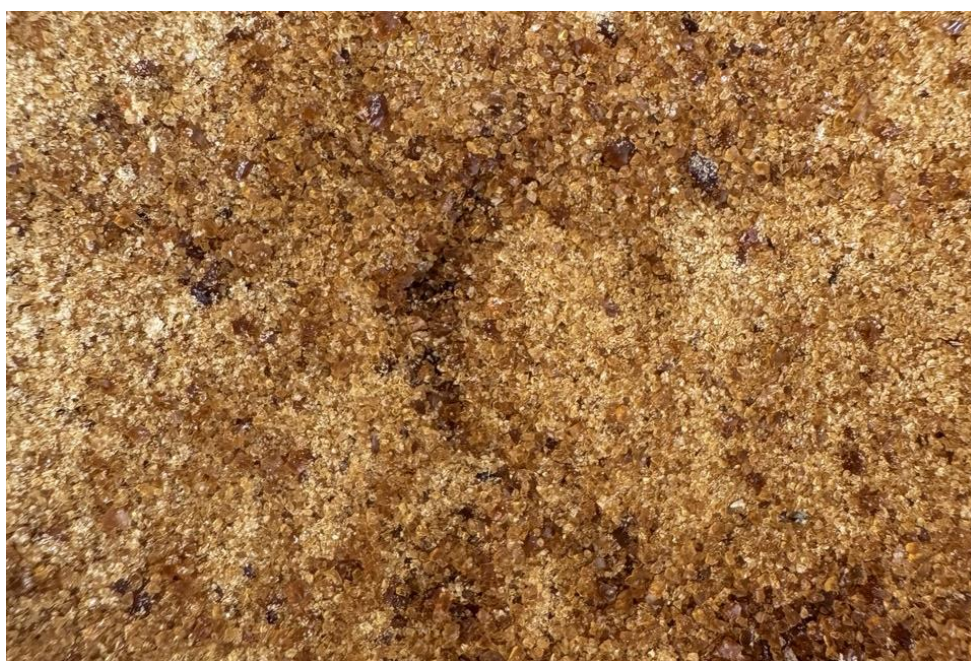
Основними характеристиками кісткового клею є висока адгезія до деревини, картону, тканини та шкіри, утворення міцного, але крихкого шва, який втрачає властивості при зволоженні. У сухому стані він може зберігатися тривалий час, проте у водному розчині швидко псується, тому для запобігання розвитку мікроорганізмів додають антисептики – фенол, буру чи інші речовини. Еластичність клею можна підвищити додаванням

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

гліцерину, що робить плівку більш пружною. Важливою особливістю є його натуральність та біорозкладність, адже він не містить синтетичних полімерів [22, 23].



а



б

Рисунок 2.1 – Вигляд кісткового клею в гранулах (а) та подрібненого (б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 1025.00.000 ПЗ

Арк.

18

Застосування кісткового клею охоплює багато сфер. У столярних роботах його використовують для склеювання меблів, фанери та шпону. У поліграфії він служить для переплетення книг та виготовлення картонних виробів. У реставрації клей незамінний для відновлення старовинних меблів, музичних інструментів і картин. У художніх техніках, зокрема в іконописі, він входить до складу левкасу та використовується як ґрунт для живопису. Крім того, кістковий клей застосовують у виробництві абразивних матеріалів, сірників, а також як побічний продукт технології для отримання желатину [22-24].

Головні переваги кісткового клею: екологічність, біорозкладність та автентичність, що робить його незамінним у реставраційних і художніх роботах. Недоліки – чутливість до вологи, схильність до псування у водному розчині та потреба у спеціальних умовах приготування [23-25].

Солома є перспективним природним наповнювачем для композитних матеріалів завдяки своїй доступності, низькій вартості та екологічності. Вона використовується як армуючий компонент у полімерних, будівельних та теплоізоляційних композитах, покращуючи їхні механічні та експлуатаційні властивості [26].

Солома – це залишки стебел зернових культур (пшениці, жита, ячменю, вівса, кукурудзи тощо), які утворюються після обмолоту зерна. Вона складається переважно з целюлози, геміцелюлози та лігніну, що забезпечує її міцність і здатність до утворення міцних зв'язків із полімерними матрицями. Завдяки високому вмісту органічних волокон солома може ефективно використовуватися як наповнювач у біокомпозитах, знижуючи щільність матеріалу та підвищуючи його теплоізоляційні властивості [26, 27].

Вона складається переважно з целюлози, геміцелюлози та лігніну, а також містить воски й кремнезем, які визначають її фізико-хімічні властивості. За своїми характеристиками солома має низьку щільність (у тюках близько 100...150 кг/м<sup>3</sup>), високу пористість і добрі теплоізоляційні

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

властивості: коефіцієнт теплопровідності становить 0,045...0,065 Вт/(м·К). Завдяки цьому вона використовується як екологічний будівельний матеріал у вигляді пресованих блоків чи панелей. Механічна міцність соломи обмежена, проте при ущільненні вона здатна витримувати навантаження, достатні для застосування у стінах малоповерхових будівель [27].

Основні властивості соломи як наповнювача включають низьку теплопровідність, невелику масу, добру адгезію до полімерних і мінеральних матриць після відповідної обробки, а також здатність зменшувати усадку та внутрішні напруги у композитах. Введення соломи у склад полімерних чи рідкоскляних композитів дозволяє зменшити гігроскопічність та водопоглинання, підвищити міцність на стиск і вигин [27, 28]. Солома застосовується як [27]:

- наповнювач у полімерних композитах (епоксидних, поліефірних, поліпропіленових), де вона знижує вартість і додає біорозкладності;
- компонент у теплоізоляційних матеріалах на основі рідкого скла, що забезпечує зменшення деформацій та розтріскування при експлуатації;
- армуючий елемент у будівельних блоках, плитах та панелях, які використовуються для екологічного будівництва;
- сировина для виготовлення біокомпозитів у поєднанні з кістковим клеєм чи іншими природними полімерними матрицями.

В роботі використано подрібнені волокна соломи (рисунок 2.2).

Деревне борошно отримується шляхом тонкого подрібнення деревини (сосна, ялина, береза, бук та інші породи). Розмір частинок деревного борошна зазвичай становить менше 1,2 мм: чим дрібніший помел, тим вища якість борошна. В складі деревного борошна переважають целюлоза, геміцелюлоза та лігнін, що забезпечує міцність і стабільність. Деревне борошно – легке, екологічне, добре змішується з полімерними матрицями, підвищує жорсткість і стабільність композитів.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б

Рисунок 2.2 – Загальний вигляд подрібненої соломи (а) та деревного борошна (б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 1025.00.000 ПЗ

Арк.

21

Деревне борошно має широке застосування завдяки своїм фізико-хімічним властивостям та екологічності. У полімерних композиціях воно використовується як наповнювач у композитах, що дозволяє підвищити жорсткість та стабільність матеріалів, а також дозволяє зменшити частку синтетичних полімерів і зробити матеріали більш екологічними для довкілля. У будівельній сфері деревне борошно входить до складу шпаклівок, замазок і клеїв, забезпечуючи їхню міцність та зручність у використанні. У хімічній промисловості воно слугує компонентом для виготовлення пластмас та прес-матеріалів, сприяючи формуванню необхідних експлуатаційних характеристик.

Таким чином, солома та деревне борошно як наповнювачі у композитах поєднує економічну вигоду, екологічність та функціональність, роблячи її перспективним матеріалом для сучасних технологій. Їх використання дозволяє створювати легкі, міцні та теплоізоляційні матеріали, які можуть замінити синтетичні наповнювачі у багатьох сферах.

