

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

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

**Розробка технологічного процесу формування прес-
композитів на основі компонентів природного
походження / Development of a technological forming
process press-composites based on components of
natural origin**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ-41
Сухецька Світлана Сергіївна

(підпис)

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

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
« 12 » *серпня* 2025 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., професор
Кашицький Віталій Павлович

Луцьк – 2025 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

Завідувач кафедри

Мельничук М.Д.

«11» 02 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Сухецькій Світлані Серіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка технологічного процесу формування прес-композитів на основі композитів природного походження
керівник роботи Хайшецький В.П., к.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «07» 02 2025 року №78/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «5» червень 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи літератури, джерел, властивості вихідних матеріалів, методику досліджень фізико-хімічних властивостей.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд технічної літератури.

2. Матеріали та методи досліджень.

3. Розробка технології формування біокompозитних виробів. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

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

1. Мета та завдання роботи (1 л. ф. А4)

2. Характеристика композитів (1 л. ф. А4)

3. Формування зразків (1 л. ф. А4)

4. Міцність на стискання (4 л. ф. А4)

5. Ударна в'язкість (1 л. ф. А4)

6. Схеми технологічного процесу формування біокompозитних виробів (1 л. ф. А4)

7. Висновки (1 л. ф. А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Н. контроль	Мисковець С.В.	11.02.2025	5.06.2025

7. Дата видачі завдання «11» 02 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Огляд технічної літератури	6.05.2025	виконано
2.	Матеріали та методики досліджень	20.05.2025	виконано
3.	Розробка технології формування об'єктів цих виробів	3.06.2025	виконано

Здобувач вищої освіти

Керівник кваліфікаційної роботи

Рухельська С.С.
(прізвище та ініціали)

Кашинський В.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Сухецька С.С. Розробка технологічного процесу формування прес-композитів на основі компонентів природного походження. Рукопис.

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

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

В роботі проаналізовано літературні джерела, визначено особливості використання біокомпозитних матеріалів в світовій практиці, а також принципи створення біокомпозитних матеріалів на основі наповнювачів та біополімерних матриць природного походження.

В роботі подано характеристику матеріалів у вихідному стані та методики визначення механічних характеристик, а також представлено технологію формування біокомпозитних зразків. Досліджено вплив навантаження пресування та температурно-часові параметри обробки композиції на механічні характеристики біокомпозитних матеріалів, які містять деревне борошно або подрібнені стебла зернових культур. Розроблено технологічний процес формування біокомпозитних виробів.

Бакалаврська робота складається з графічної частини та пояснювальної записки.

Пояснювальна записка містить 50 сторінок формату А4, 13 рисунків та 37 літературних джерел. Графічна частина містить 10 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: розчин глютину, деревне борошно, подрібнені стебла, міцність на стискання, ударна в'язкість, навантаження пресування.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Сухецька		02.06.25	Розробка технологічного процесу формування прес-композитів на основі компонентів природного походження	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Кашицький		05.06.25			3	50
Н.контр		Мисковець		05.06.25		ЛНТУ, кафедра матеріалознавства, гр. ПМ-41		
Затв.		Мельничук		06.06.				

ANNOTATION

Sukhetska S.S. Development of a technological forming process press-composites based on components of natural origin. Manuscript.

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

The bachelor's qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used and appendices. The work analyzes literary sources, identifies the features of the use of biocomposite materials in world practice, as well as the principles of creating biocomposite materials based on fillers and biopolymer matrices of natural origin.

The work provides a characteristic of materials in the initial state and methods for determining mechanical characteristics, and also presents the technology for forming biocomposite samples. The influence of the pressing load and temperature-time parameters of composition processing on the mechanical characteristics of biocomposite materials containing wood flour or crushed stems of grain crops was studied. A technological process for forming biocomposite products was developed.

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

The explanatory note contains 50 pages of A4 format, 13 figures and 37 literary sources. The graphic part contains 10 sheets of A4 format in Appendix A.

Keywords: gluten solution, wood flour, crushed stems, compressive strength, impact toughness, pressing load.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Перспективи впровадження біокомпозитних матеріалів в промислових масштабах.....	7
1.2. Особливості застосування натуральних наповнювачів для армування біокомпозитів.....	9
1.3. Застосування біомаси у виготовленні матеріалів будівельного призначення.....	19
1.3. Висновки і постановка задач досліджень.....	24
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	26
2.2. Методи дослідження механічних характеристик.....	32
2.3. Технологія формування біокомпозитних зразків	33
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ БІОКОМПОЗИТНИХ ВИРОБІВ.....	36
3.1. Вплив технологічних параметрів на структурування біокомпозитів.....	36
3.2. Розробка технологічного процесу формування біокомпозитних виробів.....	44
ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47
Додатки	

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Незважаючи на зростаючу обізнаність суспільства щодо шкідливого впливу на навколишнє середовище, пов'язаного з традиційним виробництвом пластмас, понад 98% усіх пластмас продовжують вироблятися з викопного палива, переважно нафти та газу. Аналіз статистичних даних підтверджує, що світове виробництво пластмас у останні п'ять років значно зросло порівняно з попередніми роками. Це підкреслює значний та постійний попит на пластмаси. В такому випадку існує нагальна потреба в узгоджених зусиллях щодо зменшення виробництва полімерів та композитів, що походять з викопних ресурсів. Тому одним з найважливіших напрямків у захисті навколишнього середовища є заміна традиційних пластмас на основі нафти новими, біорозкладними матеріалами. Це пов'язано з Кіотськими протоколами щодо скорочення викидів парникових газів та CO₂, що відкриє високі перспективи для ринків рослинного волокна.

Крім того, зростаючий попит на нові матеріали з 90-х років підтримує глобальну стійкість та диверсифікацію галузей, що спрямовані на вирішення проблем глобального довкілля та стабільної економіки через сільськогосподарську промисловість, а також успішне використання композитів у багатьох секторах (автомобільна промисловість, будівництво тощо) та збільшення використання таких матеріалів, що стає важливим завдяки розробці нових процесів та продуктів.

Біорозкладні та натуральні полімери викликають значний інтерес у наукових колах та дедалі більше в промисловому секторі завдяки екологічності та біодеградабельності. Для підтримки сталої ринкової економіки та вирішення поточних екологічних проблем біорозкладні матеріали повинні відігравати дедалі більшу роль.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Перспективи впровадження біокомпозитних матеріалів в промислових масштабах

Зростання глобального забруднення та зміна клімату були пріоритетними напрямками для екологічної безпеки, що призвело до підвищення екологічної обізнаності протягом останніх кількох десятиліть [1]. Одним із рішень для подолання цих проблем є збільшення використання біорозкладних та місцево доступних матеріалів. Використання таких відновлюваних матеріалів також допомагає покращити економічні умови у всьому світі, оскільки такі матеріали використовуються, завдяки додатковій вартості, яку вони створюють. Таким чином, ці природні ресурси роблять значний внесок у валовий внутрішній продукт (ВВП) країни в її економічній діяльності, окрім того, що вони сприяють соціальному та економічному розвитку, особливо у випадку країн, що розвиваються. Фактично тенденція переходу від раніше використовуваних та значною мірою вироблених матеріалів на основі скорочуваних та дорогих викопних (нафтохімічних) або мінеральних ресурсів до відновлюваних ресурсів рослинного та тваринного походження призведе до появи біоекономіки та сталого розвитку.

Чіткою тенденцією, що прослідковується зараз у світі композитів, це заміна армуючих синтетичних волокон натуральними. Це, серед іншого, пов'язано з хорошою доступністю, високою питомою міцністю та низькою вартістю натуральних волокон [2]. Хоча традиційні рослинні волокна знайшли широке застосування в текстильній, паперовій та пакувальній промисловості, їхні унікальні властивості підвищують їхню популярність у виробництві біорозкладних композитних матеріалів.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Хоча початковий набір комерційних композитних матеріалів складався з неорганічних наповнювачів, таких як скловолокно та кераміка, змішаних з нерозкладними полімерними матрицями, такими як поліетилен (ПЕ) та поліпропілен (ПП), попит на більш стійкі продукти стимулює розробку біопохідних та біорозкладних продуктів [3]. Були проведені широкі дослідження для вивчення потенціалу різних натуральних волокон для армування композитів. У численних випадках результати випробувань показали, що композити, що містять натуральні волокна, мають численні переваги порівняно з тими, що використовують синтетичні волокна. Ці переваги охоплюють велику доступність, відновлюване джерело сировини, повну біорозкладність та високе співвідношення міцності до ваги [4].

Таким чином, композити на основі органічних наповнювачів, таких як волокна на основі лігноцелюлози, у поєднанні з біорозкладними полімерними матрицями (біо- або синтетично отриманими з нафти), швидко з'являються на ринку [5]. Ці матеріали пропонують привабливі переваги порівняно з традиційними композитами, такі як біорозкладність та/або можливість вторинної переробки, а також у багатьох випадках повна біологічна нетоксичність, високий модуль пружності на розтяг та згинання, зазвичай оброблюваність за нижчої температури, кращі електростатичні властивості, поглинання вібрацій, теплоізоляція та звукопоглинання, а також електрохімічна некорозійність та адаптація властивостей для конкретних застосувань. Самі волокна зазвичай мають низьку вартість та відносно легку вагу, високу питому міцність та мають розвинуту сировинну базу. Їх розмір також може охоплювати широкий діапазон, від макроскопічних деревних шматочків до наночастинок целюлози.

Існують також деякі обмеження щодо використання біорозкладних пластмас у композитних застосуваннях, такі як вища вартість матриці, погані волого- та/або газобар'єрні властивості, повільна швидкість кристалізації, низька термічна стабільність та складність обробки.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Загалом, до конкретних проблем, які необхідно подолати для комерціалізації біокомпозитів та біорозкладних композитів на основі натуральних волокон, належать:

- несумісність між гідрофільними лігноцелюлозними волокнами та гідрофобним полімером, що призводить до загального зниження механічних властивостей та стабільності;

- вимоги до механічної та фізичної стабільності в умовах експлуатації (особливо щодо поглинання вологи);

- складна оцінка швидкості та ступеня біорозкладності, що становить вплив на навколишнє середовище після закінчення терміну служби, особливо в різних середовищах.

Для вирішення цих питань важливо розуміти основні властивості основних компонентів полімерних біокомпозитів, а також стратегії обробки та інші стратегії, які були прийняті для максимізації їх матеріальних характеристик. Також необхідно розуміти вплив волокнистих наповнювачів на стабільність використання протягом терміну служби та кінцевий біорозклад полімерних матриць.

