

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Інститут (факультет) Біотехнології та екологічного контролю
Кафедра біотехнології і мікробіології**

«До захисту в ЕК»
Директор інституту(декан факультету)
Наталія ГРЕГІРЧАК
(підпис) (ім'я та прізвище)
«_8_» __ грудня __ 2025 р.

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
Віктор СТАБНІКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)
«_8_» __ грудня __ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**
зі спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»
(код та назва спеціальності)
освітньо-професійної програми «Промислова та фармацевтична біотехнологія»
на тему: «Біотехнологія композитних матеріалів з використанням міцеліальних
грибів»

Виконала: здобувачка II курсу, групи ПФБ-2-1М

МЕЗІНОВА Ірина Рінатівна
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник КРАСІНЬКО Вікторія Олегівна
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультанти _____
(ім'я та прізвище) (підпис)

(ім'я та прізвище) (підпис)

(ім'я та прізвище) (підпис)

Рецензент _____
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я як здобувачка Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Біотехнології та екологічного контролю

Кафедра біотехнології і мікробіології

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»

(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Промислова та фармацевтична біотехнологія»

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

біотехнології і мікробіології

Віктор СТАБНИКОВ

«1» жовтня 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

МЕЗІНОВОЇ Ірини Рінатівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Біотехнологія композитних матеріалів з використанням міцеліальних грибів»

керівник роботи КРАСІНЬКО Вікторія Олегівна, доцент, к.т.н.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «05» 11 2025 року № 911-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 26. 11. 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: біологічний агент: *Cladosporium cladosporioides*; цільовий продукт: *міцелій*; геометричний об'єм ферментера: 2,0 м³; коефіцієнт заповнення: 0,6

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Сучасні тенденції розвитку композитних матеріалів у біотехнології; міцелій грибів як основа біокомпозитних матеріалів; технологічні аспекти вирощування міцелію; формування, модифікація та застосування міцеліальних композитів; техніко-економічне обґрунтування пакувальних матеріалів на основі міцелій-вмісних композитів (мвк); обґрунтування вибору стадій технологічного процесу; опис технологічної схеми; технологічні особливості отримання готового продукту, контроль виробництва, проєкт заявки на корисну модель.

5. Перелік графічного матеріалу

Технологічна схема виробництва біокомпозиту - 1 аркуш формату А2
Апаратурна схема виробництва біокомпозиту - 1 аркуш формату А2

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 01 жовтня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Сучасні тенденції розвитку композитних матеріалів у біотехнології</i>	<i>01.10.2025-04.10.2025</i>	Виконано
2.	<i>Міцелій грибів як основа біокомпозитних матеріалів</i>	<i>04.10.2025-08.10.2025</i>	Виконано
3.	<i>Технологічні аспекти вирощування міцелію</i>	<i>08.10.2025-10.10.2025</i>	Виконано
4.	<i>Формування, модифікація та застосування міцеліальних композитів</i>	<i>10.10.2025-12.10.2025</i>	Виконано
5.	<i>Техніко-економічне обґрунтування пакувальних матеріалів на основі міцелій-вмісних композитів (мвк)</i>	<i>12.10.2025-14.10.2025</i>	Виконано
6.	<i>Обґрунтування вибору стадій технологічного процесу</i>	<i>14.10.2025-16.10.2025</i>	Виконано
7.	<i>Опис технологічної схеми</i>	<i>16.10.2025-19.10.2025</i>	Виконано
8.	<i>Технологічні особливості отримання готового продукту</i>	<i>19.10.2025-25.10.2025</i>	Виконано
9.	<i>Контроль виробництва</i>	<i>25.10.2025-01.11.2025</i>	Виконано
10.	<i>Проект заявки на корисну модель</i>	<i>01.11.2025-10.11.2025</i>	Виконано
11.	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>10.11.2025-15.11.2025</i>	Виконано
12.	<i>Оформлення графічної частини</i>	<i>15.11.25.-26.11.2025</i>	Виконано

Здобувач

_____ (підпис)

Ірина МЕЗІНОВА

_____ (ім'я та прізвище)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Вікторія КРАСІНЬКО

_____ (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота присвячена розробленню технології отримання мікокомпозиту на основі міцелію *Cladosporium cladosporioides*, який синтезує 23,7 г/л біомаси протягом 120 год.

Міцелій використовується в будівельних матеріалах, медицині, для виробництва молекулярних сполук, для виробництва харчових добавок або нутрицевтиків, таких як протипухлинні, протиметастатичні, антиоксидантні, протизапальні, інсектицидні та антимікробні засоби, також біоматеріалів, таких як біоцемент, біоблок та біофермент тощо. У даному проєкті пропонується до використання, як пакувальну тару для пакування крафтового вина.

Технологія виробництва міцелію включає технологічний процес: (виділення і очищення біомаси; приготування целюлозної матриці; створення готового продукту), та розподіл втрат по стадіях і підбір необхідного обладнання. Особливу увагу приділено технологічним стадіям підготовки біомаси, формування біокомпозиту та можливостям адаптації таких матеріалів до потреб пакувальної індустрії. Окремий розділ присвячено підготовці патентної заявки на запропонований спосіб одержання пакувального матеріалу, що є важливим етапом у процесі комерціалізації біотехнологічних рішень.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, десяти розділів, списку використаної літератури, технологічної (формат А2) та апаратурної (формат А2) схем. Загальний обсяг роботи – 143 сторінок, 9 таблиць і 10 рисунків.

Ключові слова: *Cladosporium cladosporioides*, міцелій, біомаса, мікокомпозит, біокомпозит, гриби, технологічна схема, апаратурна схема.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
Розроб.		Мезінова І.Р.			РЕФЕРАТ	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Красінько В.О.					4	143
Реценз.						4		
Н. Контр.						Кафедра БТМ		
Затверд.		Стабніков В.П.						

ABSTRACT

The qualification paper is dedicated to the development of a technology for obtaining a mycocomposite based on *Cladosporium cladosporioides* mycelium, which synthesizes 23.7 g/l of biomass over 120 hours.

Mycelium is used in building materials, medicine, for the production of molecular compounds, for the production of food additives or nutraceuticals, such as antitumor, antimetastatic, antioxidant, anti-inflammatory, insecticidal, and antimicrobial agents, as well as biomaterials such as biocement, bioblocks, bioenzymes, etc. This project proposes its use as packaging for craft wine.