## 2.2. Методи дослідження властивостей та структури біокомпозитів

«Границю міцності на стиск визначали за ISO 604:2004. Зразки у формі циліндрів діаметром  $10 \pm 0,5$  і висотою 15 мм піддавали стиску при рівномірному зростаючому зусиллі з швидкістю наближення площинок 2 мм/хв.

Межу міцності при стиску розраховували за формулою:

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

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

$S$  – площа поперечного перерізу зразка,  $\text{см}^2$ » [34].

«Ударну в'язкість визначали методом Шарпі ISO 179-1:2005. Метод базується на випробуванні, при якому зразок, що лежить на двох опорах,

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

знає удару маятника, причому лінія удару знаходиться посередині між опорами і безпосередньо навпроти надрізу у випадку зразків із надрізом. Випробування на ударний згин проводять на маятникових копрах ГОСТ 10708-82. Досліджуваний зразок складає такі розміри 60×60×10 мм.

Ударна в'язкість визначається за формулою:

$$K C = \frac{K}{S} \quad (2.2)$$

де  $K$  – робота руйнування зразка, Дж;

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

Робота, витрачену на руйнування зразка, визначають за формулою:

$$K = gl(\cos\alpha - \cos\beta) \quad (2.3)$$

де  $g$  – маса маятника, кг;

$l$  – довжина маятника, м;

$\alpha$  – кут зарядки маятника, рад;

$\beta$  – кут підйому маятника після руйнування зразка, рад;

$\gamma$  – кут підйому маятника при холостому ході, рад» [29].

### 2.3. Технологія отримання біокомпозитних зразків

Експериментальні зразки з біокомпозитних матеріалів виготовляли шляхом формування однорідної суміші, у якій поєднували всі необхідні компоненти. Співвідношення складових визначали у масових частинах. За основу брали 100 масових частин матриці, враховуючи об'єм форми для формування зразків. Перед формуванням проводили підготовку матеріалів: наповнювач спершу висушували та подрібнювали. Після подрібнення стебла повторно піддавали сушінню, щоб остаточно видалити залишкову вологу.

Гранули кісткового клею подрібнювали за допомогою механічного лабораторного подрібнювача (рисунок 2.3). Наступним етапом було проведення дозування компонентів. До попередньо просушеного

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наповнювача (волокон соломи) додавали дозовану кількість подрібненого кісткового клею та ретельно вимішували. Попередньо встановлено, що оптимальний вміст суміші для прес-форми (рисунок 2.4) становить 11 г.



Рисунок 2.3 – Лабораторний подрібнювач

Наступним етап було завантаження суміші в прес-форму під тиском. Форми затискали струбцинами для запобігання розшарування матеріалу. Зразки у формі піддавали тепловій обробці протягом 2 годин для забезпечення міцності біокмполімерів та підпресовували через кожну годину з метою забезпечення суцільності біокмполімерного матеріалу.

Для досліджень міцності при стисканні та ударної в'язкості біокмполімерів підсушену композицію запресовували у прес-форми, загальний вигляд яких поданий на рисунку 2.4 та 2.5 відповідно.

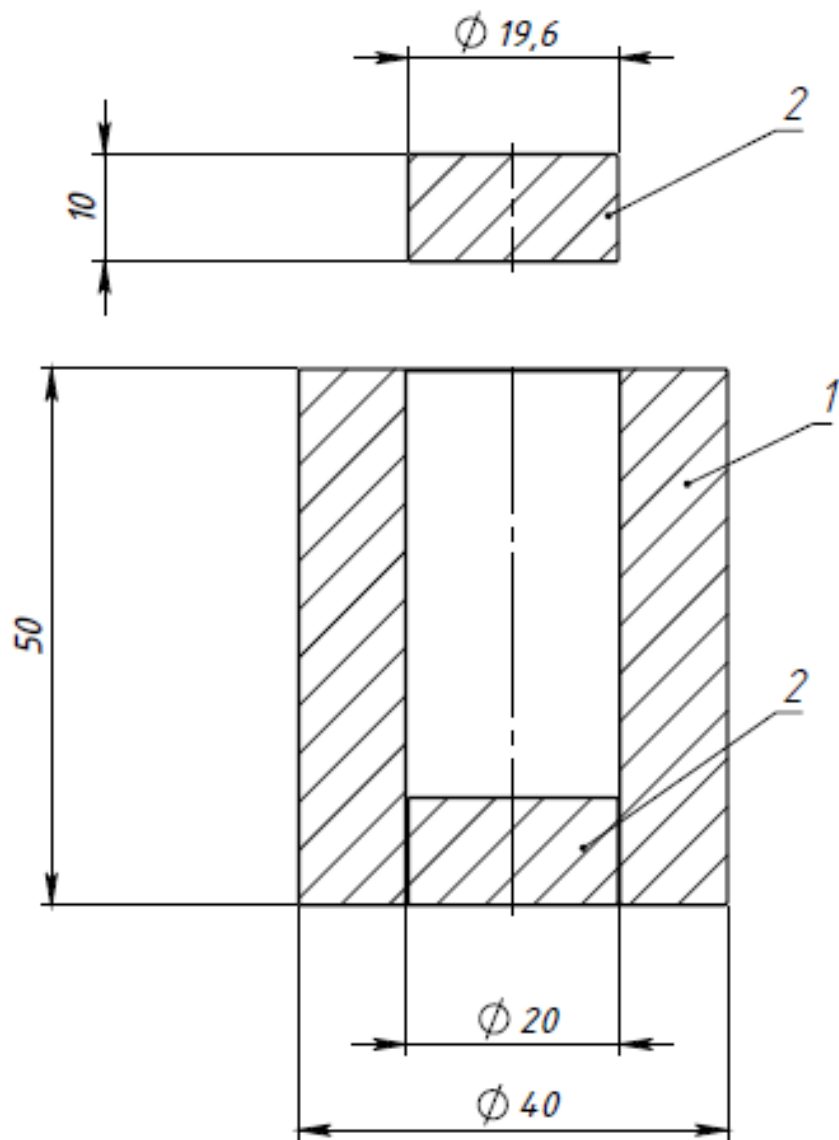


Рисунок 2.4 – Ескіз прес-форми для формування зразків біокомпозитних матеріалів для дослідження міцності на стискання