1.2. Особливості застосування натуральних наповнювачів для армування біокомпозитів

Зростаючий інтерес до сталого розвитку стимулював пошук сировини, яка відповідає принципам циркулярної економіки. Цей підхід наголошує на мінімізації відходів, максимізації ефективності використання ресурсів та сприянні повторному використанню та переробці матеріалів для створення більш сталої системи виробництва та споживання. У цьому контексті, пов'язані з міцелієм біокомпозити, армовані добавками на основі відходів, пропонують перспективний матеріал з широким спектром можливих застосувань у сучасних технологіях матеріалів [6]. Тип Basidiomycota,

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

включаючи роди *Ganoderma*, *Pleurotus*, *Trametes*, *Schizophyllum*, *Lentinula* та *Fomes*, відіграє вирішальну роль у технологіях матеріалів на основі грибів. Помітні види в межах цих родів включають *Ganoderma lucidum*, *Ganoderma oregonense*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus djamor*, *Trametes versicolor*, *Schizophyllum commune*, *Lentinula edodes* та *Fomes fomentarius*. Ці білі та коричневі гнильні гриби здатні колонізувати та руйнувати різні субстрати, що містять целюлозу, геміцелюлози та лігнін [7]. Важливим фактором у розробці біокомпозитів на основі грибів є вибір субстрату, що використовується для росту міцелію. Можна використовувати різні субстрати, включаючи соломку злаків, деревну тирсу або інші волокна, такі як льон та бавовна. Під час росту нитки міцелію оточують та руйнують матеріал, зв'язуючи перетравлений субстрат. Таким чином, грибний міцелій забезпечує природний «клей», утворюючи твердий матеріал [8]. Залежно від виду гриба, субстрату, умов росту, добавок та методів обробки, отриманий біокомпозит може проявляти різноманітні властивості. Грибкові матеріали мають потенційне застосування в широкому спектрі галузей, включаючи біомедицину та косметику (наприклад, антимікробні пластири для загоєння ран на основі міцелію з куркуміном, адгезійні платформи для тканинної інженерії), упаковку (наприклад, *MycFoam*; *EcoCradle*, *Ecovative Design*), текстильну та шкіряну промисловість (одяг, взуття, сумки), целюлозно-паперову промисловість, меблеву та будівельну промисловість (міцелієві цеглини, структурні каркаси, тепло- та звукоізоляційні панелі та електроніку).

Через численні параметри та змінні у виробництві біокомпозитів, пов'язаних з міцелієм, їхній повний потенціал ще не реалізований. Хоча й було проведено широке дослідження біокомпозитів на основі вищих грибів із застосуванням у текстильній та паперовій промисловості, виробництво біокомпозитів на основі міцелію цвілі не було широко висвітлено в літературі. На сьогодні лише кілька видів цвілі, таких як *Acremonium sp.* та *Trichoderma asperellum*, використовувалися з грибами білої гнилі для виробництва

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

біокомпозитів [9]. Приклади, описані в літературі, включають біокомпозит на основі вищих грибів *Pleurotus ostreatus*, *Oudemansiella radicata* та цвілі *Acremonium* sp. на змішаному субстраті зі стебел бавовни, пшеничних висівок та природних армуючих частинок. Виготовлено полімерні екстракти та нанопapір з різних видів вищих грибів та цвілі *Mucor genevensis*, вирощених на мелясі цукрової тростини. Нанопapір продемонстрував високі властивості міцності на розтяг та гідрофобність, що робить його придатним для широкого спектру застосувань, включаючи покриття, мембрани, упаковку та папір. Біокомпозити, отримані в дослідженні, мають потенційне застосування як легкий заповнювальний матеріал для геотехнічної інженерії.

Пліснява вже широко використовується в харчовій промисловості для виробництва сиру, у молочній промисловості та для ферментації продуктів на основі сої, таких як м'ясо або соєвий соус. Пліснява також використовується у виробництві ферментів (амілаз, пектиназ, целюлаз), кислот та біоконтрольних агентів, а також у фармацевтичній промисловості для виробництва антибіотиків (наприклад, пеніциліну) [10]. Деякі види вищих грибів, включаючи *Ganoderma lucidum* з різними субстратами, використовуються в текстильній промисловості для біовиробництва шкіроподібних матеріалів. Міцелій термічно або хімічно інактивується, пресується та екструдуються у вироби, що нагадують справжню шкіру. Текстиль, виготовлений з вищого грибного міцелію, є водонепроникним, вогнестійким та нетоксичним. Для отримання високогнучких волокнистих міцеліальних килимків їх можна попередньо обробити мастильними матеріалами або пластифікаторами, такими як гліцерин, поліетилен гліколь або сорбіт. У паперовій промисловості цікавим застосуванням міцелію біокомпозитів є виробництво паперу з целюлози, отриманої з міцелію, вирощеного з використанням лігноцелюлозних субстратів або деревних побічних продуктів [11]. Міцеліальний папір виробляється аналогічно звичайному папероробству шляхом замочування міцелію у воді, змішування його для отримання

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

целюлози, а потім зневоднення та сушіння біокомпозиту. Біокомпозити на основі міцелію містять структурний полісахарид хітин, і папір, виготовлений з біомаси міцелію, може конкурувати з деревним папером. Через широке використання цвілі в різних галузях промисловості утворюється значна кількість відходів міцелію, що вимагає ефективних рішень щодо управління. Відходи міцелію мають широкий спектр можливого застосування, від компостування до виробництва функціональних матеріалів, таких як акустична та теплоізоляція, а також біорозкладна упаковка [12].

Цвіль та вищі гриби можуть рости на будь-якому субстраті у вигляді міцелію. Цей ріст відбувається швидше у випадку цвілі (кілька днів), ніж у випадку вищих грибів (тижні), проте цвіль виробляє менше біомаси міцелію. Міцелій складається переважно з природних полімерів, таких як хітин, целюлоза, білки тощо, що робить його природним полімерним композитним волокнистим матеріалом. Склад клітинної стінки міцелію варіюється у різних видів грибів. Як правило, структура клітинної стінки грибів складається переважно з манопротейнів.

У контексті циркулярної економіки використання цвілевого міцелію як сировини підтримує ідею замикання життєвого циклу продукту. Зокрема, цвілевий міцелій пропонує заміну пластмасам та синтетичним матеріалам, які стають дедалі неприйнятними для навколишнього середовища та негативно впливають на екосистеми [13]. Однією з ключових проблем, що стоять перед сучасним сільським господарством, є припинення використання синтетичного агротекстилю.

Синтетичний агротекстиль використовується в сільському господарстві для захисту врожаю, стабілізації ґрунту, боротьби з бур'янами, управління водними ресурсами та тепличного господарства. Однак він призводить до значного забруднення ґрунту та викидів мікропластику, а також має шкідливий вплив на вирощування рослин [14]. Все частіше біорозкладні неткані матеріали, виготовлені з біополімерів, та продукти, що містять

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

рослинні добавки та тваринні біопродукти, такі як вовна, розглядаються як альтернативи синтетичному агротекстилю, зменшуючи негативний вплив на екосистеми, пропонуючи водночас функціональні властивості, такі як біорозкладність та сприятливі механічні характеристики.

Основним полімером природного походження, який повністю біорозкладний, є полімолочна кислота (PLA). Її можна використовувати без наповнювача або наповнювати сировиною, наприклад, рослинними волокнами. У цьому випадку отримують повністю біорозкладний композит, який називається біокомпозитом. Традиційний біокомпозитний матеріал (Wood Polymer Composite) виготовляється з використанням лігноцелюлозного матеріалу у вигляді подрібненої деревини. Окрім основної деревної сировини, якою є деревне борошно [15], як наповнювач також використовується більша деревна тріска.

Біокомпозити на основі полімолочної кислоти (PLA), високої пірию (TWG) та конопель (H) були виготовлені методом лиття під тиском [16]. Загалом, введення рослинного наповнювача в полілактидну матрицю знизило термостійкість отриманих композитів. Рослинні наповнювачі впливають переважно на процес холодної кристалізації, ймовірно, через їхні нуклеаційні властивості. Додавання наповнювачів до матриці PLA призвело до збільшення модуля пружності за всіх випробуваних температур порівняно з чистим PLA. Механічні властивості випробуваних композитів значно залежали від кількості використаного рослинного наповнювача. Додавання 50% рослинного наповнювача до PLA призвело до дворазового збільшення модуля пружності на розтяг та зниження міцності на розтяг і ударної в'язкості в середньому на 23% та 70% відповідно. Було встановлено, що композити, що містять частинки високої пірию (TWG), демонструють дещо підвищений модуль пружності на розтяг, демонструючи водночас дещо знижену міцність і ударну в'язкість у порівнянні з композитами, що містять компоненти конопель (H).

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Деревопластикові композити (ДПК) є одними з нових методів, що використовуються для перетворення перероблених відходів на корисні продукти. Вони забезпечують довговічну альтернативу багатьом продуктам, які виготовлені з чистого пластику або листового металу. Нещодавні зміни до екологічного законодавства, що вимагають вищих цільових показників переробки, викликали додатковий інтерес до таких матеріалів [17].

ДПК є яскравим прикладом сучасного матеріалу, який має великий комерційний та екологічний потенціал з використанням перероблених матеріалів. Ці матеріали широко використовуються в різних галузях, таких як меблі, будівництво та в різних застосуваннях для приміщень та вулиць, таких як тераси, огорожі та покрівля. Властивості ДПК залежать переважно від вмісту деревини та пластику в кінцевому матеріалі. Близько 30...60% від загальної кількості сировини в ДПК складається з деревини [18].

Екструзія є найпоширенішим способом виробництва матеріалу у виготовленні ДПК. Через брак розвитку пост-виробничих процесів, сучасні екструдовані вироби з ДПК обмежуються профілями з рівномірним поперечним перерізом, що утворюються безпосередньо в результаті екструзії. Розробка нового пост-виробничого процесу формування була б рішенням для усунення цього обмеження та забезпечення більшого потенціалу використання ДПК.

Процеси формування складаються з формування та різання. Форма виробу створюється під час процесу формування шляхом натягування або притискання виробу до прес-форм. Результатом цього етапу є тривимірний виріб. Притискання виробу до ріжучих лез створює форму виробу під час процесу різання.

Поєднання процесів формування та різання в одному інструменті є можливим, але зазвичай це призводить до збільшення собівартості виробу через складність усього процесу.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Вибір правильного методу виробництва залежить від собівартості виробництва, характеристик матеріалу, швидкості виробництва та геометрії виробу.

Пресове формування (лиття під тиском) застосовують для процесу формування після екструзії на основі аналізу та оцінки можливих вторинних методів виготовлення. Армування матеріалів WPC склотоволокном та іншими волокнами було широко досліджено [19], однак можливості покращення властивостей матеріалів на етапі постобробки не отримали достатньої уваги.