The technology of mycelium production includes the technological process: (isolation and purification of biomass; preparation of cellulose matrix; creation of the finished product), as well as the distribution of losses by stages and the selection of the necessary equipment. Particular attention is paid to the technological stages of biomass preparation, biocomposite formation, and the possibilities of adapting such materials to the needs of the packaging industry. A separate section is devoted to the preparation of a patent application for the proposed method of obtaining packaging material, which is an important step in the process of commercializing biotechnological solutions.

The qualification work consists of an introduction, nine chapters, a list of references, technological (A2 format) and equipment (A2 format) diagrams. The total volume of the work is 143 pages, 9 tables, and 10 figures.

Keywords: *Cladosporium cladosporioides*, mycelium, biomass, mycocomposite, biocomposite, fungi, technological diagram, equipment diagram.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ У БІОТЕХНОЛОГІЇ.....	13
1.1 Загальна характеристика композитних матеріалів: визначення, класифікація, роль у сучасній промисловості.....	13
1.2 Потреба в сталих та екологічно безпечних матеріалах.....	17
1.3. Біотехнологічні підходи до створення композитів: переваги над традиційними.....	23
РОЗДІЛ 2. МІЦЕЛІЙ ГРИБІВ ЯК ОСНОВА БІОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ	27
2.1. Морфологія та особливості росту міцелію.....	27
2.2 Біохімічний склад клітинної стінки (хітин, глюкани, білки).	29
2.3. Пориста структура та її значення для формування композитів.	32
2.3.1 Гідрохімічні характеристики (випробувань на сорбцію, проникність та водопоглинання).....	36
2.3.2 Термічна характеристика.....	42
2.4. Характеристика основних родів грибів, що використовуються (<i>Pleurotus</i> , <i>Ganoderma</i> , <i>Trametes</i> , <i>Fomes</i> тощо).....	44
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОЩУВАННЯ МІЦЕЛІЮ ...	47
3.1 Характеристика субстратів та джерел живлення (агровідходи, деревина, біомаса).....	47
3.2. Вплив умов культивування (температура, вологість, рН, аерація).....	49
3.3. Порівняльний аналіз глибинного і твердофазного культивування міцелію.	54
3.4. Біоінженерні підходи (генетична модифікація штамів для покращення властивостей міцелію).	57
РОЗДІЛ 4. ФОРМУВАННЯ, МОДИФІКАЦІЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МІЦЕЛІАЛЬНИХ КОМПОЗИТІВ.....	59
4.1 Методи пресування та сушіння.	59
4.2. Поєднання з іншими матеріалами (агрегати, наповнювачі).....	60
4.3. Хімічна/біологічна обробка для покращення властивостей.....	61
4.4. Сфери застосування грибних композитів.....	62

4.4.1. Упаковка як альтернатива пластику	64
4.4.2. Будівельні матеріали (ізоляція, панелі).	66
4.4.3 Дизайн, меблі, мода (екодизайн, шкірозамінники).	71
4.4.4. Можливості в медицині (біоактивні матеріали, ранові покриття).....	74
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАКУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІЦЕЛІЙ-ВМІСНИХ КОМПОЗИТІВ (МВК)	77
5.1. Характеристика міцелій-вмісних композитів.	77
5.2. Огляд ринку цільової (аналогічної) продукції.	79
5.3. Розрахунок річної потужності виробництва.	81
РОЗДІЛ 6. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СТАДІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	83
6.1. Обґрунтування вибору післяферментаційних процесів отримання біомаси міцелію	83
6.1.1 Етапи отримання мікокомполиту	83
6.1.2 Термічна інактивація міцелію.....	84
6.1.3 Відділення біомаси із культуральної рідини.....	86
6.1.4 Сушіння грибкового міцелію	88
6.2. Підбір технологічного обладнання з врахуванням матеріальних потоків по стадіях.....	89
6.3. Специфікація обладнання.	93
РОЗДІЛ 7. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ	95
РОЗДІЛ 8. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ УПАКОВОК ДЛЯ ВИНА НА ОСНОВІ МІЦЕЛІАЛЬНОГО БІОКОМПОЗИТУ	98
8.1. Обґрунтування вибору товарної форми випуску екологічної упаковки для вина на основі міцеліального біокомполиту.....	98
8.2. Специфікація обладнання.	102
8.3. Опис технологічного процесу.....	103
РОЗДІЛ 9. КОНТРОЛЬ ВИРОБНИЦТВА.	106
9.1. Показники контролю готової продукції	106
9.1.1 Фізичні показники якості листів біокомполиту	106
9.2. Методи контролю упаковки для пляшок вина на основі міцеліального біокомполиту.....	116

РОЗДІЛ 10. ПРОЄКТ ЗАЯВКИ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ.....	120
10.1. Галузь і застосування корисної моделі.....	120
10.2. Відомі аналоги та їх основні недоліки (розширена версія)	120
10.3. Постановка задачі корисної моделі та її вирішення.....	123
10.4. Опис запропонованого способу.....	124
10.5. Формула корисної моделі.....	125
10.6. Реферат.....	125
ВИСНОВКИ.....	126
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	128

ВСТУП

Зростаюча глобальна тенденція по створенню екологічно безпечних продуктів та використання у промисловості відновлюваних зелених ресурсів призводить до щорічного стійкого збільшення попиту на екологічно чисті, стійкі композити, армовані натуральним волокном, що розкладаються природнім шляхом.

Щоб максимально знизити вплив на навколишнє середовище та, як наслідок, задовольнити попит на текстиль для різних секторів застосування, використання біокомпозитів, армованих натуральним волокном. Виробництво та використання біокомпозитів зрештою підвищить екологічність та стійкість виробництва матеріалів. Ще однією причиною розробки біокомпозитів є їх легкість через нижчу щільність натуральних волокон (зазвичай коливається в межах 1,2–1,6 г/см³) порівняно із синтетичними волокнами (наприклад, скловолокно: 2,4 г/см³) (Syduzzaman, Abdullah Al Faruque, Bilisik, Naebe, 2020).

Щорічний зростаючий інтерес до сталого розвитку світової промисловості стимулює пошук сировини, яка відповідає принципам циркулярної економіки, що полягає у мінімізації відходів, максимізації ефективності використання ресурсів та сприянні повторному використанню та переробці матеріалів для створення більш сталої системи виробництва та споживання. У цьому контексті біокомпозити, пов'язані з міцелієм, армовані добавками на основі відходів, пропонують перспективний матеріал із широким спектром можливого застосування в сучасних технологіях матеріалів.