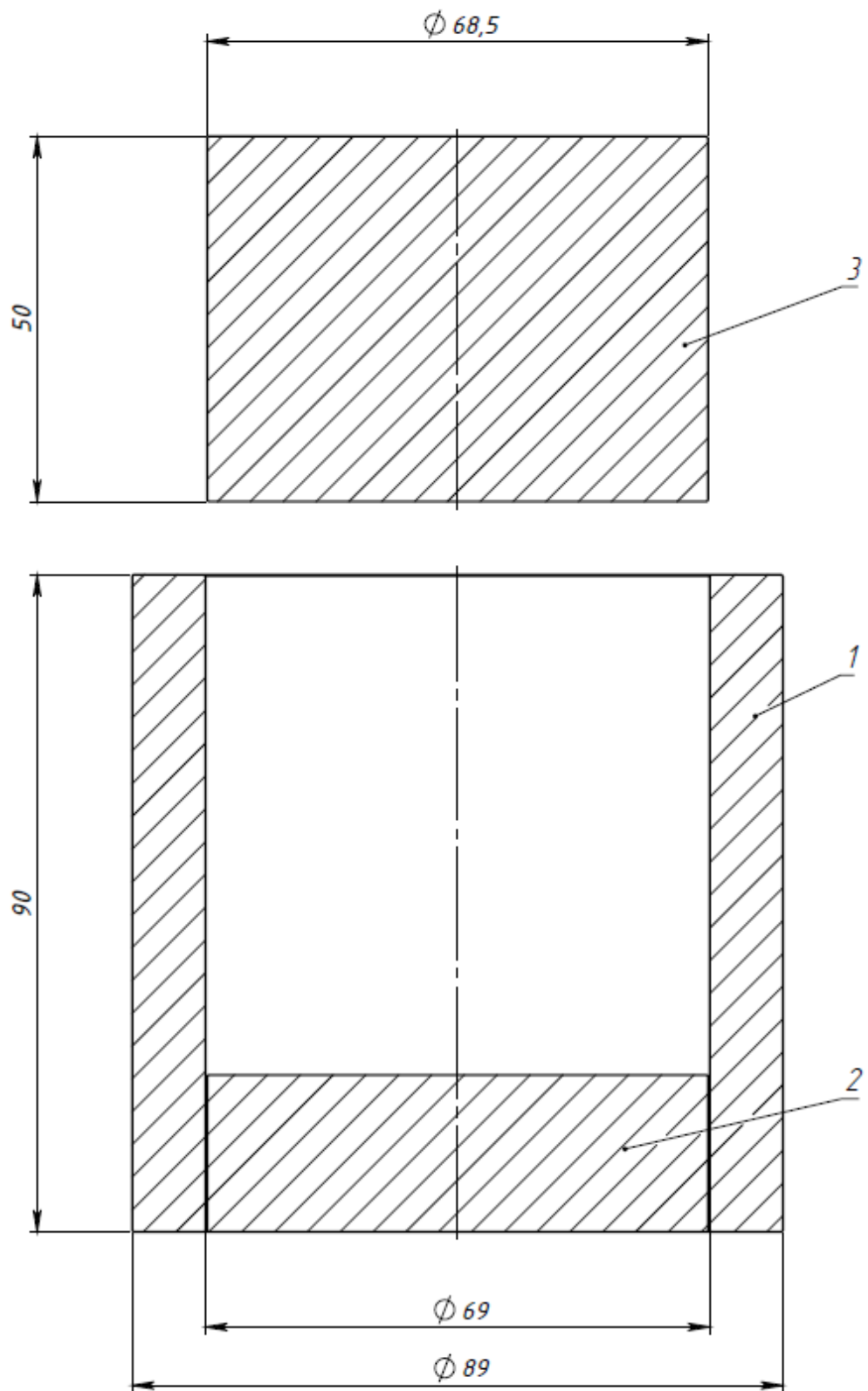


Рисунок 2.5 – Ескіз прес-форми для формування зразків біокомпозитних матеріалів для дослідження ударної в'язкості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 1025.00.000 ПЗ

Арк.

26

РОЗДІЛ 3  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Дослідження міцності на стискання біокомпозитів залежно від вмісту наповнювачів та температури термічної обробки

Технологія приготування зразків полягала в наступному. Спочатку проводили дозування компонентів, враховуючи об'єм прес-форми для формування зразків. До дисперсного наповнювача (деревне борошно) додавали воду з наступним змішуванням. Далі до отриманої вологої суміші додавали необхідний вміст кісткового клею та змішували за допомогою лабораторного змішувача. Отриману суміш заданого складу (таблиця 3.1) в кількості 11 г [30] поміщали в прес-форми. Прес-форму фіксували струбцинами для забезпечення суцільності та міцності біокомпозитного матеріалу. Далі для зразків у прес-формах проводили термічну обробку, яка полягала у нагріві до 120 °С та витримці протягом 2 годин. Кожну годину проводили додаткове підпресовування зразків. Охолодження зразків проведено в прес-формах на спокійному повітрі.

Таблиця 3.1 – Склад біокомпозитних зразків, наповнених деревним борошном

№ зразка	Вміст деревного борошна (наповнювач), мас. ч.	Вміст води, мл	Вміст кісткового клею (матриця), мас. ч.
1	100	-	100
2	100	1	100
3	100	2	100
4	100	3	100

Експериментальним методом визначення механічних властивостей полімеркомпозитних матеріалів встановлено, що найвищу міцність на

стискання 39,8 МПа (рисунок 3.1) мають біокомпозити (зразок складу № 1, таблиця 3.1), які не містять воду, оскільки вода перешкоджає формуванню зв'язків між компонентами біокомпозитного матеріалу. Воду додавали з метою полегшення процесу формування та пресування біокомпозитної композиції. В попередніх дослідженнях [31] воду використовували для формування глютинового в'язучого для підвищення технологічності формування біокомпозитів.



Рисунок 3.1 – Залежність міцності на стискання біокомпозитів від вмісту води: 1 – без води, 2 – 1 мл, 3 – 2 мл, 4 – 3 мл

Біокомпозитний зразок складу № 1 у формі циліндра після прикладання стискаючих навантажень дослідження міцності на стискання має форму «бочки» (рисунок 3.2, а), що вказує на пластичність глютинової матриці. Торці поверхні зразка є рівними. Порушень суцільності матеріалу, зокрема макротріщин, не виявлено.

Досліджено, що міцність на стискання біокомпозитів знижується в 4,5 раз з додаванням до складу води і становить 8,9 МПа для зразка складу № 2, що містить воду в кількості 1 мл. Передбачалось, що зайва волога видалиться

з об'єму зразка під час термічної обробки. Руйнування зразка супроводжується спочатку бочкоутворенням з наступним утворенням зсувної тріщини (рисунок 3.2, б).



а



б



в



г

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків, наповнених деревним борошном, після руйнування (таблиця 3.1):

а – зразок складу № 1;

б – зразок складу № 2;

в – зразок складу № 3;

г – зразок складу № 4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 1025.00.000 ПЗ

Арк.

29

Зафіксовано, що біокомпозитні матеріали складів № 3 та № 4 є не міцними, що пов'язано із високим вмістом води в матеріалах. Це не дозволило сформувати хімічні та фізичні зв'язки між компонентами біокомпозитів. Сферична форма наповнювача у вигляді порошку (деревне борошно), який є твердим, не дозволяє підвищити міцність біокомпозитних матеріалів за рахунок механічного зачеплення. Форма та висока твердість наповнювача ускладнюють процес пресування та збільшує пружну післядію.

Краї торцевої поверхонь зразків складів № 3 та № 4 (рисунок 3.2, в, г) є нерівними, що свідчить про надлишок вологи в матеріалі внаслідок чого глютинове в'язуче просочується крізь зазори в прес-формі. Руйнування зразка складу № 3, який містить 2 мл води, супроводжується плющенням з наступним утворенням макротріщин під дією стиску (рисунок 3.2, в). Руйнування зразка складу № 4, що містить 3 мл води, супроводжується плющенням та наступним зсувом верхньої частини зразка (рисунок 3.2, г) внаслідок низької міцності біокомпозитного матеріалу.

Розроблено склади біокомпозитних матеріалів (таблиця 3.2), наповнених подрібненою соломою, з метою визначення оптимального співвідношення компонентів, що дозволить отримати високу міцність біокомпозитів. Подрібнена солома є наповнювачем волокнистого типу, що дозволить утворити механічне зачеплення, а також полегшить пресування. Біокомпозити не містять воду, яка перешкоджає структуруванню.

Таблиця 3.2 – Склад біокомпозитних зразків, наповнених подрібненою соломою

№ зразка з/п	Вміст подрібненої соломи (наповнювач), мас. ч.	Вміст кісткового клею (матриця), мас. ч.
1	100	66
2	100	83
3	100	100

Встановлено, що найвищу міцність на стискання 3,34 МПа та 1,71 МПа мають біокомпозити складу № 2 (таблиця 3.2), які містять 100 мас. ч. наповнювача та 83 мас. ч. кісткового клею, для яких проведено термічну обробку за температури 80 °С та без термічної обробки відповідно. У випадку вмісту 66 мас. ч. клею та 100 мас. ч. подрібненої соломи (зразки складу № 1), міцність на стискання є нижчою на 3..35% порівняно із біокомпозитами складу № 2. Міцність на стискання біокомпозитів складу № 1 становить 3,26 МПа та 1,26 МПа оброблених та без термічної обробки відповідно. Найнижчу міцність на стискання 3,18 МПа та 1,16 МПа мають біокомпозити складу № 3, які містять 100 мас. ч. наповнювача та 100 мас. ч. кісткового клею.