Теоретично опір формуванню має бути мінімальним, оскільки температура композитного матеріалу вища за температуру плавлення полімеру. Однак насправді температура інструменту та середовища створюють умови для потоку розплаву матеріалу, і під час процесу формування створюється сила пресування.

Волога, температура формування та час витримки прес-форми були виділені серед важливих параметрів, що впливають на формування ДПК. Загальні характеристики ДПК пов'язані з такими механічними характеристиками, як міцність та модуль пружності.

Рослини, які що вирощуються заради волокон, зазвичай називають «волокнистими культурами», які можна збирати після одного вегетаційного періоду. Вони відрізняються від інших лігноцелюлозних матеріалів, таких як дерева. Останні зазвичай вирощують протягом багатьох років, перш ніж їх збирають для інших цілей (виготовлення меблів, будівельних матеріалів, у виробництві паперу тощо)

Лігноцелюлозний матеріал – це органічна речовина, що виробляється деревами, чагарниками та сільськогосподарськими культурами, і є основною сировиною для целюлозно-паперової промисловості, композитної промисловості та пакувальних матеріалів [20]. Відновлюваною сировиною лігноцелюлозних матеріалів є натуральні волокна, сільськогосподарські відходи та лісова продукція. Сільськогосподарські відходи та лісова сировина

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

є достатньо поширеними та забезпечують дуже низький рівень викидів парникових газів. Лісові деревні продукти містять більше лігніну та менше золи, що робить їх привабливими для економічно ефективної переробки порівняно з сільськогосподарськими відходами. Лігноцелюлозні матеріали використовуються в харчовій упаковці, композитах та текстильній промисловості завдяки своїм перевагам перед іншими традиційними матеріалами, які включають низьку вартість, відновлюваність, нетоксичність, біорозкладність тощо [21]. Лігноцелюлозна біомаса є основною сировиною для багатьох промислових процесів, але вона зазвичай демонструє дуже низьку мікробну стійкість та вологостійкість. Лігноцелюлозні матеріали є привабливими матеріалами для різноманітних потенційних застосувань, таких як збереження ґрунту, текстильна промисловість, як альтернативні матеріали, особливо заміники деревини, на будівельному ринку та як армування композитних матеріалів для виробництва автомобільних конструкційних компонентів. Лігноцелюлозні матеріали мають достатню міцність і жорсткість, але їх важко використовувати в несучих навантаженнях через їхню волокнисту структуру. У композитах, армованих волокнами, волокна надають міцності та жорсткості структурі, тоді як полімерна матриця служить сполучною речовиною для утримання волокон на місці. Фізична, хімічна та біологічна попередня обробка лігноцелюлозних волокон зупиняє поглинання вологи, збільшує шорсткість поверхні та покращує інші властивості.

Одним із таких ресурсів, який привернув увагу дослідників у всьому світі, є рослинні матеріали, зокрема лігноцелюлозні волокна, отримані з різних частин рослин [22]. Це особливо є ефективним для заміни синтетичних волокон, таких як скляні або вуглецеві волокна, у розробці полімерних або цементно-керамічних композитів з двох причин. По-перше, ці волокна мають привабливі характеристики: доступність, низька вартість, екологічність та біорозкладність, краща жорсткість, порівнянна питома міцність, модуль Юнга тощо. Крім того, використання цих відновлюваних та широкодоступних

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

матеріалів сприятиме сталому розвитку, а також створенню можливостей працевлаштування для сільських громад, де вони доступні або виробляються. Друга причина полягає в тому, що останніми роками приділяється більша увага використанню природних матеріалів з огляду на зростання вартості невідновлюваних нафтових матриць та армуючих матеріалів у розробці композитів. Крім того, матеріали на основі нафти постійно стають дорогими, а також постійно забруднюють навколишнє середовище через зростання викидів CO₂.

Основними рослинами, що дають волокно, є бавовна та льон, тоді як коноплі з рамі, джутом та сизалем, які є менш важливими рослинами, вирощуються в невеликій кількості. Оскільки волокна можна отримати з різних частин рослин, їх загалом класифікують:

- волокна лубу, кори або шкіри стебла (волокна з різних видів трав, таких як еспарто, банан, льон, коноплі, джут, кенаф, мальва, рамі, цукрова тростина багаса тощо);
- листові волокна (курауа, ананас, сизаль тощо);
- фруктові або насінневі волокна (кокос, бавовна, люфа циліндрична);
- бамбук та різні види соломи (рис, пшениця тощо).

Крім того, існує також економічна класифікація різних волокон, таких як волокна щіток (жорсткі міцні волокна, невеликі стебла та гілочки використовуються для виготовлення щіток), армуючі або наповнювальні волокна (для матраців, подушок, оббивки, упаковки та в полімерних композитах як армуючі або наповнювачі), волокна для паперової промисловості, включаючи текстильні та деревні волокна, натуральні тканини (з кори шарами або листами, виготовленими з міцних переплетених волокон як можливих грубих замінників тканини; наприклад, люфа циліндрична), волокна для грубого ткацтва та плетіння (використовуються в циновках, кошиках, капелюхах, взутті, сидіннях тощо) і, нарешті, текстильні волокна (можливі для скручування, в'язання, прядіння та ткацтва) [23].

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Ці волокна отримують з різних частин рослин та різними методами екстракції, що практикуються в різних країнах, які включають ручні, машинні та мікробні методи. Ці методи включають механічний екстрактор (койра), декортикатор (бананові та ананасові волокна); перікіту (волокна курауа та сизалу) та розщеплення ножем з подальшим відбиванням дерев'яним молотком (мальва та пісава). Деякі волокна, такі як багаса цукрової тростини (побічний продукт цукрової промисловості), бамбук та солома рису і пшениці, здебільшого доступні без використання будь-яких методів екстракції.

Відповідно, характеристики цих волокон значно відрізняються залежно від частини, з якої вони видобуваються, якості їх походження, віку джерела та їх попередньої обробки. Таким чином, можна сказати, що властивості рослинних волокон залежать не лише від місця їх виробництва, але й від способу видобутку [24].

Використання цих волокон є важливим для того, щоб уникнути втрати цих природних ресурсів, і тому дослідження проводилися по всьому світу з цією метою, зокрема, у розробці легких, але високоефективних композитів, окрім їх традиційного застосування у виробництві мотузок, килимків, матраців тощо. Виходячи з характеристик, багато розроблених таким чином продуктів вже використовуються в багатьох сферах застосування, деякі з яких стали дуже привабливими завдяки природному вигляду. Наприклад, менш стійкі рослинні волокна можуть бути ефективно використані в таких сферах застосування, як упаковка, компоненти інтер'єру тощо, тоді як волокна, що демонструють високі механічні характеристики, можуть бути використані в конструкціях [25]. Одним з інших нетрадиційних застосувань цих волокон є виготовлення витворів мистецтва, враховуючи велику різноманітність і часто низьку вартість, що стимулює їх використання в сітках, пакувальних нитках, ковдрах і килимах. Слід зазначити, що це можливо, зокрема, у виготовленні скульптур або в мистецтві загалом, навіть за відсутності будь-яких відомостей про їх характеристики.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Однак слід пам'ятати, що властивості композитів, що містять натуральні волокна, залежать від багатьох факторів. Одним з основних факторів, що впливають на властивості біокомпозиту, є вміст натурального наповнювача, який впливає на здатність композиції до формування. Тому у випадку біокомпозитів, зазвичай використовуються низькі ступені наповнення рослинними волокнами, такими як коноплі, льон або джут, кількість яких зазвичай не перевищує 30% [26]. Було показано, що можна виробляти композити на основі PLA та волокон конопель, у яких вміст рослинної сировини становить 40%. Однак, мало досліджень вказують на ефективне наповнення PLA волокнами конопель на рівні 50% або вище. Але також відомі дослідження, в яких вміст натуральних волокон нижче 10%. Це часто пов'язано з неналежним проведенням аналізів. Загалом, адгезійний зв'язок між армуючим волокном і матрицею відіграє вирішальну роль у механічних властивостях композитів. Слабкий адгезійний зв'язок між цими двома фазами призводить до низьких механічних і фізичних властивостей композиту.

Багато хімічних речовин були протестовані в лабораторних експериментах на предмет їхньої здатності покращувати межу волокно/матриця полімерних композитів, таких як гідроксид, пероксид натрію, органічні та неорганічні кислоти, силани, акрилові ангідриди та мономерні тощо. Було продемонстровано корисний вплив цієї модифікації, особливо на механічні властивості композитів з модифікованим волокном. Однак можна зазначити, що поширеним методом отримання рослинних волокон є модифікація цієї сировини за допомогою NaOH.

1.3. Застосування біомаси у виготовленні матеріалів будівельного призначення

Утилізація деревних відходів створює екологічну проблему, яку має вирішити деревообробний бізнес [27]. Існують проблеми, пов'язані з

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

переробкою та повторним використанням деревних залишків, оскільки їх часто обробляють небезпечними хімічними речовинами. У Європі спостерігається подальше загострення екологічних проблем через те, що менше 50% деревних відходів переробляється. Деревно-цементні композити та інші інноваційні матеріали можуть забезпечити потенційні рішення цієї проблеми. Використання деревних відходів у цементних композитах як наповнювача, має значний потенціал для розробки інноваційних будівельних матеріалів, які є стійкими та екологічно чистими. Композитні матеріали, включаючи деревно-цементні плити, мають переваги в різних конструкційних та звукоізоляційних застосуваннях, що пояснюється їхніми відмінними акустичними ізоляційними властивостями та екологічною стійкістю.

Дослідження визначили важливі фактори, включаючи хімічний склад екстрактивних речовин деревини, їхню здатність порушувати гідратацію цементу та методи зниження впливу цих наслідків для покращення стабільності та міцності матеріалу. Позитивні результати використання деревних відходів у будівельних матеріалах підкреслюють доцільність цього підходу. Однак вони також виявляють значні недоліки, особливо щодо довгострокової поведінки, структурної цілісності та довговічності деревно-цементних композитів за умови впливу різних умов навколишнього середовища, включаючи вплив вологи, коливання температури та механічні напруження [28].

Активно досліджують екологічно стійкі будівельні матеріали з використанням альтернативних в'язучих речовин на основі пшеничного крохмалю та біовугілля. Армування скло- та вуглеволокнами підвищує характеристики матеріалу, однак відбувається утворення порожот. В такому випадку використовують інноваційні технології формування біокомпозитів, які виготовляються за допомогою сучасної технології пресування. В результаті отримують композитні матеріали з чудовими екологічними та структурними характеристиками. Біокомпозити створюють шляхом

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

поєднання деревних відходів з різноманітними зв'язуючими речовинами та екологічно чистими добавками, такими як сланцева зола. Механічні властивості цих біокомпозитів відповідають властивостям традиційних будівельних матеріалів, такі як міцність та довговічність, але водночас вони значно зменшують кількість необхідного цементу. Крім того, інтеграція екологічно чистих добавок не тільки вирішує екологічні проблеми, пов'язані з виробництвом цементу, але й дозволяє використовувати відходи, які в іншому випадку сприяли б переповненню сміттєзвалищ. Коли йдеться про розробку екологічно чистих будівельних технологій, біокомпозити є можливим варіантом завдяки поєднанню переваг, що включають ефективність використання ресурсів та екологічну стійкість [29].