Через численні параметри та змінні у виробництві біокомпозитів, пов'язаних з міцелієм, їхній повний потенціал ще реалізований мінімально. Хоча проводилися широкі дослідження біокомпозитів на основі

					НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ВСТУП	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Мезінова І.Р.</i>					9	143
<i>Керівник</i>		<i>Красінько В.О.</i>				Кафедра БТМ ⁹		
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>		<i>Стабніков В.П.</i>						

мікроорганізмів із застосуванням у паперовій промисловості, виробництво біокомпозитів на основі цвілевого міцелію не було широко висвітлено в літературі та впроваджено у виробництво. Біокомпозитний папір демонструє високі властивості міцності на розтяг та гідрофобність, що робить його придатним для широкого спектру застосувань, включаючи покриття, мембрани, упаковку та власне папір (Fazli Wan Nawawi W.M., Lee K.-Y., Kontturi E., Murphy R.J., Bismarck A. (2019)).

У паперовій промисловості цікавим застосуванням міцеліальних біокомпозитів є виробництво паперу з целюлози, отриманої з міцелію, вирощеного з використанням лігноцелюлозних субстратів або деревних побічних продуктів (Cairns T.C., Zheng X., Zheng P., Sun J., Meyer V. (2019)). Міцеліальний папір виробляється подібно до традиційного папероробства шляхом замочування міцелію у воді, змішування його для отримання пульпи, а потім зневоднення та сушіння біокомпозиту. Біокомпозити на основі міцелію містять структурний полісахарид хітин, і папір, виготовлений з біомаси міцелію, може конкурувати з папером на деревній основі (Jones M та ін. (2019)). Через широке використання цвілевих грибів у різних галузях промисловості утворюється значна кількість відходів міцелію, що вимагає ефективних рішень щодо управління. Відходи міцелію мають широкий спектр можливого застосування, від біоремедіації та компостування до виробництва функціональних матеріалів, таких як акустична та теплоізоляція, а також біорозкладна упаковка (Gutarowska B. та ін. (2024)).

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 манопротеїнів, β -глюканів, хітину ($C_{22}H_{54}N_{21}$)_n. Структура та хімічний склад міцелію, який багатий на вуглець, азот, кисень та інші мікроелементи, такі як фосфор і сірка, надають йому унікальних механічних

та біологічних властивостей, які можуть легко руйнуватися в навколишньому середовищі (Gutarowska B. та ін. (2024)).

У контексті сучасної економіки використання пліснявого міцелію як сировини підтримує ідею замикання життєвого циклу продукту. Зокрема, цвілевий міцелій пропонує заміну традиційним виробам із паперу і картону, виробництво яких має подвійний вплив на навколишнє середовище: з одного боку, воно споживає багато ресурсів і забруднює навколишнє середовище, але з іншого боку, є більш екологічним, ніж виробництво пластику, через свою біорозкладальність та можливість вторинної переробки. Екологічність галузі залежить від використовуваних технологій, рівня переробки та джерел сировини. Традиційне виробництво паперових виробів має ряд суттєвих недоліків, таких як: 1) для виробництва паперу щорічно вирубується велика кількість дерев, що призводить до скорочення лісових масивів, які є важливим джерелом кисню та поглиначів вуглекислого газу; 2) в ході виробництва використовується велика кількість води, а стічні води часто забруднюють водоймища шкідливими хімічними сполуками; 3) забруднення повітря: виробничі процеси можуть виділяти в атмосферу свинець, оксиди азоту та сірки, а також збільшувати викиди парникових газів; 4) виробництво паперу вимагає значних витрат електроенергії та води, особливо в порівнянні з виробництвом пластику, що також робить свій внесок у екологічні проблеми.

На противагу цьому, виробництво біокомпозитів не має вищенаведених недоліків. В цілому впровадження біокомпозитних матеріалів на основі міцелію ставить перед собою наступні цілі: (1) скринінг швидкозростаючих цвілевих грибів, здатних виробляти рясний міцелій; (2) визначення оптимальних умов росту для вибраного штаму; (3) розробка складу та методу виробництва біокомпозитного листа на основі інактивованого міцелію та волокнистих добавок; (4) оцінка властивостей отриманого біоматеріалу, включаючи параметри міцності, гідрофобність та швидкість біодеградації в контрольованих та «польових умовах»; (5) оцінка використання біокомпозитних пакувальних матеріалів для пакування готових виробів.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження технології використання цвілевого міцелію *Cladosporium cladosporioides* (продуктивність 23,7 г/л біомаси) та рослинних волокнистих матеріалів у виробництві листів біокомпозиту, які можна використати для забезпечення винної промисловості біотолерантними пакувальними матеріалами, а також опис технології виготовлення готової продукції.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ У БІОТЕХНОЛОГІЇ

1.1 Загальна характеристика композитних матеріалів: визначення, класифікація, роль у сучасній промисловості

Зростаюча глобальна тенденція по створенню екологічно безпечних продуктів та використання у промисловості відновлюваних зелених ресурсів призводить до щорічного стійкого збільшення попиту на екологічно чисті, стійкі композити, армовані натуральним волокном, що розкладаються природнім шляхом. Натуральні волокна вже займають важливе місце в технології створення композитних матеріалів своїм чудовим фізико-хімічним та механічним властивостям. Натуральні волокна є біорозкладними, біосумісними, екологічними та виготовляються з відновлюваних ресурсів. Тому вони широко використовуються у виробництві композитних матеріалів як альтернатива таким традиційним, дорогим та невідновлюваним синтетичним волокнам, як скловолокно, вуглецеве волокно та арамідне волокно (Syduzzaman, Abdullah Al Faruque, Bilisik, Naebe, 2020).

Багато країн запровадили обмеження для промисловості щодо використання сировини на нафтовій основі під час виготовлення різних товарів. Наприклад, у 2005 році Європейська Комісія ухвалила «Європейську директиву 2000/53/ЄС», яка забезпечила використання 85% матеріалів, що підлягають вторинній переробці, під час виготовлення автомобільних деталей. Цей показник був додатково збільшений до 95% у 2015 році. Легка вага, але більша механічна міцність; нижчі виробничі витрати; стійкість до втоми та корозії; а також більша доступність, відновлюваність та біорозкладність, ніж у синтетичних волокон, є одними з основних причин підвищеного попиту на натуральні волокна і композити. Потенційні сфери застосування різко зросли протягом останніх кількох десятиліть, включаючи, але не обмежуючись,

					НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ У БІОТЕХНОЛОГІЇ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Мезінова І.Р.</i>					13	143
<i>Керівник</i>		<i>Красінько В.О.</i>				Кафедра БТМ 13		
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>		<i>Стабніков В.П.</i>						

автомобільний, пакувальний, військовий, спортивний, медичний, будівельний та конструкційний сектори (Peças, 2018; Witayakran, 2017).