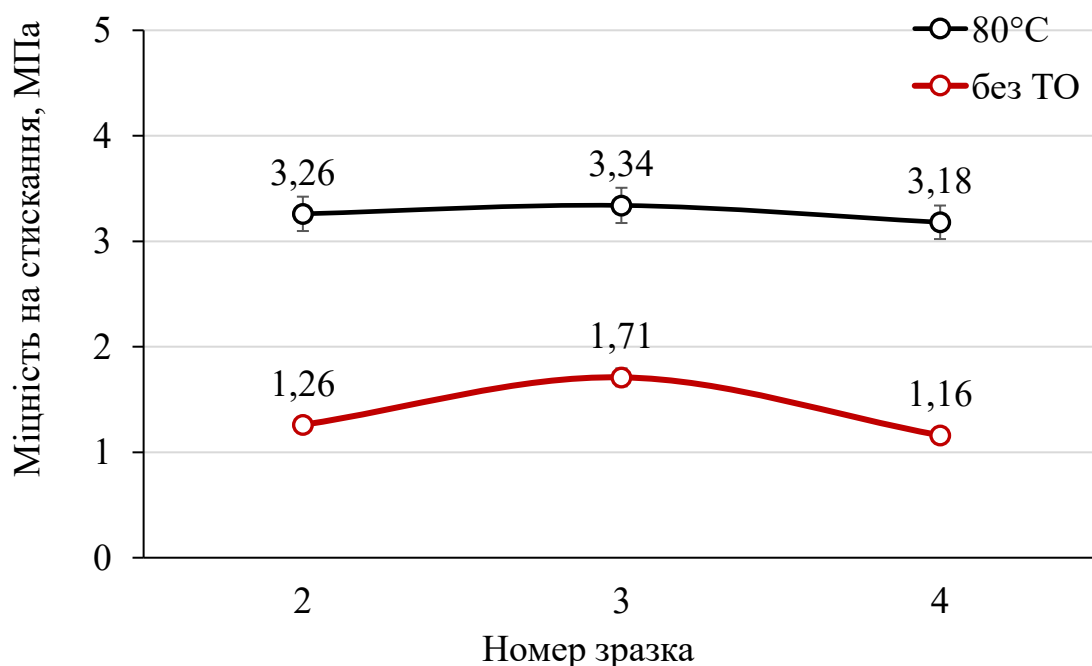


Рисунок 3.3 – Вплив термічної обробки на міцність на стискання біокомпозитів

Встановлено, що біокомпозитні зразки мають рівні поверхні (рисунок 3.4, а-в) з хаотичним щільним розміщенням волокон подрібненої соломи.



а



б



в

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків (таблиця 3.2):  
а – складу № 1; б – складу № 2; в – складу № 3

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 1025.00.000 ПЗ

Арк.

32

Для біокомпозитних матеріалів складів № 1-3 спостерігається руйнування внаслідок просідання верхньої частини зразка (рисунок 3.5) під дією стискаючого навантаження.

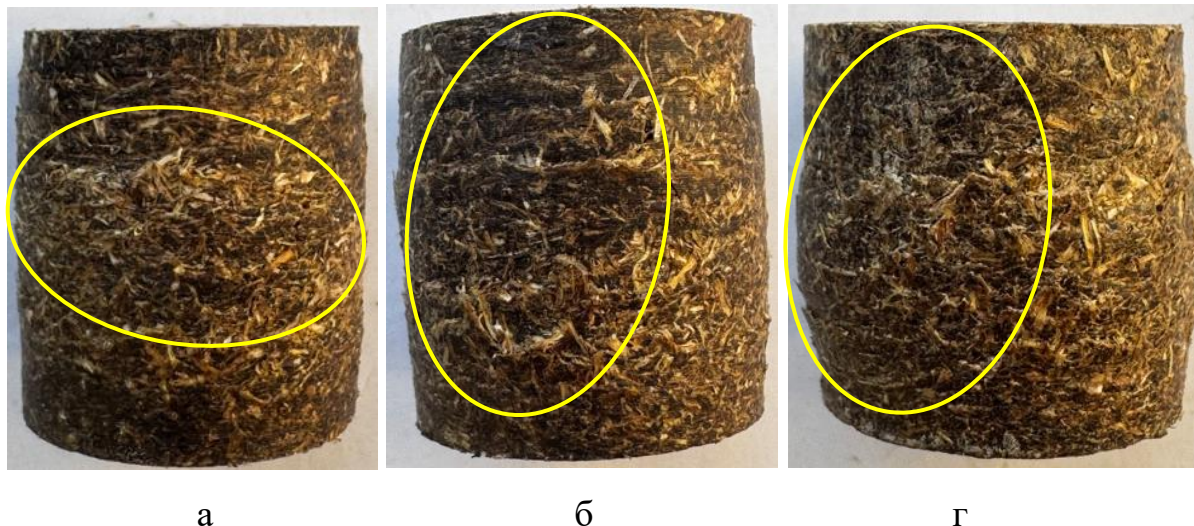


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків, наповнених подрібненою соломою, температура термічної обробки яких становила 80 °С, після руйнування (таблиця 3.2):

а – зразок складу № 1;

б – зразок складу № 2;

в – зразок складу № 3

Біокомпозитні матеріали, які піддавались термічній обробці за температури 80 °С, мають вищі в 2,0..2,7 раз значення міцності на стискання, що вказує на утворення додаткових хімічних та фізичних зв'язків під час витримки в тепловому полі. Однак отримана міцність біокомпозитних матеріалів є невисокою, що вказує на недостатньо високу температуру термічної обробки. Тому наступні дослідження розроблених біокомпозитних матеріалів, склад яких наведено в таблиці 3.3, проводили за вищих температур: 100 °С, 120 °С та 140 °С.

Таблиця 3.3 – Склад біокомпозитних зразків, наповнених подрібненою соломою

№ зразка з/п	Вміст подрібненої соломи (наповнювач), мас. ч.	Вміст кісткового клею (матриця), мас. ч.
1	100	50
2	100	66
3	100	83
4	100	100
5	100	116
6	100	133

Зафіксовано, що обробка біокомпозитних матеріалів за температури 100 °С активізує хімічну та фізичну взаємодію між компонентами матеріалу, що дозволяє підвищити міцність на стискання біокомпозитів в 14...20 разів (рисунок 3.6) порівняно із біокомпозитними матеріалами, які піддавались термічній обробці за температури 80 °С (рисунок 3.3). Вищі температури підвищують технологічність композиції, що дозволяє отримати матеріали з вищою щільністю.

Встановлено, що найвищу міцність на стискання 63,7 МПа серед біокомпозитів, які обробляли в термічному полі за температури 100 °С, мають біокомпозитні матеріали складу № 2, які містять 66 мас. ч. кісткового клею та 100 мас. ч. наповнювача. Це вказує на високий ступінь структурування біокомпозитного матеріалу за рахунок утворення великої кількості хімічних та фізичних зв'язків між компонентами системи під час термічної обробки за температури 100 °С. Міцність на стискання біокомпозитів складу № 1, які містять 50 мас. ч. кісткового клею та 100 мас. ч. наповнювача, становить 47,0 МПа, що є на 35% менше порівняно із зразком

складу № 2, для якого отриману максимальну міцність на стискання (63,7 МПа).