Використовуючи відходи деревини та включаючи сланцеву золу відбувається вирішення екологічної проблеми виробництва цементу, на яке припадає 7% світових викидів CO₂, та утилізації деревних відходів, з яких менше 50% переробляється в Європі. Новизна полягає в цілісному підході, що поєднує утилізацію відходів, зменшення цементу та оптимізацію карбонізації для виробництва готових до використання блоків для кладки, що відповідають міжнародним стандартам сталого розвитку.

Введення рослинного наповнювача в полілактидну матрицю знизило термостійкість отриманих композитів. Зниження термостійкості було більшим у випадку композиту, що містить пирій. Крім того, було помічено, що збільшення вмісту рослинних наповнювачів призвело до подальшого зниження температури деградації композитів [30].

Рослинні наповнювачі впливали переважно на процес холодної кристалізації, ймовірно, через їхні нуклеаційні властивості. Після введення частинок рослинного наповнювача зафіксовано значне збільшення інтенсивності процесу холодної кристалізації разом з одночасним зниженням температури цього процесу.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Рослинні наповнювачі змінюють термомеханічні характеристики композитів. Введення наповнювачів у матрицю призвело до збільшення модуля пружності у всьому діапазоні температур порівняно з чистим PLA.

Наповнення PLA рослинними частинками дозволяє отримати композит зі збільшеною жорсткістю та зниженою міцністю та ударостійкістю. Механічні властивості випробуваних композитів суттєво залежали від кількості використаного рослинного наповнювача. Збільшення кількості наповнювача призвело до зміни модуля пружності, а також до зниження міцності на розрив та ударної в'язкості [31].

Механічні властивості композитів лише незначно залежали від типу рослинних частинок, що використовувалися для їх виробництва. Композити, що містили частинки пирію (TWG), мали дещо вищий модуль пружності та дещо нижчу міцність та ударну в'язкість, ніж композити, що містили частинки конопель.

Біокомпозит стає екологічно чистим та довговічним завдяки поєднанню деревних відходів з мінеральними матеріалами, такими як цемент, вапно, пісок та сланцева зола. Результати досліджень дають цінну інформацію для подальшого вивчення в галузі сталого будівництва та підкреслюють важливість оптимізації складів змішування та методів карбонізації для виробництва біокомпозитів, які є екологічно безпечними.

Зокрема, цей матеріал має потенціал для використання як альтернатива пустотілим блокам. Виходячи з результатів цього дослідження, можна зробити кілька важливих висновків [32].

Тривалий вплив води значно знижує міцність матеріалів на стиск, що підтверджується коефіцієнтом розм'якшення 0,55. Це зумовлює необхідність підвищення стійкості до пошкодження водою та кращого розуміння взаємодії води з матеріалами.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Цемент з водою виявився кращим за вапно як в'язуча речовина, а додавання 20% піску з розміром 0,4 мм до суміші цемент-вода значно покращило міцність на стиск (44%) та щільність (14%).

Заміна частини цементу сланцевою золою та додавання піску значно покращили матеріал, що призвело до підвищення міцності на стиск на 55% та збільшення щільності на 7%, а також забезпечило економію коштів та зменшення впливу на навколишнє середовище.

Карбонізація, особливо в поєднанні зі спеціальним сушінням на повітрі, кондиціонуванням у CO₂-камері та процесом затвердіння в навколишньому середовищі, значно покращила механічні властивості та довговічність біокомпозиту, як у сухому, так і зануреному стані. Цей процес, який включав попереднє сушіння перед карбонізацією, збільшив міцність на стиск на 12% та щільність на 2%, що підкреслює важливість процедури затвердіння та попереднього сушіння [33].

Оптимізовані суміші біокомпозитів, отримані шляхом заміни 30% портландцементу сланцевою золою, продемонстрували постійне збільшення міцності на стиск від 0,2 МПа до 9,6 МПа, що підходить для легких будівельних блоків. Ця заміна не лише зменшила використання цементу та покращила екологічність, але й підвищила екологічність отриманого матеріалу.

У цьому дослідженні було отримано карбонізовані деревні біокомпозити з вищою міцністю (1...10 МПа) зі значним зниженням викидів CO₂ порівняно з літературним дослідженням, в якому використовувалася заміна тирсою та піском (1...3 МПа), що демонструє ефективність обробки матеріалу та оптимізації для високоефективних екологічно чистих матеріалів, хоча обидва сприяють сталому будівництву з різними рівнями експлуатаційних характеристик.

Карбонізація біокомпозитів портландцементом та вапном призвела до утворення кальциту (CaCO₃), що корелювало зі збільшенням міцності на

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

стиск; за рахунок когезійної міцності деревної тирси та матриці, незважаючи на наявність пустот у мікроструктурі біокомпозиту [34].

Заміна частини цементу сланцевою золою та додавання деревної тирси у виробництві біокомпозитів значно знизили викиди CO₂, при цьому процеси сушіння та занурення досягли скорочення приблизно на 65% та 45% відповідно, що демонструє потенціал біокомпозитів щодо зменшення впливу на навколишнє середовище традиційних будівельних матеріалів.

1.4. Висновки і постановка задач досліджень

Волокнисто-армовані пластикові композити знайшли застосування в широкому спектрі високоякісних та низькоякісних продуктів, від автомобільної до аерокосмічної, балістичної, будівельної промисловості, меблювання інтер'єрів та біомедичних наук, а також харчової упаковки, піддонів та товарного посуду. Додавання волокон дозволяє кінцевому композитному продукту подолати деякі обмеження сучасних пластмас для цих застосувань, такі як низький модуль пружності та погана термостабільність.

Один з перспективних підходів до створення економічно ефективних біокомпозитів – це використання швидкозростаючої сировини. Однак бракує відомостей про потенційне використання натуральних наповнювачів для виробництва біокомпозитів. Біокомпозити мають потенціал для широкого спектру використання в багатьох секторах, наприклад, у пакувальній промисловості, для одноразових виробів та корпусів електронних виробів, у меблевій промисловості та багатьох інших.

Одним з найвідоміших видів біорозкладних композитів є композити, що містять деревну сировину – деревно-пластиковий композит (ДПК). ДПК зазвичай виробляється на основі основних термопластичних полімерів, наприклад, поліпропілену, поліетилену, полівінілхлориду тощо, та деревних частинок.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Аналіз літературних джерел дозволив визначити основні завдання, які необхідно виконати для розробки технологічного процесу формування біокомпозитних виробів конструкційного призначення:

- визначити механічні характеристики біокомпозитних матеріалів з вмістом наповнювачів природного походження;
- визначити оптимальний режим обробки композиції в механічному та тепловому полі;
- дослідити характер руйнування біокомпозитів під впливом статичних навантажень;
- розробити технологічний процес формування біокомпозитних виробів.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

Кістковий клей (ГОСТ 2067-93 «Клей кістковий»). Білковий клей, виготовлений з кісток тварин, який розчинний у воді та має високі адгезійні характеристики. Кістковий клей вважається екологічним матеріалом завдяки нульовому виділенню токсичних газів у повітря. Гранули практично необмежено довговічні в сухому стані. Навіть змішані клеї, які висохли протягом багатьох років, зазвичай повністю придатні для використання після додавання води та тепла [35].

Клей висихає твердим та міцним і не утворює пластикової плівки на деревині, як білий клей. Як органічний продукт, він краще поєднується з деревиною, ніж з пластиком.

Розчини на основі кісткового клею можна використовувати на будь-якій основі, яку можна змочити водою. Кістковий клей використовується в багатьох сферах: від деревообробки до різних складів для реставрації фресок та картин на полотні та панелях.

Міцніші за більшість сучасних клеїв, тваринні клеї досі використовуються у реставрації дерева та традиційній обробці деревини, а також у деяких техніках живопису. Після занурення у воду гранул та нагрівання на водяній бані розчин використовуються гарячими та гелеподібними після охолодження. У столярних роботах їх розчинність у воді робить їх оборотними, що також дозволяє виправити склеювання. У живописі їх використовують як ґрунтовку для полотен та дощок, так і для приготування темперних фарб. Тваринні клеї відрізняються різним ступенем адгезії та еластичності, але в будь-якому випадку слід прагнути готувати клеї з мінімальною необхідною концентрацією, щоб уникнути ризику появи

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

залишкових напружень в склесних матеріалах.

Кістковий клей відносно швидко гелює після нанесення. Це означає, що після охолодження він набуває желеподібної консистенції, і правильне притиснення вже неможливе, оскільки він став занадто в'язким і густим. Час застигання зазвичай становить 10...20 хв. Однак, витримка наступні 24 год для повного структурування системи. Склеювання проводять за температури не нижче 15 °С.

Кістковий клей виготовляється з кісток, вони знежирюються, а потім додатково обробляються термічним гідролізом та екстракцією гарячою водою. Клейовий екстракт потім очищається, а потім концентрується у багатоступеневому процесі за допомогою вакуумного випарника. Отриманий твердий гель потім подрібнюється у гранули та сушиться (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд гранул кісткового клею

Технічні дані:

- форма: грубі зерна;
- колір: жовтувато-коричневий;
- запах: легкий запах
- РН: 5,75...7,0;
- в'язкість (12,50%): 60...70 мПа·с (60°C);
- вологість: 10...16% (24 год при 100°C);

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

- вміст жиру: макс. 3%;
- зберігати продукт у сухому місці, подалі від води та вологи.

Тирса – це побічний продукт деревообробки, який складається переважно з целюлози, лігніну та геміцелюлози [36]. Її властивості залежать від породи деревини, вмісту вологи та розміру частинок. Тирса може бути корисним матеріалом для різних застосувань, зокрема як мульча, у бетоні та для виробництва біовугілля. Однак вона також створює певні проблеми зі здоров'ям та безпекою, особливо щодо вдихання пилу. Деревна тирса складається з вуглецю (60,8%), водню (5,2%), кисню (33,8%), азоту (0,9%) та полісахаридів (5%-10%). Це нерозкладні органічні відходи через низький вміст азоту та високий вміст лігніну та целюлози.

Головним напрямком у використанні деревного борошна в початковий період стало виробництво виробів з фенопластів (бакелітів, карболітів). До появи ПВХ і поліолефінів із фенольних композицій вироблялися продукти цивільного та військового призначення. Велика кількість деревного борошна застосовується, наприклад, у виробництві лінолеумов.