Текстильна промисловість та індустрія моди вважається другою найбільш забруднювальною галуззю через утворення величезної кількості стічних вод та тон текстильних відходів, які безпосередньо закопуються на звалищах або спалюються (Faruque, Remadevi, Razal, Wang, Naebe, 2020). У текстильній промисловості виробництво волокон відіграє важливу роль, де волокна класифікуються як синтетичні або штучні волокна та натуральні волокна. Синтетичні волокна виробляються з невідновлюваної сировини на основі нафти, яка не є біорозкладною (Syduzzaman, 2020; Faruque, 2020). Наразі текстильні волокна використовуються не лише в традиційній швейній та індустрії моди, але й в інших галузях промисловості або секторах, таких як автомобільна, авіаційна, морська, спортивна та сільськогосподарська промисловість (Faruque, 2020). Щоб задовольнити потребу у волокнах, світове виробництво синтетичного волокна значно перевищує виробництво та використання натуральних волокон, враховуючи, що фізико-хімічні властивості синтетичних волокон можуть бути змінені залежно від кінцевого застосування та вимог кінцевого використання продукту (Syduzzaman, Abdullah Al Faruque, Bilisik, Naebe, 2020). Однак через складну хімічну структуру синтетичних волокон їх повторне використання або переробка після закінчення терміну служби є досить проблематичною. Тому їх здебільшого викидають на звалища або спалюють, що призводить до серйозного забруднення на навколишнього середовища.

Щоб максимально знизити вплив на навколишнє середовище та, як наслідок, задовольнити попит на текстиль для різних секторів застосування, використання біокомпозитів, армованих натуральним волокном. Виробництво та використання біокомпозитів зрештою підвищить екологічність та стійкість виробництва матеріалів. Ще однією причиною розробки біокомпозитів є їх легкість через нижчу щільність натуральних волокон (зазвичай коливається в

межах 1,2–1,6 г/см³) порівняно із синтетичними волокнами (наприклад, скловолокно: 2,4 г/см³) (Syduzzaman, Abdullah Al Faruque, Bilisik, Naebe, 2020).

Композитні матеріали складаються з полімерної матриці (що складається або з нафтового джерела, або з природного біополімеру) та армуючого матеріалу (у формі волокон або частинок) (Syduzzaman, Abdullah Al Faruque, Bilisik, Naebe, 2020). Такі композити можна класифікувати на три групи: зелені, напівзелені та гібридні композити, залежно від співвідношення природних матеріалів, що використовуються як армуючий матеріал (Maghsoudi-Ganjeh, 2018; Subramani, 2017; Kanitkar, 2017). Зелені або біо-композити – це композити у яких полімерна матриця, так і армуючі матеріали отримують з природних або відновлюваних джерел (наприклад, рослин або мікроорганізмів). Напівзелені композити складаються з натуральних та синтетичних полімерів, з більшою кількістю натуральних матеріалів. Гібридні композити виготовляються з однієї полімерної матриці та двох або більше окремих синтетичних або штучних волокон, таких як композитна структура, виготовлена зі скляних або вуглецевих волокон (Maghsoudi-Ganjeh, 2018; Subramani, 2017; Kanitkar, 2017).

Технологія виготовлення композитів, армованих натуральним волокном, складається із процесів підготовки заготовок та їх подальшого армування полімерними матрицями. Існує широкий спектр методів обробки, що використовуються для виготовлення композитних матеріалів. Умови застосування для кожного з цих методів досить різні. Різні типи методів виготовлення композитів можна класифікувати відповідно до методів полімерної матриці та нанесення армування на форму або відповідно до методів затвердіння. Однак, усі ці методи можна загалом класифікувати як методи відкритого або закритого формування на основі застосування армування та полімерних матричних матеріалів. Відкрите формування - це коли смола піддається впливу навколишнього середовища під час затвердіння, а закриті формування - це коли смола застигає у закритій системі. Метод виготовлення композитів вибирається на основі складових матеріалів,

наявності необхідних інструментів та властивостей, необхідних для кінцевих композитних структур. Однак, як відкрита, так і закрита методи формування мають певні переваги та недоліки. Методи відкритого формування є найбільш традиційними способами виготовлення композитів. Вони широко використовуються завдяки своїй простоті, низьким витратам на обробку, нескладним методам та різноманітності відповідних армуючих елементів та систем ламінування. З іншого боку, методи закритого формування є кращими для виготовлення тривимірних композитних деталей кращої якості, для зменшення відходів матеріалу та для ідеального та естетичного оздоблення деталей. Це здебільшого автоматизована технологія формування зі зниженими витратами на матеріали, робочу силу та утилізацію відходів, а також більшою продуктивністю. Компресійне формування, екструзійне формування та лиття під тиском є найбільш використовуваними методами відкритого формування для термопластичних композитів. Ручне укладання, лиття під тиском, вакуумне лиття під тиском та інфузія плівки смоли (RFI), що використовуються для виробництва термореактивних композитів (Syduzzaman, 2018; Maghsoudi-Ganjeh, 2018; Subramani, 2017; Kanitkar, 2017).