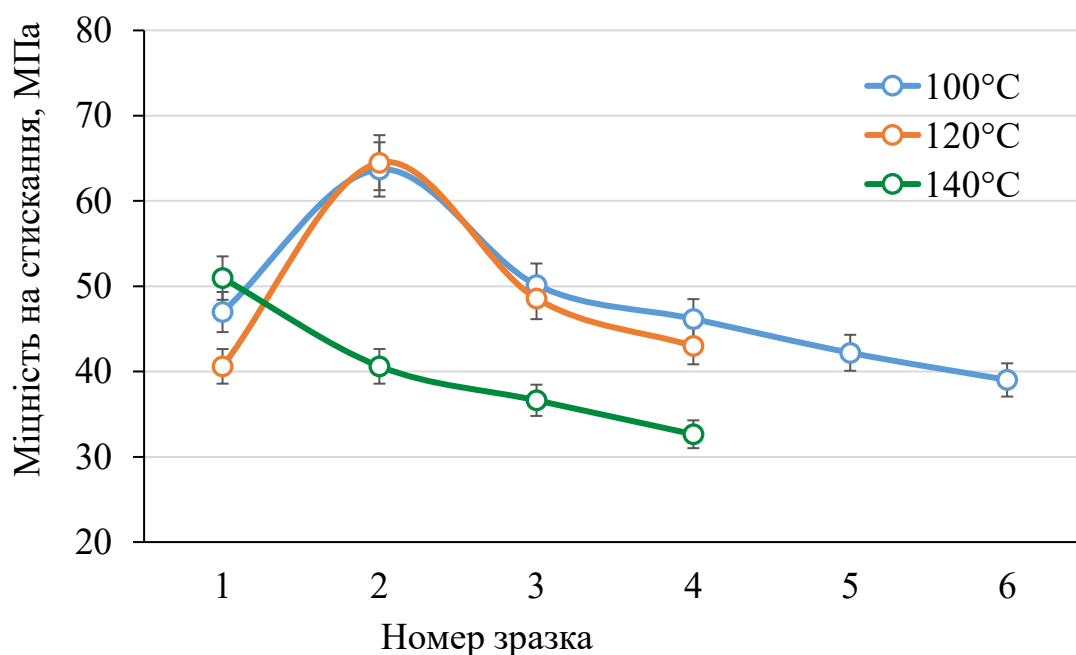


Рисунок 3.6 – Залежність міцності на стискання біокомпозитів від термічної обробки

Встановлено, що із підвищенням вмісту кісткового клею від 83 мас. ч. до 100 мас. ч., 116 мас. ч. та 133 мас. ч. відбувається поступове зниження міцності на стискання на 63% порівняно із зразком складу № 2. Міцність на стискання біокомпозитів складу № 3 становить 50,1 МПа, складу № 4 – 46,2 МПа, складу № 5 – 42,2 МПа, складу № 6 – 39,0 МПа.

Міцність на стискання біокомпозитів складу № 1 (50 мас. ч. кісткового клею та 100 мас. ч. наповнювача), оброблених в тепловому полі за температури 120 °С, становить 40,6 МПа. Із підвищенням вмісту кісткового клею до 66 мас. ч. міцність на стискання збільшується на 37%, що становить 64,5 МПа і є максимальною (вища на 1% порівняно з міцністю на стискання 63,7 МПа зразка складу № 2, який обробляли за температури 100 °С) серед досліджуваних біокомпозитів, які обробляли в тепловому полі за різних

температур. Підвищення вмісту кісткового клею в композиції до 83 мас. ч. та 100 мас. ч. призводить до зниження міцності на стискання на 33%, що пояснюється надлишковим вмістом в'язучого, яке є пластичним, а не є міцним. Міцність на стискання біокомпозитів складу № 3 становить 48,6 МПа, складу № 4 – 43,0 МПа.

Міцність на стискання 50,9 МПа біокомпозитів складу № 1 (50 мас. ч. кісткового клею та 100 мас. ч. наповнювача), оброблених в тепловому полі за температури 140 °С, є найвищою серед біокомпозитів, оброблених за даної температури. Підвищення вмісту кісткового клею в композиції до 66 мас. ч. (склад № 2), 83 мас. ч. (склад № 3) та 100 мас. ч. (склад № 4) призводить до поступового зниження міцності на стискання в 1,6 раз порівняно із біокомпозитом складу № 1 і становить 40,6 МПа, 36,6 МПа та 32,6 МПа відповідно. Міцність біокомпозиту складу № 4, який обробляли в тепловому полі за температури 140 °С, є найнижчою серед даних біокомпозитів.

Для біокомпозитних матеріалів складів № 1-3, для яких проведено термічну обробку за температури 100 °С, спостерігається руйнування внаслідок поширення поперечних тріщин (рисунок 3.7, а-в) під дією стискаючого навантаження. Аналогічний характер руйнування спостерігається для біокомпозитних зразків складів № 1 та № 3 (рисунок 3.7, г, е), які піддавали термічній обробці за температури 120 °С та зразок № 1 (рисунок 3.7, є), який піддавали термічній обробці за температури 140 °С.

Для біокомпозитного матеріалу складу № 2 (рисунок 3.7, д), який структурували за температури термічної обробки 120 °С (має найвищу міцність на стискання 64,5 МПа), руйнування відбувається шляхом утворення магістральної тріщини, її швидкого поширення та розколювання зразка на дві частини. Біокомпозити складів № 2 та № 3, які піддавали термічній обробці за температури 140 °С (рисунок 3.7, ж, з) руйнуються шляхом утворення макротріщин внаслідок плющення під дією навантаження.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36



а



б



в

Рисунок 3.7 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків (таблиця 3.3), наповнених подрібненою соломою, температура термічної обробки яких становила 100 °С, 120 °С та 140 °С, до і після руйнування:

а – зразок складу № 1,  $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

б – зразок складу № 2,  $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

в – зразок складу № 3,  $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 1025.00.000 ПЗ

Арк.

37



Г



Д



е

Рисунок 3.7, лист 2

г – зразок складу № 1,  $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

д – зразок складу № 2,  $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

е – зразок складу № 3,  $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 1025.00.000 ПЗ

Арк.

38



є



ж



з

Рисунок 3.7, лист 2

є – зразок складу № 1,  $t = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

ж – зразок складу № 2,  $t = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

з – зразок складу № 3,  $t = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 1025.00.000 ПЗ

Арк.

39

Розроблено біокомпозитні матеріали на основі кісткового клею та деревного борошна (таблиця 3.4).

Таблиця 3.4 – Склад біокомпозитних матеріалів, наповнених деревним борошном, температура термічної обробки яких становила 120 °С.

№ зразка з/п	Вміст деревного борошна (наповнювач), мас. ч.	Вміст кісткового клею (матриця), мас. ч.
1	100	50
2	100	66
3	100	83
4	100	100

Встановлено, що міцність на стискання біокомпозитного матеріалу складу № 1, який містить 100 мас. ч. деревного борошна та 50 мас. ч. кісткового клею, становить 53,3 МПа. Із підвищенням вмісту кісткового клею до 66 мас. ч. (склад № 2) міцність на стискання біокомпозиту підвищується на 10% і становить 58,9 МПа, що вказує на необхідність вищого вмісту в'язучого для утворення зв'язків між компонентами матеріалу.