Деревне борошно являє собою дрібні частки деревини довільної форми, отримані спеціально в процесі розмола деревини твердих і м'яких лісових і хвойних порід (рисунок 2.2). У якості сировини для отримання деревного борошна використовуються, як правило, відходи лісо- і деревообробних виробництв, опилки і технологічна щепка, отримана з деревини.

До деревного борошна, як правило, відносять подрібнену деревину з розміром частинок менше 1,2 мм. Колір деревного борошна залежить від породи деревини і може бути від світло-солом'яного до темно-коричневого.

Частинки деревного борошна мають випадкову нерегулярну форму. З одного боку це пов'язано з особливостями структури деревини, а з іншого – з тим, що подрібнення частинок робочими органами млинів відбувається внаслідок випадкових багатосторонніх впливів – стиснення, зсувів, ударів та зіткнень тощо.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд частинок деревного борошна

Оскільки деревина – не є найтвердішим і найміцнішим продуктом, то її розмелювання може здійснюватися з використанням найрізноманітніших типів млинів. При цьому класифікація частинок борошна може відбуватися як всередині агрегату, так і на зовнішніх класифікаторах (ситових повітряних). Розмелювання може проводитися в одну або кілька стадій. Існують також спеціальні установки і для сушіння деревного борошна. Конкретний фракційний склад деревного борошна у постачанні залежить від методу розмелювання та класифікації частинок (відцентровий, ситовий і т.д.).

Вологість за стандартом становить 8%. Для деяких застосувань може бути потрібна інша вологість. Наприклад, для використання у виробництві термопластичних ДПК вологість борошна має бути меншою за 1 %. Насипна густина деревного борошна залежить від багатьох факторів, таких як вологість, розміри та форми частинок, порода деревини і перебуває в межах 100...220 кг/м³; нормативне значення для борошна марок 120...180 становить 100...140 кг/м³.

Деревина в процесі виробництва борошна практично не руйнується під впливом хімічних речовин. Тому, хімічний склад деревного борошна

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

відповідає складу вихідної сировини, а деревне борошно можна вважати повністю натуральним природним матеріалом.

Деревне борошно має яскраво виражені сорбуючі властивості, а також тиксотропні якості. Температура самозаймання аерозолу становить 430 °С. Деревне борошно може спалахувати на повітрі за температури вище 200 °С.

Нижня концентраційна межа вибуху аерозолу деревного борошна становить 11,2 г/м³. Вона значною мірою залежить від дисперсії, зольності та вологості. Вологе або промаслене деревне борошно, яке подібне до тирси, здатне до самозаймання.

Солома зернових культур – це універсальний побічний продукт сільського господарства з різними властивостями та застосуванням [37]. Вона в основному складається з целюлози, геміцелюлози та лігніну, а її фізичні властивості, такі як вміст вологи, розмір частинок, насипна щільність та пористість, залежать від типу рослини та умов вирощування. Окрім традиційного використання як підстилки для тварин та мульчі, солома може бути цінною сировиною для біоенергії, ґрунтоутворювачем для покращення його стану та будівельним матеріалом.

Однак солома зараз є основним типом твердої біомаси, що отримується з сільського господарства. Це залишки, що утворюються переважно із зернових та олійних культур. Обсяг отриманої соломи безпосередньо залежить від поверхні, на якій вирощуються зернові та олійні культури, а також від виду культури, сорту, технології вирощування, кліматичних та ґрунтових умов, застосованих агротехнічних прийомів, технології збору врожаю тощо.

Солома – це побічний продукт сільського господарства, що складається з сухих стебел злакових рослин після видалення зерна та полови. Вона становить приблизно половину врожаю за вагою зернових культур, таких як ячмінь, овес, рис, жито та пшениця. Солому зазвичай збирають та зберігають у солом'яному тюку, який являє собою тюк або пучок соломи, щільно зв'язаний шпагатом, дротом або мотузкою.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

У багатьох частинах світу солому використовують для зв'язування глини та бетону. Суміш глини та соломи може бути використана як будівельний матеріал. У тюкованому вигляді солома має помірні ізоляційні характеристики, тому її можна використовувати окремо в конструкції для будівництва будинків із солом'яних тюків. Коли солому використовують для будівництва або утеплення будівель, солом'яні тюки зазвичай обробляють штукатуркою. Оштукатурені стіни забезпечують певну теплову масу, стискаючу та пластичну структурну міцність, а також прийнятну вогнестійкість, а також тепловий опір (ізоляцію), що дещо перевищує показники північноамериканських будівельних норм. Солома є поширеним сільськогосподарським відходом, і для тюкування та транспортування для будівництва потрібно мало енергії. З цих причин будівництво із солом'яних тюків набирає популярності як частина пасивної сонячної та інших проектів відновлюваної енергетики. Пшеничну солому можна використовувати як волокнистий наповнювач у поєднанні з полімерами для виробництва композитної деревини. В роботі використано подрібнену солому зернових культур з розміром частинок 0,7 мм (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд подрібнених стебел зернових культур

2.2. Методи дослідження механічних характеристик

Визначення механічних характеристик біокомпозитних зразків виконано згідно класичних методів визначення міцності на стиснення та ударної в'язкості.

Межу міцності на стиснення визначали за методикою ASTM D695. Зразки циліндричної форми виготовляли за допомогою прес-форми, яка складається з матриці (втулки) та двох пуансонів (рисунок 2.4). Це дозволило отримати зразки діаметром 20 мм та висотою 30 мм, які піддавали стисканню з швидкістю переміщення нижньої траверси преса 2 мм/хв.

Межу міцності на стискання розраховували за формулою:

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

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

S – площа поперечного перерізу зразка, м².



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд прес-форми для виготовлення циліндричних зразків

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Ударну в'язкість біокомпозитних зразків визначали за класичною методикою згідно ГОСТ 9454-78. Зразки у вигляді стержнів довжиною 60 мм та квадратним перерізом (10x10 мм) піддавали динамічному навантаженню з використанням молота маятнікового копра. Зразки заданого розміру отримували методом механічної обробки в результаті вирізання та шліфування прес-заготовки діаметром 80 мм та висотою 10 мм.

Ударну в'язкість розраховували за наступною формулою:

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

де Q – маса молота маятнікового копра, Н;

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

α – кут зарядки молота маятника, град;

β – кут відхилення маятника після руйнування зразка, град;

γ – кут холостого ходу маятника, град.

2.3. Технологія формування біокомпозитних зразків

Робочий розчин кісткового клею отримують в результаті розчинення гранул у воді протягом 3 год за температури 60° С. Для приготування розчину використовують герметичну посудину з метою не допущення випаровування води, оскільки відбудеться зміна концентрації розчину. Однорідність розчину забезпечується постійним механічним перемішуванням суміші. Дозування компонентів здійснюють ваговим методом за допомогою лабораторних ваг 3 класу точності. Змішування компонентів композиції проводять механічним методом з використанням високошвидкісного лабораторного змішувача (рисунок 2.5), частота обертання лопатей якого становить 25000 об/хв. Тривалість змішування композиції становила 8...10 с щоб уникнути надмірного нагрівання суміші, що призводить до погіршення властивостей біополімерної матриці. Згідно технологічного процесу отриману суміш

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

(рисунок 2.6) нагрівали до температури 60...70°C для видалення частини вологи в кількості 5% та 10 %, оскільки волога погіршує механічні властивості біокомпозитного матеріалу.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд високошвидкісного лабораторного змішувача



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд композиції після змішування компонентів

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Після охолодження композицію поміщають в камеру лабораторного млина для руйнування агрегатів та забезпечення високого ступеня однорідної композиції.

Дозовану кількість композиції поміщають в порожнину матриці прес-форми і стискають під заданим питомим зусиллям у 20, 40 та 60 кН. Торцеві отвори матриці закривають пуансонами і фіксують їх механічно для уникнення композиції в процесі термічної обробки. Термічну обробку біокомпозитних зразків проводять за температури 50°C або 60°C протягом 20 хв або 30 хв. Після охолодження прес-форми біокомпозитний зразок видаляють з матриці прес-форми та досліджують для визначення механічних характеристик.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ БІОКОМПОЗИТНИХ ВИРОБІВ

3.1. Вплив технологічних параметрів на структурування біокомпозитів

Найменше значення межі міцності на стискання (17,8 МПа) мають біокомпозитні матеріали з вмістом порошку деревного борошня, які структуровані за температури 50° С протягом 20 хв з навантаженням пресування 20 кН (рисунок 3.1). З підвищенням величини питомо навантаження до 40 кН та 60 кН межа міцності на стискання зростає до 20,7 МПа та 19,1 МПа відповідно. Композиція сає підвищений вміст вологи, яка потрапляє до складу разом з розчином глютину. У випадку видалення води в кількості 5% межа міцності на стискання для біокомпозитів, композиції яких стискали з навантаженням пресування 20 кН та 40 кН майже не відрізняється від значень характеристики за аналогічних умов формування зразків. Однак за навантаження пресування 60 кН відбувається підвищення міцності на стискання на 49...50% порівняно з попередніми значеннями характеристики. Підвищення міцності на стискання пов'язано з видаленням вологи та застосуванням більшого навантаження пресування, що забезпечує наближення макромолекул глютину та утворення більшої кількості водневих зв'язків.

Значне підвищення досліджуваної характеристики відбувається у випадку видалення вологи з композиції в кількості 10%, в результаті чого зафіксовано максимальне значення міцності на стискання біокомпозитних матеріалів (50,9 МПа) за встановленого режиму структурування композиції. Це пов'язано з здатністю амінокислом глютину утворювати водневі зразки, оскільки відбувається сегментів макромолекул за умови малого вмісту води в чарунках глобул. З підвищенням навантаження пресування до 40 кН та 60 МПа міцність на стискання знижується на 27% та 33%, що пов'язано з надмірним

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

навантаженням пресування, яке спричиняє деформацію частинок деревного борошна та призводить до формування біополімерної сітки з підвищеним напруженим станом.