На механічні властивості біокомпозитів безпосередньо впливають багато різних факторів, таких як тип полімерної матриці та типи пов'язаних з нею волокон; походження, обробка та форми волокна; дисперсія волокон; розподіл у матриці; орієнтація; міжфазна взаємодія волокна і матриці; та методи, що використовуються у виготовленні композиту. Крім того, оскільки міцність армуючого волокна вища, ніж у матеріалу матриці, міцність біокомпозиту більше залежить від волокна, ніж від матриці. Отже, міцність біокомпозиту можна підвищити, збільшивши кількість волокна в структурі композиту до певної міри. З іншого боку, коли кількість волокна перевищує ліміт, навантаження, що передається через межу розділу, зменшується, а пористість композиту збільшується, що призводить до більшого зниження міцності та жорсткості композитного матеріалу. Більше того, зі збільшенням вмісту волокон у структурі композиту збільшується водопоглинання композитом, що

дуже часто погіршує механічні властивості композитного матеріалу (Syduzzaman, 2018; Mokhothu, 2015). Поряд з кількістю вмісту волокон, довжина армуючого волокна відіграє важливу роль у механічних властивостях композиту. Чим вище співвідношення сторін волокна, тим краща його несуча здатність. Однак слід зазначити, що дуже довге волокно може заплутатися, що призводить до нерівномірного розподілу волокна та армування. Матриця також є важливим компонентом композиту, який захищає поверхню волокна від зовнішніх сил, що прикладаються до композиту. Полімерна матриця передає сили, що прикладаються ззовні до композиту, на армуючі матеріали, і таким чином підвищує довговічність композиту. Зі збільшенням міжфазної взаємодії між волокнами та матрицями біокомпозити стають міцнішими. Оскільки прикладене навантаження передається від матриці до армуючих матеріалів, міжфазне зчеплення є надзвичайно важливим і є справжнім показником властивостей композиту. Для збільшення міжфазного зв'язку між волокном і матрицею необхідно покращити гідрофобність волокон, міжфазний зв'язок між матрицею і волокном, а також шорсткість. Зв'язок між волокном і матрицею зазвичай посилюється кількома механізмами, такими як механічне зчеплення, хімічний зв'язок, електростатичний зв'язок та міждифузійний зв'язок. Крім того, інші фактори, такі як температура, тиск, час і в'язкість смоли, серйозно впливають на властивості біокомпозитів (Syduzzaman, 2018; Mokhothu, 2015).

1.2 Потреба в сталих та екологічно безпечних матеріалах

Основні цілі виготовлення біокомпозитів включають, але не обмежуються, розробкою нової лінійки волокнистих композитів для заміни використання пластмас та інших синтетичних волокон, які будуть не тільки екологічно чистими, але й сталими протягом усього виробничого процесу та після закінчення терміну служби. Загалом, термін «біокомпозити» стосується виготовлених композитних матеріалів, де два або більше компонентів з'єднані разом, і принаймні один елемент отримано з природних або біологічних

ресурсів. У широкому сенсі можна сказати, що біокомпозити можуть бути утворені між деревиною та недеревними натуральними волокнами (наприклад, тверда та м'яка деревина, а також бавовняні, джутові та сизалеві волокна), між біополімерами та натуральними волокнами (НВ) або навіть між біополімерами та натуральними волокнами із синтетичними або штучними волокнами (PLA та скляні волокна). Неткані волоконні матеріали виготовляються з комбінацій натуральних армуючих агентів та полімерних матриць (Syduzzaman, Abdullah Al Faruque, Bilisik, Naebe, 2020).

Розробка технологій отримання 100% біокомпозиту є перспективним напрямом, хоча і досить складним процесом через деякі небажані властивості, пов'язані з натуральними волокнами, наприклад, високе поглинання вологи, тривалі та складні процеси екстракції та низька термостабільність, які часто негативно впливають на кінцеві механічні властивості композитних матеріалів. Тому сучасні дослідження направлені на розробки композитів, у яких до полімерних матриць входить різний відсоток натуральних волокон. Такі композити класифікуються на композити з низьким вмістом біологічної сировини (вміст натурального волокна <20%), композити з середнім вмістом біологічної сировини (вміст НВ 21–50%) та композити з високим вмістом біологічної сировини (вміст НВ 51–90%).

Дуже важливо вибрати правильні полімерні матриці для виробництва біокомпозитів. Полімери - це макромолекули, що складаються з однієї або багатьох повторюваних ланок. Полімерні ланцюги в матриці можуть бути розташовані односпрямовано або хаотично, утворюючи кристалічну та аморфну структуру, відповідно. Полімери зазвичай поділяються на термопластичні та терморективні полімери. Термопластичні полімери (наприклад, поліпропілен, полікарбонат, полііміди, поліетилентерефталат), пов'язані слабкими силами Ван-дер-Ваальса, широко використовуються у виробництві композитів, де потрібні як слабші, так і міцніші механічні властивості. Ці полімери демонструють видатну міцність та стійкість до зносу. З іншого боку, терморективні полімери (наприклад, епоксидна смола,

силікон, поліуретан) формуються у 3D-мережі разом із міцними ковалентними зв'язками та зшиванням, що робить їх міцними. Ці полімери мають вищу термостабільність, стійкість до повзучості та хімічних речовин, легку оброблюваність та добрі змочувальні властивості. Загалом, синтетичні полімери не є ні біорозкладними, ні вогнестійкими (що пригнічується додаванням полімерів природного походження) (Syduzzaman, Abdullah Al Faruque, Bilisik, Naebe, 2020).

Натуральні волокна є екологічно чистими, біорозкладними, біосумісними, відновлюваними та економічно ефективними. Наприклад, ці композити мають потенціал замінити сталь в автомобільній промисловості, що може зменшити загальну вагу транспортного засобу приблизно на 25% та споживання майже на 250 мільйонів барелів нафти (Safri, Sultan, Jawaid, Jayakrishna, 2018). НВ можуть бути використані у виробництві велосипедних рам, дверних та віконних рам, колон, стель тощо (Syduzzaman, Abdullah Al Faruque, Bilisik, Naebe, 2020).

Крім того, в останні роки, поряд з первинними НВ, для виготовлення волокна та композитів використовуються широкодоступні відходи НВ. Наприклад, деревне борошно та волокна; полімери, що підлягають переробці (наприклад, поліолефіни); волокна бавовни, льону, сизалю, джуту, конопель використовуються замість первинних пластмас для виробництва екологічно чистих біокомпозитів для тих товарів, де не потрібні композити з міцними механічними властивостями (наприклад, панелі, садові товари та упаковка). Таким чином, натуральні волокна виготовляються з природних ресурсів, таких як рослини та мікроорганізми, які є легкодоступними, біорозкладними, біосумісними та отримуються із відновлюваних джерел.