Найвищу міцність на стискання 66,9 МПа отримано для біокомпозитного матеріалу складу № 3, який містить 83 мас. ч. кісткового клею. Міцність на стискання даного біокомпозитного матеріалу складу № 3, який містить деревне борошно є вищою на 4% за міцність на стискання (64,5 МПа) біокомпозитного матеріалу складу № 2 (таблиця 3.3), який містить подрібнену соломку. Це можна пояснити тим, що деревне борошно має більш однорідну структуру, вищу частку целюлози та лігніну, меншу кількість пустот і краще зчеплення з полімерною матрицею. Соломка ж містить більше геміцелюлози і воскових домішок, що знижує адгезію та механічну міцність [32, 33]. Наступне підвищення вмісту в'язучого до 100 мас. ч. в композиції призводить до зниження міцності на стискання біокомпозитного матеріалу в 1,8 раз, що становить 36,6 МПа.

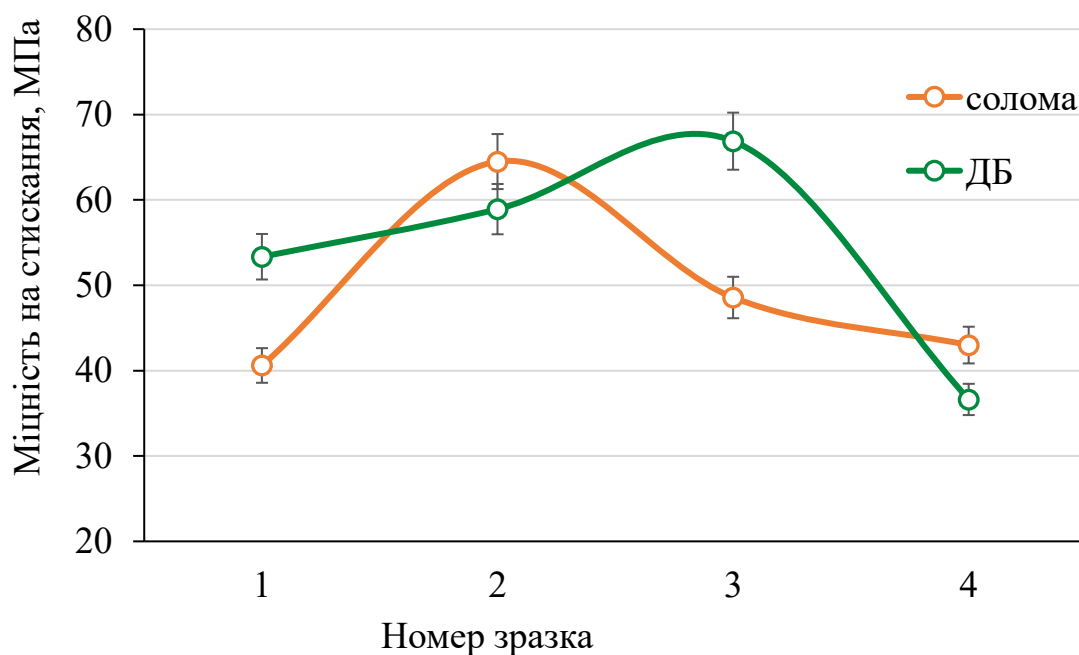
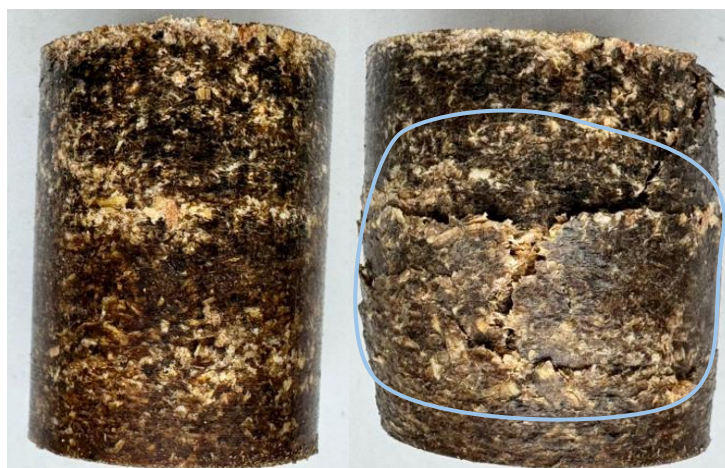


Рисунок 3.8 – Залежність міцності на стискання біокомпозитів від природи і типу наповнювача, оброблених в тепловому полі за температури 120 °С

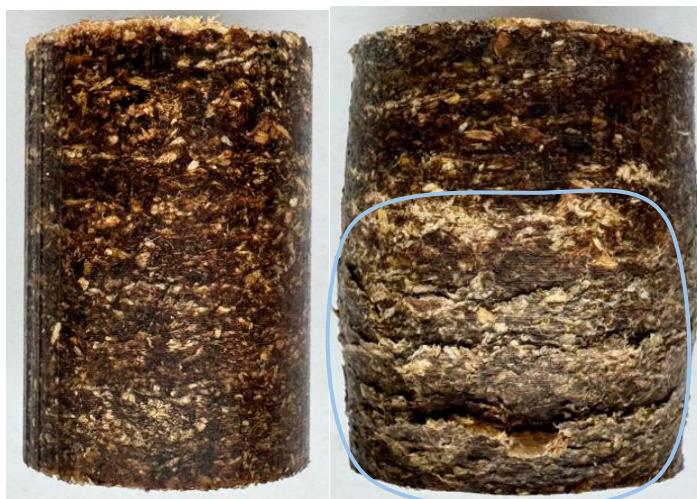
Руйнування біокомпозитних зразків відбувається у вигляді поширення макротріщин (рисунок 3.9, а, в, г) та зсуву частин матеріалу (рисунок 3.9, б).



а

Рисунок 3.9 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків, наповнених деревним борошном, температура термічної обробки яких становила 120 °С, після руйнування (таблиця 3.4):

а – складу № 1;



б



в



г

Рисунок 3.9, лист 2

б – складу № 2;

в – складу № 3;

г – складу № 4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 1025.00.000 ПЗ

Арк.

42

### 3.2. Дослідження ударної в'язкості біокомпозитів, сформованих за різного тиску пресування, залежно від типу наповнювача

Загальний вигляд біокомпозитних зразків, сформованих під тиском 11 МПа що містять в складі подрібнену солому (склад № 2, таблиця 3.3) та деревне борошно (склад № 3, таблиця 3.4), подано на рисунок 3.10, а та рисунку 3.10, б відповідно. Для даних біокомпозитів проведено термічну обробку за температури 120 °С.



а



б

Рисунок 3.10 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків:

а – солома;

б – деревне борошно

Виявлено, що ударна в'язкість біокомпозитних матеріалів з вмістом подрібненої соломи, які формували за нижчого тиску (8 МПа) становить 5,73 кДж/м<sup>2</sup> (рисунок 3.11). Ударна в'язкість біокомпозитного матеріалу з вмістом деревного борошна є вищою на 31% і становить 8,37 кДж/м<sup>2</sup>, яка є максимальною. Вищу ударну в'язкість біокомпозитів з вмістом деревного борошна порівняно з біокомпозитами з вмістом подрібненої соломи можна

пояснити кращою взаємодією кісткового клею та деревного борошна та вищою твердістю даного наповнювача порівняно із соломою.