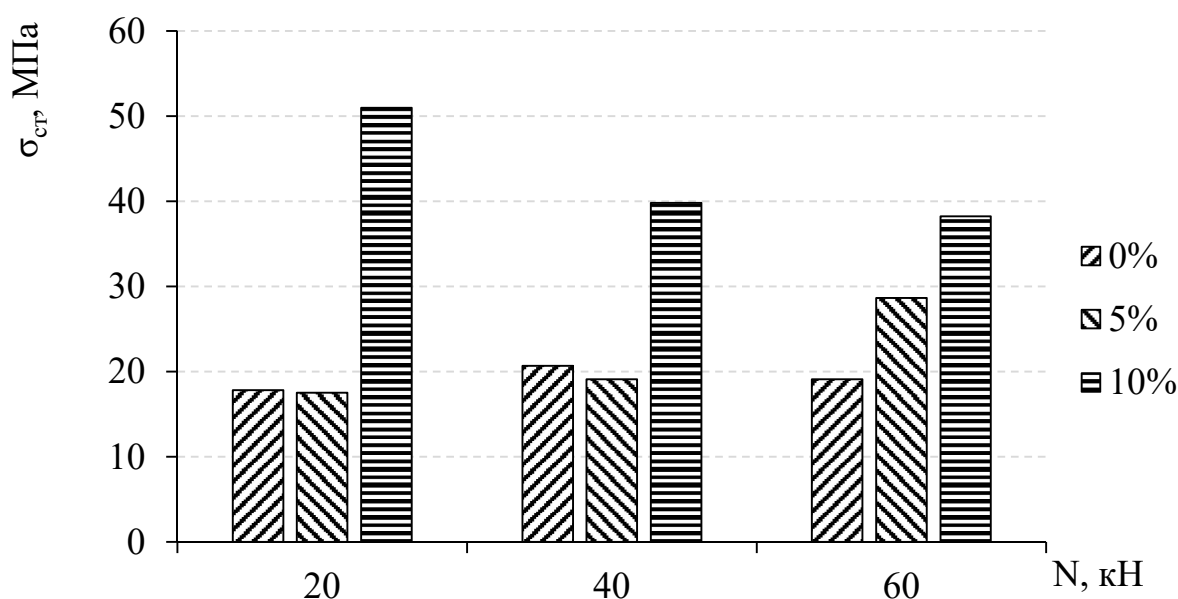


Рисунок 3.1 – Вплив навантаження пресування та ступеня осушення композиції на міцність на стискання біокомпозитів наповнених деревним борошном та структурованих за температури 50° С протягом 20 хв

Межа міцності на стискання біокомпозитних матеріалів, які структуровані за температури 50° С протягом 30 хв, є вищою майже порівняно з міцністю біокомпозитів, які структуровані за аналогічної температури протягом 20 хв (рисунок 3.2). Межі міцності на стискання біокомпозитів, композиції яких мають підвищену вологість, знаходиться в межах 49,4...52,5 МПа, що пов'язано з вищою тривалістю витримки за підвищеної температури, яка сприяє утворенню більшої кількості водневих зв'язків. Видалення вологи в кількості 5% забезпечує лінійне зростання міцності для всіх значень питомих навантажень в межах 54,1...58,9 МПа, оскільки за вищої витримки відбувається впорядкування структури біополімерної матриці.

Видалення вологості в кількості 10% міцність на стискання зростає до 73,2 МПа, що відповідає максимальному значенню за даного температурно-часового режиму формування біокомпозитів. З підвищенням величини

навантаження пресування до 40 кН та 60 кН досліджувана характеристика знижується до 70 МПа та 68,5 МПа відповідно, що визначається появою напружено стану через ускладнену рухливість сегментів макромолекул матриці, оскільки композиція втратила вологість.

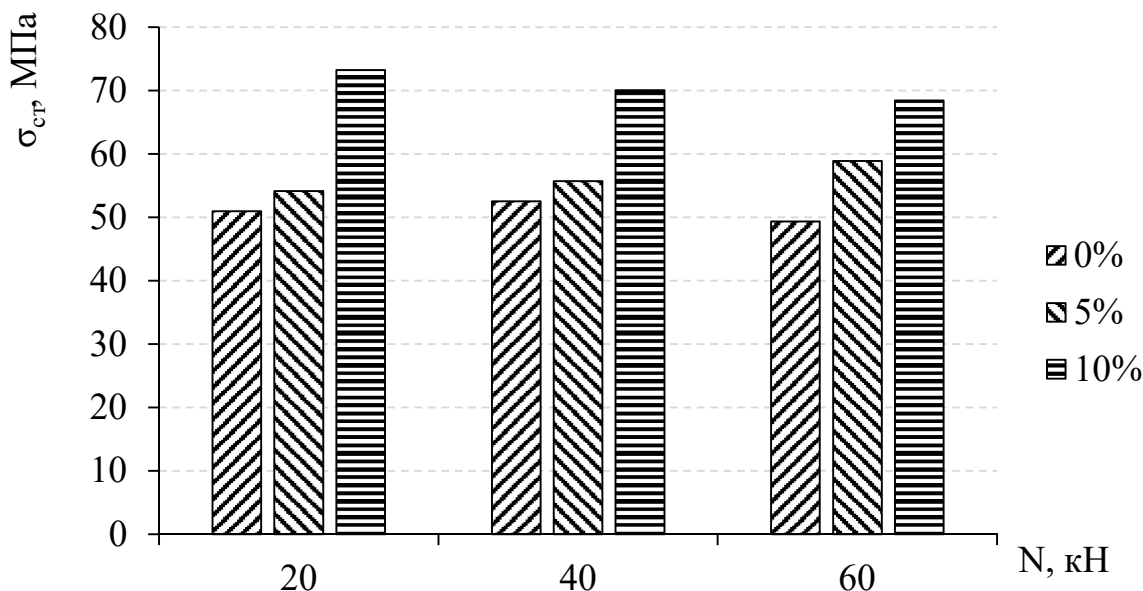


Рисунок 3.2 – Вплив навантаження пресування та ступеня осушення композиції на міцність на стискання біокомпозитів наповнених деревним борошном та структурованих за температури 50° С протягом 30 хв

Межа міцності на стискання біокомпозитів, які структуровані за температури 60° С протягом 20 хв під дією навантаження пресування 20 кН, становить 26,3 МПа (рисунок 3.3). З підвищенням навантаження пресування до 40 кН міцність на стискання знижується до 22,3 МПа, однак за навантаження пресування до 60 кН міцність на стискання зростає до 25,5 МПа, що дещо вище порівняно з міцністю на стискання біокомпозитів, які формувалися за навантаження пресування 40 кН. Зниження міцності на стискання за вищої температури 60° С пов'язано з інтенсивним виділенням води, в результаті чого утворюються порожнини, які виступають концентраторами напружень.

Зростання міцності на стискання для біокомпозитів відбувається у випадку видалення води в кількості 5% та використання навантаження

пресування 40 кН та 60 кН, що призводить до формування щільної структури біокомпозитного матеріалу, оскільки для композиції з меншим вмістом вологи потрібне вище навантаження пресування.

Максимальне значення міцності на стискання мають біокомпозити, композиції яких мають низький вміст вологи (втрата вологи 10%). З підвищенням навантаження пресування відбувається зниження досліджуваної характеристики, оскільки система має недостатню кількість вологи і за високого навантаження пресування відбувається формування біокомпозитів з підвищеним напруженим станом.

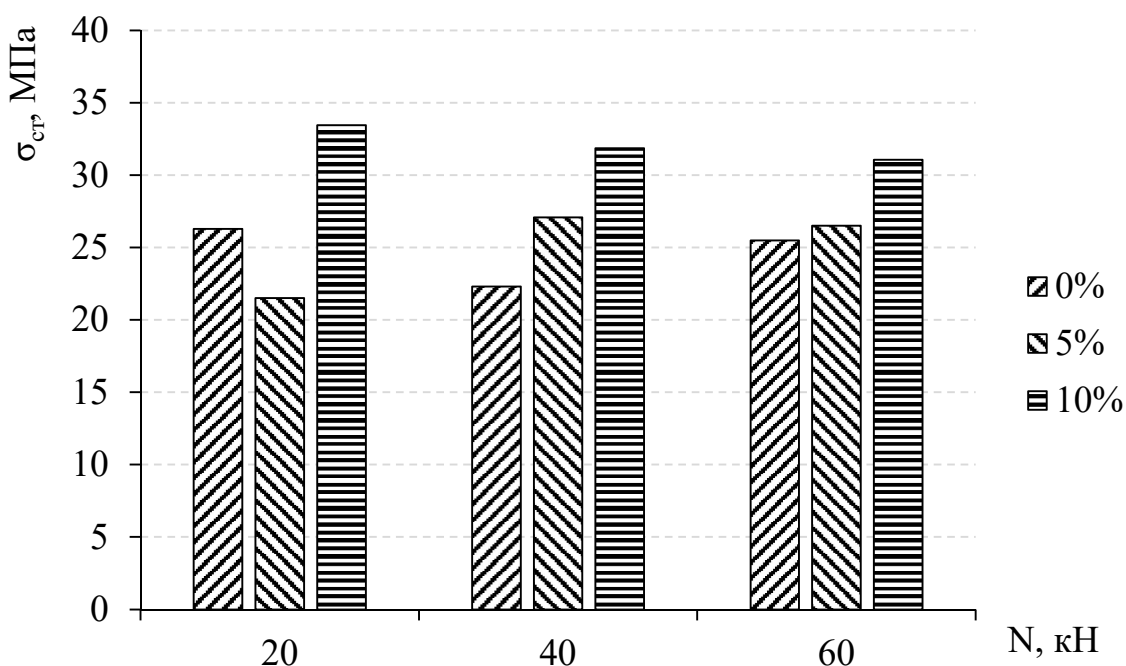


Рисунок 3.3 – Вплив навантаження пресування та ступеня осушення композиції на міцність на стискання біокомпозитів наповнених деревним борошном та структурованих за температури 60° С протягом 20 хв

У випадку формування біокомпозитів, композиції яких нагрівали до температури 60° С протягом 30 хв, межа міцності на стискання має низькі значення (7,9...10,3 МПа) (рисунок 3.4), оскільки система має підвищений вміст вологи, яка починає видалятися з утворенням мікроскопічних дефектів структури.

Формування композиції, яка втратила вологу в кількості 5% та 10%, забезпечує підвищення у 2,5 рази міцності на стискання порівняно з міцністю біокомпозитів, композиції яких мають підвищений вміст води. Втрата води забезпечує наближення сегментів макромолекул глютину з утворенням більшої кількості водневих зв'язків.

Оптимальний режим формування біокомпозитів за температури 60° С та навантаження пресування 40 кН забезпечує максимальне значення міцності на стискання (25,5 МПа), оскільки за меншого навантаження пресування ускладнене наближення сегментів макромолекул, а за вищого навантаження пресування 60 кН відбувається підвищення напруженого стану системи.