НВ загалом класифікуються за їх походженням, наприклад, на рослинні, міцелярні, тваринні та мінеральні. Рослинні волокна отримують з насіння (наприклад, капок, олійна пальма, бавовна та койра), лубу (наприклад, рамі, коноплі, льон, джут та кенаф), соломи (наприклад, пшениця, рис та кукурудза), деревини (наприклад, м'яка та тверда деревина), трави (наприклад, бамбук та

багаса) або листя (наприклад, ананас, сизаль та абака). Тваринні волокна, також відомі як білкові волокна та здебільшого використовуються в текстильній промисловості, є другими за поширеністю натуральними волокнами після рослинних волокон і отримують з овець, альпак, кашеміру, шовку, курей та качок (Väisänen, 2017; Nurazzi, 2017; Naebe, 2015). Зазвичай тваринні волокна використовуються у вигляді частинок або подрібнених волокон під час виробництва біокомпозитів (Väisänen, 2017; Mohammed, 2015; Pickering, 2016). Білкові волокна мають деякі чудові властивості, такі як вогнестійкість та термостабільність. Однак, тваринні волокна не знаходять широкого застосування у комерційному виробництві неволокнистих волокон через вищі ціни на білкові волокна (наприклад, шовк коштує 2,6–40,0 доларів США/кг) порівняно з рослинними волокнами (наприклад, коноплі коштують 1,0–2,1 доларів США/кг) (Väisänen, 2017; Muthuraj, 2015). Мінеральні волокна – це неметалеві та неорганічні волокна, що виробляються з мінералів. Азбест і скло є найбільш використовуваними мінеральними джерелами для виготовлення біокомпозитів. Однак застосування азбестових волокон наразі заборонено через їхню значну канцерогенність та інші проблеми зі здоров'ям (Peças, 2018; Mohammed, 2015). На теперішній день все більшого розповсюдження набувають біокомпозитні матеріали, які виробляються із різноманітних видів грибів, а саме із міцелію, що отримують за допомогою біотехнологічного процесу (Mohammed, 2015; Ramamoorthy, 2015; Aiduang, 2024).

Як згадувалося вище, через деякі проблеми, пов'язані з тваринними та мінеральними волокнами, такі як вартість та безпека, натуральні рослинні волокна та грибний міцелій здебільшого використовуються у виробництві.

Композити, армовані НВ, демонструють чудову біодеструкцію порівняно з матеріалами та композитами на основі синтетичних волокон, що є одним з основних аспектів виготовлення композитів (Fazita, 2016). Загалом, біорозкладні матеріали розкладаються та перетворюються на CO₂, H₂O, вуглеводні, метан та біомасу в аеробних або анаеробних умовах завдяки

хімічним або біологічним реакціям (Fazita, 2016). У більшості випадків біодеструкція матеріалу перевіряється методом захоронення в ґрунті (ASTM D5988/D5338 або ISO 14855), а результати виражаються у втраті ваги (%) (Fazita, 2016; Muniyasamy, 2015). Різні фактори, такі як молекулярна маса, хімічна структура, температура склування (T_g), температура плавлення (T_m), механічна поведінка, кристалічність та кристалічна структура, потенційно впливають на біодекструкцію (Fazita, 2016; Muniyasamy, 2015). Наприклад, полімер з високою кристалічністю та високою температурою плавлення демонструє нижчу біорозкладність, тобто меншу втрату ваги (%) (Muniyasamy, Reddy, Misra, Mohanty, 2015). Дослідження, що тривало 3 місяці, показало, що біорозкладність поліефірних композитів з ліоцелом вища (75%), ніж у чистого поліестеру, що може бути пов'язано з наявністю натурального ліоцелового волокна (Aiduang та ін. 2024). В іншому дослідженні тест на біорозкладність композитів кенаф/PLA з використанням сміттєпереробної машини показав втрату ваги на 38% протягом одного місяця компостування. Нещодавно було виявлено, що використання 40 мас.% пальмового волокна (PF) як армуючого матеріалу з матрицею полігідроксиалканоату (PHA) збільшило швидкість біорозкладу (~90%) порівняно з чистим PHA (~20%) (Aiduang, 2024; Wu, 2017). Аналогічно, дослідження Міттала та Чаудхарі показало, що біорозкладність епоксидної смоли збільшується при використанні натуральних волокон ананаса та кокосу як армуючих елементів з епоксидною смолою. Чиста епоксидна смола демонструвала лише 10% втрату ваги, тоді як композити, армовані натуральним волокном, показали від 60% до 80% втрати ваги (Mittal, Chaudhary, 2019). Автори дійшли висновку, що після закопування композитів у ґрунт як молекули води, так і мікроорганізми проникали в полімерну основу, що зрештою руйнувало вищий вміст целюлози в натуральних ананасових та койрових волокнах, що призводило до більшої втрати ваги (%) композитних матеріалів порівняно з чисто синтетичними матеріалами (Mittal, Chaudhary, 2019).

**Біодеструкція композитних матеріалів армованих волокнами
рослинного походження [1]**

Склад композиту і частки компонентів	Умови тестування біодеструкції	Результат
Полібутиленсукцинат (ПБС)/волокно шкірки цукрової тростини (ШЦТ) (95:5)	Випробування на захоронення у ґрунті (100 днів)	Максимальна втрата ваги (~20%) була виявлена для композитів ПБС/ШЦТ, ніж для чистого ПБС (~5%).
Полібутилен адипат-ко-терефталат (ПАКТ)/Висушені зерна дистилляторів з розчинним (DDGS) (70:30)	Компост (за ASTM D5338)	Композит ПАКТ /DDGS продемонстрував вищу біорозкладність (~98%) порівняно з чистим РВАТ (~92%).
Полімолочна кислота (ПМК)/клен деревне волокно (70:30)	Компост (за ISO-14855)	Ацетильна обробка деревних волокон клена збільшила їхню пористість, що посилює гідролітичну деградацію ПМК.
Поліпропілен (ПП)/Бамбук (50:50)	Випробування на захоронення у ґрунті (за ASTM D5988)	15% біорозкладність спостерігалася протягом 130 днів.
Поліетиленсебакат (ПЕС)/Ацильоване целюлозне волокно (85:15)	Компост (ASTM D5338)	Протягом 30 днів біокомпозитні продукти продемонстрували 100% біорозкладність
Полімолочна кислота (ПМК)/Кенаф (80:20) та полімолочна кислота (ПМК)/Рисове лушпиння (80:20)	Випробування на захоронення у ґрунті (90 днів)	Композити ПМК/Кенаф та ПМК/рисова лушпиння показали втрату ваги (%) у 3 та 2 рази більшу відповідно порівняно з чистим PLA.
Полімолочна кислота (ПМК)/Соева солома (70:30)	Компост (за ASTM D5338)	За 60 днів ПМК/соева солома продемонструвала 90% деградацію, тоді як чиста ПМК показала 50%.