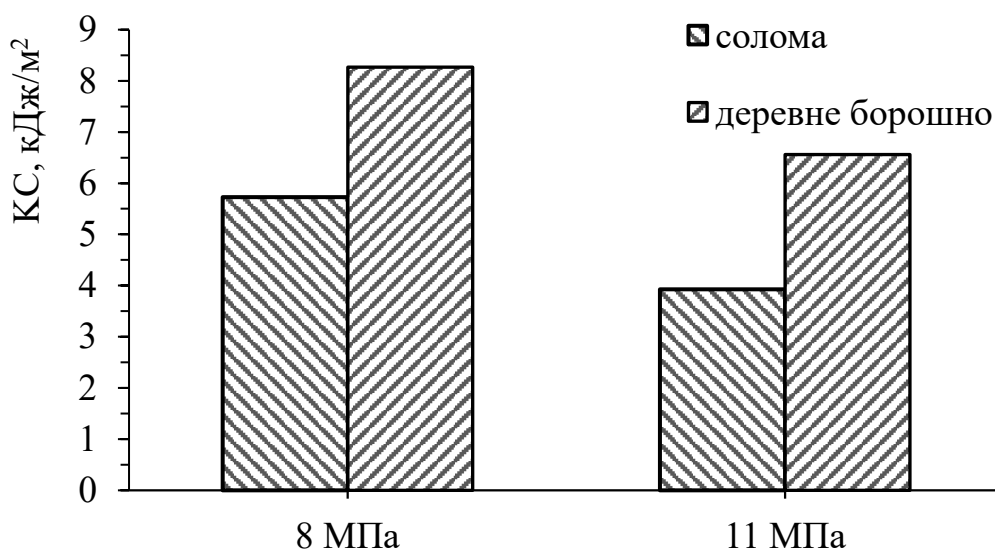


Рисунок 3.11 – Ударна в'язкість біокомпозитів, залежно від виду наповнювача

Ударна в'язкість біокомпозитного матеріалу з вмістом подрібненої соломи, які пресували під вищим тиском (11 МПа) становить 3,93 МПа. Ударна в'язкість біокомпозиту з вмістом деревного борошна за даного тиску пресування є вищою на 40% і становить 6,56 кДж/м². Вищу ударну в'язкість біокомпозитів з вмістом деревного борошна, сформованих за нижчого тиску пресування (8 МПа) порівняно з біокомпозитами, які формували за вищого тиску 11 МПа, можна пояснити меншою щільністю та вищою пластичністю біокомпозиту, що дозволяє матеріалу краще поглинати енергію, а також меншими внутрішніми напруженнями.

На зразках біокомпозитів з вмістом подрібненої соломи спостерігаються площини виривання у вигляді скупчених волокон (рисунок 3.12, а). Поверхня біокомпозитів з вмістом деревного борошна є більш рівною, що вказує на більш однорідну взаємодію компонентів та низькі

внутрішні напруження. Руйнування біокомпозитних зразків відбувається у вигляді поширення тріщини під кутом  $45^{\circ} \dots 60^{\circ}$ .



а



б

Рисунок 3.12 – Загальний вигляд біокомпозитних зразків після дослідження на ударну в'язкість, сформованих за тиску 8 МПа (а) та 11 МПа (б)

### 3.3. Порівняльний аналіз розроблених біокомпозитів із аналогами

Встановлено, що розроблені біокомпозитні матеріали на основі кісткового клею та подрібненої соломи (зразок № 1, таблиця 3.5) або деревного борошна (зразок № 2, таблиця 3.5) мають досить високу міцність на стискання – 64,5 МПа та 66,9 МПа відповідно. Порівнюючи з аналогами

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

міцність на стискання даних біокомпозитів (таблиця 3.5) є вищою в 5,9 раз за міцність ДСП (зразок № 5, таблиця 3.5), яка становить 10,0..12,0 МПа. Однак розроблені біокомпозитні матеріали мають нижчу 9% міцність на стискання (72,6 МПа) порівняно із біокомпозитами на основі розчину глютину та подрібненої соломи (зразок № 4, таблиця 3.5), а також значно нижчу майже в 2 рази за міцність на стискання (121,0 МПа) біокомпозиту на основі розчину глютину та подрібнених стебел кропиви (рисунок 3.13).

Таблиця 3.5 – Міцність на стискання аналогів композитних матеріалів

№ зразка	Компоненти композитних матеріалів	Міцність на стискання, МПа
1	Подрібнена солома + кістковий клей	64,5
2	Деревне борошно + кістковий клей	66,9
3	Подрібнена солома + розчин глютину	72,6
4	Подрібнені стебла кропиви + розчин глютину	121,0
5	ДСП	10,0-12,0

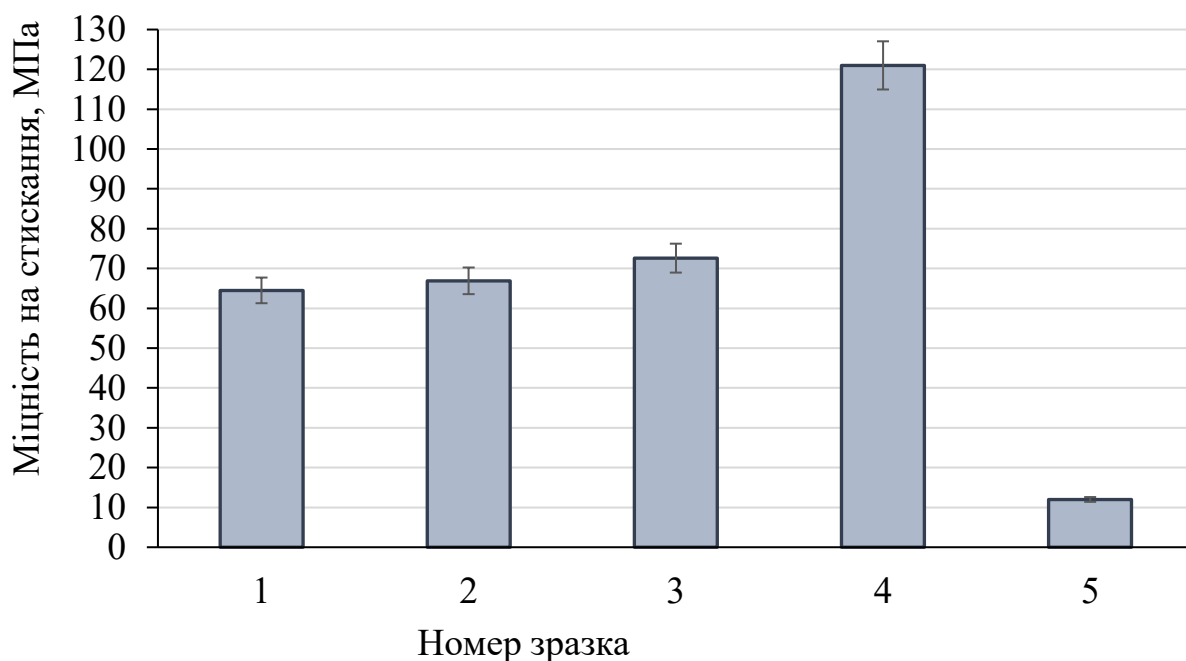


Рисунок 3.13 – Міцність на стискання аналогів біокомпозитних матеріалів (таблиця 3.5)

## ВИСНОВКИ

Розроблено технологію формування біокомпозитів за якої спочатку проводили дозування компонентів. Далі компоненти для формування біокомпозитних матеріалів змішують за допомогою лабораторного змішувача. Отриману суміш заданого складу в кількості 11 г поміщають в прес-форму, яку фіксують струбцинами для забезпечення суцільності та міцності біокомпозитного матеріалу. Кожну годину проводять додаткове підпресовування зразків для забезпечення суцільності матеріалу. Охолодження зразків проводять в прес-формах на спокійному повітрі.

Встановлено, що оптимальним є режим термічної обробки за температури 120 °С та витримці протягом 2 годин для біокомпозитів, які містять подрібнену солому та кістковий клей. За даного режиму термічної обробки отримано біокомпозитні матеріали з максимальною міцністю на стискання 64,5 МПа.

Встановлено, що біокомпозитні зразки на основі кісткового клею та деревного борошна, які піддавали термічній обробці за температури 120 °С з витримкою протягом 2 годин, мають найвищу міцність на стискання 66,7 МПа, яка є вищою на 4% за міцність на стискання біокомпозитного матеріалу складу, який містить подрібнену солому (64,5 МПа).