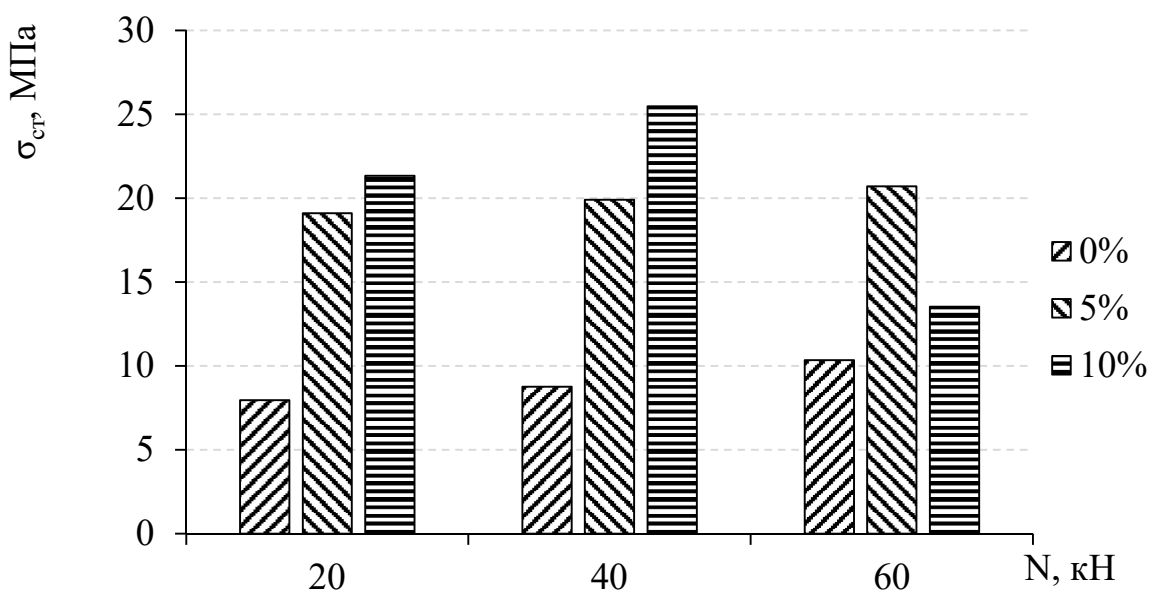


Рисунок 3.4 – Вплив навантаження пресування та ступеня осушення композиції на міцність на стискання біокомпозитів наповнених деревним борошном та структурованих за температури 60° С протягом 30 хв

Межа міцності на стискання біокомпозитів з вмістом подрібнених стебел зернових культур, структуровання яких відбувалося за температури 50° С протягом 20 хв з використанням навантаження пресування 20 кН становить 21,6 МПа (рисунок 3.5). З підвищенням навантаження пресування до 40 кН та 60 кН відбувається зниження досліджуваної характеристики на 35% та 50% відповідно порівняно з міцністю на стискання біокомпозитів, які

формувався за навантаження пресування 20 кН. Це пов'язано з пружним відштовхуванням макромолекул та частинок стебел зернових культур, які мають підвищений вміст вологи. З підвищенням навантаження пресування ефект відштовхування підсилюється. Результати досліджень біокомпозитів, композиції яких структуровані за температури 50° С протягом 30 хв, перебувають в кореляційній залежності до результатів визначення міцності біокомпозитів, які структуровані протягом 20 хв за аналогічної температури. Вищі значення міцності на стискання мають біокомпозити, які структуровані за температури 60° С протягом 20 хв за умови прикладення навантаження пресування 40 кН, оскільки максимальну кількість водневих зв'язків отримують у випадку підвищення температури до 60° С. За вищої температури потрібно застосовувати вище навантаження пресування 40 кН, яке забезпечує наближення компонентів. Аналогічну поведінку проявляють біокомпозити, які структуровані за температури 60° С з витримкою 30 хв. За таких умов отримано максимальні значення межі міцності на стиснення (44,6 МПа), оскільки за більшої витримки відбуваються процеси впорядкування структури за оптимального навантаження пресування 40 кН.

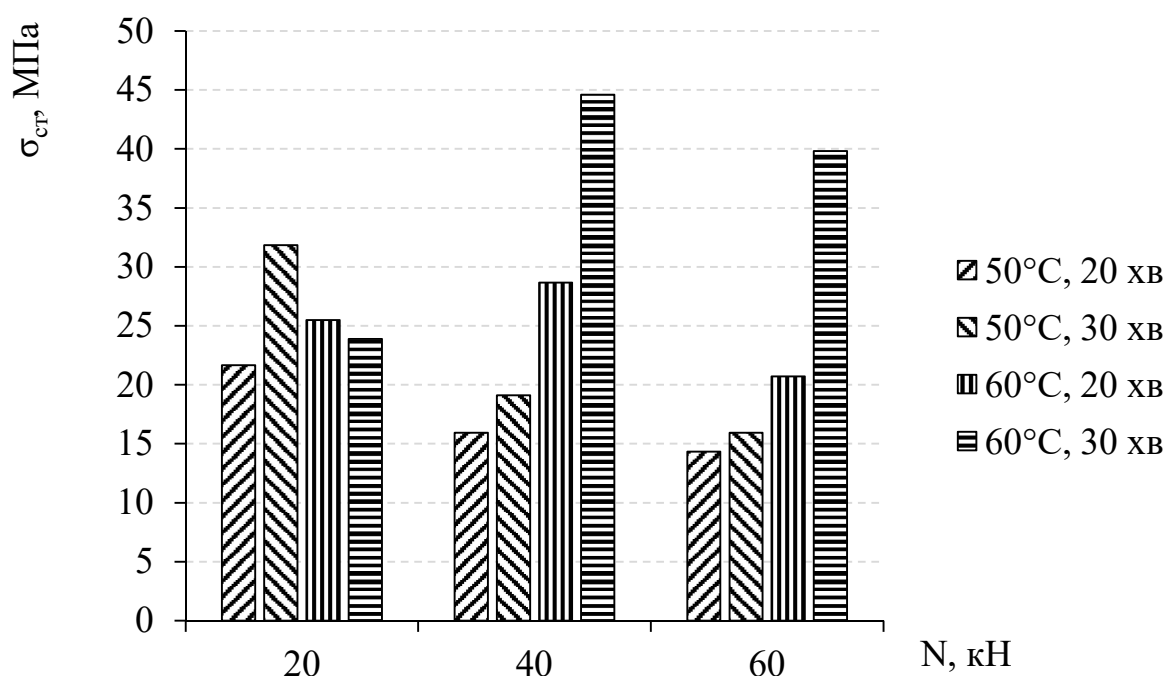


Рисунок 3.5 – Вплив навантаження на міцність на стискання біокомпозитів наповнених стеблами зернових культур

Біокомпозитні зразки з вмістом подрібнених стебел зернових культур, композиції яких структуровані за температури 50° С протягом 20 хв, мають високий ступінь деформації, що вказує на низький опір статичному навантаженню (рисунок 3.6, а). З підвищенням витримки до 30 хв ступінь деформації знижується (рисунок 3.6, б), оскільки за більшої витримки відбувається утворення більшої кількості водневих зв'язків.



а



б



в



г

Рисунок 3.6 – Загальний вигляд зразків після стискання, композиції яких структуровані за режимом: а – 50° С протягом 20 хв; б – 50° С протягом 30 хв; в – 60° С протягом 20 хв; г – 60° С протягом 30 хв

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Структурування біокомпозитів за температури 60° С забезпечує вищий ступінь структурування та вищу стійкість до статичного навантаження, що вказує на утворення тріщини невеликого розміру (рисунок 3.6, в). Найвищу міцність на стискання мають біокомпозити, які структуровані за температури 60° С протягом 30 хв, що свідчить низький ступінь деформації зразка та нерозкрита тріщина під кутом 30° (рисунок 3.6, г).

З підвищенням навантаження пресування ударна в'язкість біокомпозитів, які наповнені частинками деревного борошна, лінійно знижується від 3,4 кДж/м² до 2,8 кДж/м², що пов'язано з деформацією частинок деревного борошна під статичним навантаженням, що призводить до зростання напруженого стану (рисунок 3.7).

Ударна в'язкість біокомпозитів з вмістом частинок стебел зернових культур є вищою порівняно з ударною в'язкістю біокомпозитів з вмістом частинок деревного борошна, оскільки більші розміри частинок стебел зернових культур виступають перешкодою для поширення тріщини під дією динамічного навантаження.

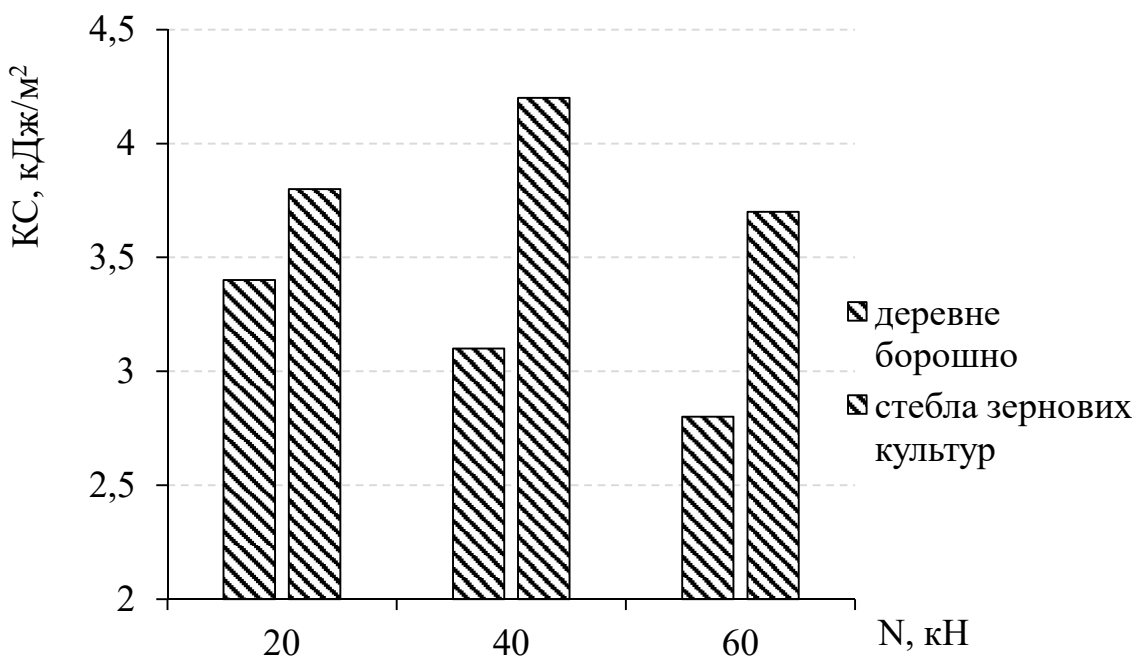


Рисунок 3.7 – Залежність ударної в'язкості біокомпозитів від питомого навантаження пресування композиції та типу наповнювача

За навантаження пресування 40 кН відбувається формування структури біокомпозитного матеріалу з низьким рівнем напруженого стану, що вказує на максимальні значення ударної в'язкості таких біокомпозитів. Оптимальне значення зусилля пресування композиції з вмістом частинок стебел зернових культур становить 40 кН, оскільки відбувається наближення компонентів з можливістю утворювати максимальну кількість водневих зв'язків.