1.3. Біотехнологічні підходи до створення композитів: переваги над традиційними

Одним із сучасних типів волокна, що демонструє великий потенціал як екологічний композитний матеріал, є біокомпозитні матеріали, які виробляються за допомогою 100% біотехнологічного процесу з використанням різноманітних видів грибів у поєднанні із утилізацією агропромислових відходів (Aiduang, 2024; Livne, 2022; Sydor, 2022).

Матеріали на основі міцелію забезпечують суттєві екологічні переваги порівняно з традиційними будівельними матеріалами. Біокомпозити на основі міцелію – це екологічно чисті матеріали, створені шляхом використання природного процесу росту грибкового міцелію на органічних відходах. Міцелій діє як природний клей, зв'язуючи органічний матеріал у твердий композит. Ці біокомпозити є адаптивними та можуть бути налаштовані для різних застосувань. Отримані матеріали можуть мати широкий спектр властивостей, включаючи еластичність, жорсткість, пористість та водостійкість, що робить їх придатними для будівництва, текстилю, упаковки тощо. Крім того, матеріали на основі міцелію є біорозкладними, економічно ефективними та потребують мінімальних енерговитрат для виробництва, що робить їх стійкою альтернативою традиційним будівельним матеріалам. Останнім часом біокомпозитні блоки з міцелію все частіше включаються в архітектурні проекти, демонструючи свій потенціал як стійкого та інноваційного будівельного матеріалу (Gavriilidis, Voutetaki, Giouzeapas, 2024)

Важливо, що виробничий процес є низьковитратним та створює незначний вуглецевий слід, за рахунок використання різноманітних видів грибів у поєднанні з агропромисловими відходами, що утворюються під час переробки. Ці залишки, такі як солома, тирса, деревна тріска, бавовна та рисове лушпиння та кукурудзяний перикарпій, щорічно утворюють тисячами тонн, і створюють труднощі з утилізацією та накопиченням залишків у виробничій системі, можуть використовуватися як органічні субстрати для розробки композитів на основі міцелію (Appels, 2019; Zimele, 2022). Коли

гриби колонізують субстрат, гіфи гриба створюють переплетений тривимірний ниткоподібний зв'язок через целюлозу, геміцелюлозу та багатий на лігнін субстрат, поглинаючи його поживні речовини та зв'язуючись із субстратом, утворюючи матеріали на основі міцелію (Elsacker та ін., 2019). Товста грибна оболонка (міцелій), яка утворюється після повної колонізації субстрату, піддається нагріванню для видалення вологи та знищення організму (вище критичної температури). Утворений продукт є інертним, легким та біорозкладним матеріалом, відомим як міцелій-вмісні композити (МВК) (Elsacker та ін., 2019). Ці композити є чистими, безпечними, міцними та біорозкладними з величезним потенціалом для заміни матеріалів на основі викопного палива та синтетичних матеріалів, таких як поліуретан та полістирол (Elsacker, 2019; Haneef, 2017). Вони також рекламуються як такі, що мають кращу ефективність переробки, що має сприяти циркулярній економіці поряд з екологічними перевагами, такими як зниження викидів та краще землекористування (Shanmugam, 2021; Alaneme, 2023).

За рахунок використання біотехнологічних методів усувається прогалина між сільськогосподарською продуктивністю та сталим розвитком у майбутньому, використовуючи різноманітність видів грибів та їхню здатність перетворювати органічні відходи на зелені композитні матеріали з високою міцністю та мінімальним впливом на навколишнє середовище, які можна застосовувати як сучасні матеріали. Водночас, інтеграція міцелію з агропромисловими відходами є екологічно ефективним рішенням для зменшення навантаження на звалища, спалювання та загального впливу на навколишнє середовище (Alaneme та ін., 2023). Крім того, дослідження кількох різних видів грибів також дає уявлення про те, як вони змінюють матеріальні характеристики міцелій-вмісних композитів (МВК), розширюючи спектр застосувань, у яких вони можуть бути використані (Attias, Danai, Tarazi, Pereman, Grobman, 2019).

Водночас, сучасні дослідження направлені на вивчення основних характеристик отриманих МВК, включаючи їх фізичні, механічні та

біологічні властивості. Крім того, біотехнологічний підхід дає змогу дослідити можливості та потенційні проблеми, пов'язані з МВК, пропонуючи комплексний погляд на їх реальне застосування в різноманітних галузях, доповнити сучасний дискурс про сталість МВК у промисловості, заохочуючи більш екологічно свідомий підхід до виробництва, одночасно зменшуючи кількість відходів та недостатнє використання ресурсів, а також тверезо оцінити їхній комерційний потенціал. Важливо, що такі дослідження слугуватимуть дороговказом до сталого розвитку технології зелених композитних матеріалах, пропонуючи перспективу на майбутнє (Alaneme та ін., 2023).

Зокрема у роботі (Alaneme, 2023; Javadian, 2020) розглянуто нещодавні розробки та властивості МВК, що використовуються в будівництві, особливо як ізоляційні матеріали, дверні панелі та віконні рами. Властивості та використання МВК у меблях як будівельних панелей та блоків для кладки були описані у роботі (Ghazvinian, Farrokhsiar, Vieira, Pecchia, Gursoy, 2019). Застосування МВК, виготовлених з міцелію, у будівельних матеріалах було розглянуто у роботі (Jones, Mautner, Luenco, Bismarck, John, 2019). Повідомлялося, що низька теплопровідність, високе звукопоглинання та пожежобезпечні властивості були серед ключових властивостей, які спонукали МВК до використання в будівництві, зокрема як ізоляційні, панельні матеріали та меблеві компоненти. Дослідники у роботі (Manan, Ullah, Ul-Islam, Atta, Yang, 2021) розглянули вплив методів обробки на властивості та застосування МВК. Було показано, що МВК були визначені як стійкі альтернативні матеріали традиційним будівельним матеріалам завдяки їхній порівняно низькій вартості, вогнестійкості або безпечності, а також екологічності. Поточний прогрес у розробці піни на основі міцелію, сендвічів, панелей, настилів, підлогових покриттів та меблевих матеріалів для будівельних конструкцій був оцінений у дослідженні (Yang, Park, Qin, 2021). Проте інші дослідження, зокрема (Sydor, Bonenberg, Doczekalska, 2021) визнали, що практичне застосування МВК обмежене їхньою низькою

міцністю та ненадійністю через високе водопоглинання. Ці недоліки можна подолати шляхом правильного вибору матеріалів для основи міцелію (штам грибка та тип субстрату) та шляхом контролю умов росту (Alaneme, 2023; Elsacker, 2021). На сьогоднішній час, пошук методів подолання виявлених проблем МВК є предметом багатьох досліджень (Alaneme, 2023; Vandelook, 2021).