Вищу ударну в'язкість мають біокомпозити з вмістом деревного борошна порівняно з біокомпозитами з вмістом подрібненої соломи. Вищу ударну в'язкість (8,37 кДж/м<sup>2</sup>) мають біокомпозити з вмістом деревного борошна, сформованих за нижчого тиску пресування (8 МПа) порівняно з біокомпозитами, які формували за вищого тиску 11 МПа (6,56 кДж/м<sup>2</sup>).

Встановлено, що розроблені біокомпозитні матеріали на основі кісткового клею та подрібненої соломи або деревного борошна мають досить високу міцність на стискання – 64,5 МПа та 66,9 МПа відповідно порівняно з аналогами.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ur Rehman N., Saif Ullah Kh., Sajid M., Ihsanullah I., Waheed A. (2024). Preparation of Sustainable Composite Materials from Bio-Based Domestic and Industrial Waste: Progress, Problems, and Prospects – A Review. *Advanced Sustainable Systems*, 8(8). DOI: 10.1002/adsu.202300587
2. Avérous L., Halley P. J. (2014). Starch Polymers: From Genetic Engineering to Green Applications. *Elsevier*, 410. ISBN: 978-0-444-53730-3
3. Shogren R. L., Doane W. M., Garlotta D., Lawton J. W., Willett J. L. (2003). Biodegradation and Materials Properties of Extruded Starch-Based Plastics. *Industrial Crops and Products*, 18(2), 105–114.
4. Садова О. Л., Кашицький В. П., Мельничук М. Д., Смолянкін О. О., Мисковець С. В. (2021). Дослідження властивостей біокомпозитів, наповнених високодисперсним порошком крохмалю. *Наукові нотатки Луцького НТУ*, 65, 92–97. DOI: 10.36910/6775.24153966.2020.70.5.
5. Tharanathan R. N. (2003). Biodegradable Films and Composite Coatings: Past, Present and Future. *Trends in Food Science & Technology*, 14(3), 71–78. DOI: 10.1016/S0924-2244(02)00280-7.
6. Матрофайло М. М., Будащ Ю. О. (2016). Біокомпозитні матеріали на основі целюлозних наповнювачів. *Тези доповідей конференції «Нові наукомісткі технології виробництва матеріалів»*, Київ: КНУТД, 280–284.
7. Чобіт М. Р., Штомпель В. І., Троценко С. Є., Воронов С. А. (2009). Особливості структури модифікованої целюлози. *Наукові праці НУ «Львівська політехніка»*, 661, 38–45.
8. Rinaudo M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603–632.
9. Pillai C. K. S., Paul W., Sharma C. P. (2009). Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation. *Progress in Polymer Science*, 34(7), 641–678.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

10. Koshy R. R., Sabu T., Pothan L. A. (2015). Soy protein-based biomaterials for tissue engineering and drug delivery: A review. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 103(5), 1393–1414.
11. Zhang J., Zhang H., Wang X. (2013). Soy protein-based materials and their applications: A review. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 90(7), 945–956.
12. Kumar R., Sharma A. (2017). Protein-based adhesives for wood composites: A review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 31(9), 932–956.
13. Pizzi A. (2003). Natural Adhesives: From Casein to Collagen. In: Pizzi A., Mittal K. L. (Eds.), *Handbook of Adhesive Technology* (2nd ed.), CRC Press, 213–229.
14. Bălțatu M. S., Vizureanu P., Sandu A. V., Achitei D. C., Burduhos Nergis D. D., Perju M. C., Nabiałek M. (2024). Biocomposites: Materials, Properties, and Applications. DOI: 10.5772/intechopen.1010197.
15. Alsuwait R. B., Souiyah M., Momohjimoh I., Ganiyu S. A., Bakare A. O. (2023). Recent development in the processing, properties, and applications of epoxy-based natural fiber polymer biocomposites. *Polymers*, 15, Article 145. DOI: 10.3390/polym15010145.
16. Hubcă G., Iovu H., Tomescu M., Roșca I. D., Novac O., Gh I. (2000). *Materiale compozite*. București: Tehnică. ISBN: 973-31-1126-0.
17. Baley C., Gomina M., Breard J., Bourmaud A., Davies P. (2020). Variability of mechanical properties of flax fibres for composite reinforcement: A review. *Industrial Crops and Products*, 145, Article 111984.
18. Dorozhkin S. V. (2011). Biocomposites and hybrid biomaterials based on calcium orthophosphates. *Biomatter*, 1, 3–56.
19. Haraguchi K. (2015). Biocomposites. In: Kobayashi S., Müllen K. (Eds.), *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*, Berlin/Heidelberg: Springer, 124–130.

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

20. Електронний ресурс: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>  
21. Електронний ресурс: <https://buklib.net/books/35022/>  
22. Електронний ресурс: <https://studfile.net/preview/10781538/page:6/>  
23. Кашицький, В. П., Садова, О. Л., Заболотний, О. В., Малець, В. М., Мазурок, В. С. (2021). Розробка біокомпозитів, наповнених продуктами переробки вторинної сировини рослинного походження. Вінницький національний технічний університет.

24. Pinzón, L. M., Cedano, F. J., Castro, C. I., & Tabima, D. M. (2017). Formulation and characterization of chitosan-based biocomposites with potential use for bone adhesion. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 66(7), 389–397. <https://doi.org/10.1080/00914037.2016.1234567>

25. Procter P., Hulsart-Billström G., Alves A., Engqvist H., Karlsson J. Gluing living bone using a biomimetic bioadhesive: From initial cut to final healing // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2021. – Vol. 9. – Article 728042. – DOI: 10.3389/fbioe.2021.728042

26. - Sharma, S., & Kundu, K. Straw as a renewable resource for composite materials: A review // *Industrial Crops and Products*. – 2018. – Vol. 122. – P. 1–12. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.05.001

27. Електронний ресурс: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>

28. *Agronomy Research* [Електронний ресурс]. – Estonian University of Life Sciences. – Режим доступу: <https://agronomy.emu.ee>

29. Balčiūnas G., et al. Straw bale construction: properties and applications // *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. – 2013. – Vol. 2, №3. – P. 54–60. – DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.sace.2.3.2824>

30. Кашицький В.П., Садова О.Л., Савчук П.П., Малець В.М., Мазурок В.С., Мисковець С.В. Оптимізація складу та технології формування біокомпозитів на основі крохмального в'язучого. Наукові нотатки. – Випуск 71. – Луцьк, 2021. – С. 353-359.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.51>

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

31. Кашицький В. П., Садова О.Л., Вишинський М.І., Мисковець С.В. Формування глютинових біокомпозитних матеріалів, наповнених подрібненими стеблами зернових культур / Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Випуск 1 (166). – Вінниця, 2023. – С. 65-71.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-65-71>

Ось правильно оформлене бібліографічне посилання для списку літератури:

32. Tatrishvili, T., Mukbaniani, O., Kvinikadze, N., Bukia, T., Pirtskheliani, N., & Chikhladze, S. (2024). Композіти з деревного борошна: отримання та дослідження. *Journal of Chemical and Chemical Technology*, 18(4), 567–579.

<https://doi.org/10.23939/chcht18.04.567>

33. Кашицький В.П. Розробка складу біокомпозитів, наповнених деревним борошном, з підвищеною стійкістю до горіння / В.П. Кашицький, В.М. Малець, О.Л. Садова, М.І. Вишинський, Р.П. Голодюк // Наукові нотатки. – Випуск 72. – Луцьк, 2021. – С. 74-79. DOI:

<https://doi.org/10.36910/775.24153966.2021.72.11>

					MP 1025.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51