3.2. Розробка технологічного процесу формування біокомпозитних виробів

Технологічний процес отримання біокомпозитних виробів з використанням в якості наповнювача подрібнених стебел зернових культур починається з операції заготовки сировини, яка полягає в одержанні подрібнених стебел довжиною 0,7 мм. З цією метою використовують млин молоткового типу з високою частотою обертання лопатей (20000...25000 об/хв).

Дозування компонентів виконують ваговим способом. На першому етапі готують розчин глютину шляхом розчинення гранул кісткового клею у воді за температури 60°C протягом 3 год у герметичній тарі. Дозовану ваговим способом кількість компонентів (розчин глютину та наповнювач) поміщають в робочу камеру механічного змішувача, який забезпечує рівномірний розподіл компонентів в однорідній суміші. Отриману композицію таблетують для зручного завантаження в порожнину прес-форми.

Пресування виконується з використанням гідравлічного пресу з навантаженням 40 кН, що забезпечує формування структури біокомпозитного виробу із заданими механічними характеристиками. Після видалення виробу проводять термічну обробку, яка полізає у нагріванні до температури 60° С протягом 20 хв. Сформовані вироби шліфують для видалення облою та зняття гострих кромки. Надалі наноситься лакофарбове покриття, яке надає

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

декоративного вигляду та забезпечує захист від впливу вологи та атмосферних факторів.

Послідовність проведення операцій представлено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Схема технологічного процесу формування біокомпозитних виробів

Номер операції	Назва операції	Структура операції	Обладнання, матеріали
005	Заготівельна	Подрібнити стебла зернових культур	Подрібнювач, розмір сітки 0,7 мм
010	Дозування	Гранули кісткового клею 100 мас.ч., подрібнені стебла зернових культур 100 мас.ч	Ваги до 5 кг Тара пластмасова
015	Заготівельна	Приготування розчину глютину 60 % Нагрівання до температури 60 °С, 3 год	Ємність Сушильна шафа
020	Змішування	Суміш подрібнених стебел зернових культур. Змішування 10 с	Тара. Змішувач
025	Таблетування	Дозування Стискання композиції Видалення таблетки	Вага до 5 кг Гідравчний прес
030	Пресування	Змастити порожнину прес-форми Помістити таблетку Опустити пуансон та стиснути таблетку Підняти пуансон та видалити виріб	Гідравлічний прес ДБ 2426 Прес-форма Аерозольне мастило
035	Термічна обробка	Нагріти виріб до температури 60 °С протягом 20 хв	Сушильна шафа
040	Шліфування	Шліфувати кромку	Шліфувальний верстат
045	Фарбування	Нанести шар ґрунтівки Нанести шар фарби	Ґрунтівка Фарба
050	Контрольна	Візуальний огляд на виявлення дефектів (пори або порожнини, рівна кромка, тріщини)	Стіл контролера
055	Пакувальна	Пакувати вироби	Пакувальна тара

ВИСНОВКИ

Підвищення межі міцності на стискання (50,9 МПа) біокомпозитів з вмістом деревного борошна відбувається у випадку видалення вологи з композиції в кількості 10% у випадку нагрівання композиції до температури 50° С протягом 20 хв, що пов'язано з здатністю макромолекул глютину утворювати водневі зразки.

Видалення вологості в кількості 10% призводить до зростання міцності на стискання до 73,2 МПа у випадку нагрівання композиції до температури 50° С протягом 30 хв, що пов'язано з додатковим часом впорядкування структури біокомпозитного матеріалу.

Високі значення міцності на стискання мають біокомпозити з вмістом подрібнених стебел зернових культур, які структуровані за температури 60° С протягом 30 хв за умови прикладення навантаження пресування 40 кН, що забезпечує наближення компонентів з утворенням максимальної кількості водневих зв'язків.

Навантаження пресування 40 кН забезпечує підвищення ударної в'язкості (4,2 кДж/м²) біокомпозитного матеріалу, наповненого подрібненими стеблами зернових культур, оскільки відбувається формування структури з низьким рівнем напруженого стану.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gozdecki C., Moraczewski K., & Kociszewski M. (2023). Thermal and mechanical properties of biocomposites based on polylactide and tall wheatgrass. *Materials*, 16(21), 6923.
2. Akter M., Uddin M.H., Anik H.R. (2023). Plant fiber-reinforced Polymer Composites: A Review on Modification, Fabrication, Properties, and Applications. *Polymer Bulletin*, 81, 1-85.
3. Kuram E. (2022). Advances in development of green composites based on natural fibers: a review. *Emergent Mater.* 5(3), 811-831.
4. Chan C.M. et al. (2018). Composites of Wood and biodegradable thermoplastics: a review. *Polym. Rev.* 58(3), 444-494.
5. Asyraf M.R.M. et al. (2023). Mechanical properties of Hybrid Lignocellulosic Fiber-Reinforced Biopolymer Green composites: a review. *Fibers Polym.* 24(2), 337-353.
6. Gutarowska B., Gibka D., Olejnik K., Pospiech P., Boruta T., Kapela T., Makowski K. (2024). Biocomposites based on mould biomass and waste fibres for the production of agrotexiles: Technology development, material characterization, and agricultural application. *Materials*, 17(24), 6084.
7. Correa R.C., Souza A.H., Calhelha R.C., Barros L., Glamoclija J., Sokovic M., Peralta R.M., Bracht A., Ferreira I.C. (2015). Bioactive formulations prepared from fruiting bodies and submerged culture mycelia of the Brazilian edible mushroom *Pleurotus ostreatoroseus* Singer. *Food Funct.*, 6, 2155-2164.
8. Aiduang W., Chanthaluck A., Kumla J., Jatuwong K., Srinuanpan S., Waroonkun T., Oranratmanee R., Lumyong S., Suwannarach N. (2022). Amazing fungi for eco-friendly composite materials: A comprehensive review. *J. Fungi*, 8, 842.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

9. Sharma M., Verma S., Chauhan G., Arya M., Kumari A. (2024). Mycelium-based biocomposites: Synthesis and applications. *Environ. Sustain.*, 7, 265-278.

10. Gou L., Li S., Yin J., Li T., Liu X. (2021). Morphological and physico-mechanical properties of mycelium biocomposites with natural reinforcement particles. *Constr. Build. Mater.*, 304, 124656.

11. Cairns T.C., Zheng X., Zheng P., Sun J., Meyer V. (2019). Moulding the mould: Understanding and reprogramming filamentous fungal growth and morphogenesis for next generation cell factories. *Biotechnol. Biofuels*, 12, 77.

12. Pelletier M., Holt G., Wanjura J., Bayer E., McIntyre G. (2013). An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates. *Ind. Crops. Prod.*, 51, 480-485.

13. Lakhiar I.A., Yan H., Zhang J., Wang G., Deng S., Bao R., Zhang C., Syed T.N., Wang B., Zhou R. (2024). Plastic Pollution in Agriculture as a Threat to Food Security, the Ecosystem, and the Environment: An Overview. *Agronomy*, 14, 548.

14. Briassoulis D., Dejean C. (2010). Critical review of norms and standards for biodegradable agricultural plastics: Part I. Biodegradation in soil. *J. Polym. Environ.*, 18, 384-400.

15. Fitzgerald J.S., Fenton O. (2022). Advances in biodegradable agriculture plastics: A review. *J. Clean. Prod.*, 340, 130809.

16. Islam M.Z. et al. (2022). Green composites from natural fibers and biopolymers: a review on processing, properties, and applications. *J. Reinf. Plast. Compos.* 41(13-14), 526-557.

17. Toghyani A., Matthews S., Varis J. (2020). Forming challenges of extruded wood plastic composite products in a post-production process. *Procedia CIRP*, 93, 502-507.

18. Ashori A, Nourbakhsh A. (2009). Characteristics of Wood-FiberPlastic Composites Made of Recycled Materials. *WasteManagement*, 29, 1291-1295.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

19. Rizvi GM, Semeralul H. (2008). Glass-Fiber-Reinforced Wood/Plastic Composites. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 14, 4168-4185.
20. Kalia S. (Ed.). (2018). *Lignocellulosic Composite Materials*. Springer.
21. Aaliya B., Sunooj K., Lackner M. (2021). Biopolymer composites: a review. *Int. J. Biobased Plast.* 3(1), 40-84.
22. Mohanty A.K., Misra M., Hinrichsen G. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview. *Macromol. Mater. Eng.* 276(3-4), 1-24.
23. Ashby M. (2007). *The CES EduPack Database of Natural and Man-Made Materials*. Cambridge University and Granta Design, Cambridge.
24. Pickering K.L., Efendy M.G.A., Le T.M. (2016). A Review of Recent Developments in Natural Fibre Composites and Their Mechanical Performance. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112.
25. H. Prajapati A. Tevatia A. (2022). Dixit, *Advances in Natural-Fiber-Reinforced composites: a topical review*. *Mech. Compos. Mater.* 58(3), 319-354.
26. Gholampour A., Ozbakkaloglu T. (2020). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *J. Mater. Sci.* 55(3), 829-892.
27. Rahmani H., Algirdas A., Shestavetska A., Vaiciukyniene D. (2025). Preparation and mechanical characterization of pressed carbonized wood sawdust biocomposite. *Scientific Reports*, 15(1), 1-17.
28. Chaturvedi S., Ochsendorf J. (2004). Global environmental impacts due to cement and steel. *Struct. Eng. Int.* 14, 198-200.
29. Imbabi M.S., Carrigan C., McKenna S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 1, 194-216.
30. Weyhrich C.W. et al. (2023). Renewed interest in biopolymer composites: incorporation of renewable, plant-sourced fibers. *Green Chem.* 25(1), 106-129.
31. Vaisanen T., Das O., Tomppo L. (2017). A review on new bio-based constituents for natural fiber-polymer composites. *J. Clean. Prod.* 149, 582-596.

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

32. Lai G. et al. (2023). Development of chemical admixtures for green and environmentally friendly concrete: A review. J. Clean. Prod. 389,136116.

33. Cheah C. B., Ramli M. (2011). The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. Resour. Conserv. Recycl. 55, 669-685.

34. Hemmati N. et al. (2024). Acoustic and thermal performance of wood strands-rock wool-cement composite boards as eco-friendly construction materials. Constr. Build. Mater. 445, 137935.

35. Кістковий клей [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.fine-tools.com/blog/the-use-of-hide-glue>

36. Деревне борошно [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf2010/fpl_2010_clemons003.pdf

37. Солома зернових культур [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Straw>

					БР 0225.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50