РОЗДІЛ 2. МІЦЕЛІЙ ГРИБІВ ЯК ОСНОВА БІОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Морфологія та особливості росту міцелію

Оскільки гіфи грибів є невід'ємною частиною композитного матеріалу міцелію, їхні біологічні характеристики впливають як на процес виробництва, так і на характеристики матеріалу. На сьогоднішній день для застосування в біотехнологічному отриманні міцеліального матеріалу використовується близько 36 видів грибів, наприклад *Trametes versicolor* (Jones, Huynh, Dekiwadia, Daver, Joh, 2017), *Fomes fomentarius*, *Gandoderma lucidum* (Haneef та ін, 2017), *Irpex lacteus* (Yang, Zhang, Still, White, Amstislavski, 2017), *Pleurotus djamor*, *Pleurotus ostreatus lucidum* (Haneef та ін, 2017) та *Schizophyllum commune* (Appels та ін. 2018). Усі ці мікроорганізми мають сапротрофний спосіб життя, а базидіоміцети, що класифікуються як первинні редуценти, здатні рости на великій різноманітності лігноцелюлозної біомаси, навіть на низькоякісних органічних відходах, таких як тирса та солома, що робить їх ідеальними кандидатами для вирощування міцелію. Ще однією чудовою рисою є їхня здатність вирощувати майже нескінченну кількість великих мереж гіф, яка обмежується лише доступністю їхнього субстрату для росту. Тим не менш, різноманітність грибів оцінюється в 2,2–3,8 мільйона видів. Враховуючи філогенетичне різноманіття грибів, можна припустити, що існує невивчене багатство видів з потенціалом для вирощування міцелію із різноманітними властивостями (Elsacker та ін. 2020).

					НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 2. МІЦЕЛІЙ ГРИБІВ ЯК ОСНОВА БІОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.	Мезінова І.Р.						27	143
Керівник	Красінько В.О.							
Реценз.								27
Н. Контр.							Кафедра БТМ	
Затверд.	Стабніков В.П.							

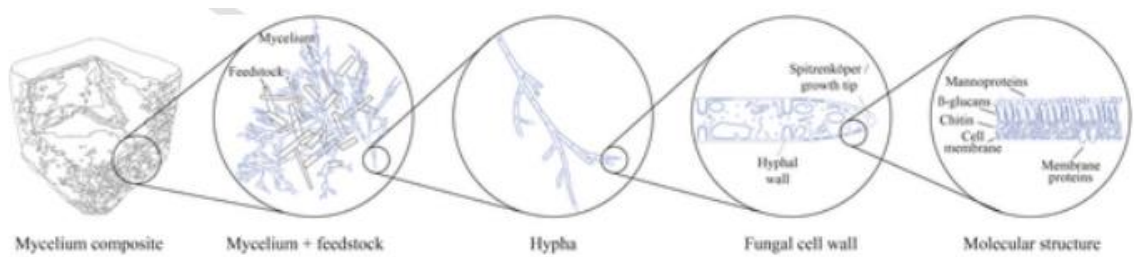


Рис. 2.1. Схематичне зображення міцелію в різних масштабах (Elsacker та ін. 2020)

Морфологічні, біохімічні та фізико-хімічні характеристики ниткоподібних гіф, мережа, яку вони будують та спосіб їхньої взаємодії з лігноцелюлозним субстратом значно відрізняються між видами залежно від їхньої філогенії, екології та способу життя (Elsacker та ін. 2020). Такі грибові характеристики, як ріст, склад клітинної стінки та потенціал до колонізації та деградації лігноцелюлозної сировини, відрізняються між видами і для визначення перспективних видів та визначення напрямку вибору найбільш підходящих видів відповідно до бажаного матеріального результату необхідні більш широкі дослідження.

Ріст гіф – це високополяризований процес, який називається розширенням кінчика (Vidal-Diez de Ulzurrun et al., 2017). У міру зростання гіф гілки неодноразово формуються під кутом від 42 до 47 градусів до довгої осі початкової гіфи. Кілька розгалужень призводять до переплетеної мережі гіфальних ниток, що називаються міцелієм. Міцелій росте всередині та навколо окремих частинок, тим самим зв'язуючи ці частинки разом у твердий композит. Цей механізм призводить до ефективної колонізації субстрату та максимізації співвідношення поверхні до об'єму, що дозволяє дуже ефективно поглинати поживні речовини завдяки великій площі поверхні, подібно до мікрворсинок кишечника у тварин (Vidal-Diez de Ulzurrun, Baetens, Van den Bulcke, De Vaets B, 2017).

Коли колонія продовжує розтягуватися, можуть відбуватися зрощення гіф (анастомоз), що призводить до утворення ґратчастої структури тканин міцелію. Гіфи згодом адаптуються під час свого розвитку та у відповідь на

навколишнє середовище. Більше того, міцелій може реагувати на локальні пошкодження шляхом зміцнення, відновлення та повторного з'єднання сусідніх гілок, що представляє інтерес у процесі виробництва міцелієвих матеріалів. Зміцнення гілок та чергування шляхів покращує не тільки транспортну здатність каналів, але й їхню стійкість до пошкоджень. Якщо найтонші гіфи постійно обрізати, стимулюється більше локального розгалуження, що призводить до посиленого зростання з'єднань. Отже, пошкодження або розтріскування міцеліальної мережі під час росту стимулює формування більш міцної та щільнішої мережі, а також регресію інших регіонів для переробки надлишкового матеріалу (Elsacker та ін. 2020).

Загалом, процеси розширення кінчика та радіального розгалуження у взаємопов'язану гратчасту мережу регулюються низкою умов навколишнього середовища, специфічних для відповідного виду, його екології та способу життя. Різні види демонструють різну морфологію гіф та міцелію при вирощуванні на одному й тому ж середовищі. Наприклад, гіфи *P. ostreatus* характеризуються більшим діаметром та більш стиснутими нитками, ніж гіфи *G. lucidum* при культивуванні в середовищі, що містить целюлозу та картопляну декстрозу (Elsacker та ін. 2020).

Три різні системи міцеліальної мережі можна охарактеризувати як мономітні, димітні та тримітні, які мають генеративні, зв'язувальні та скелетні гіфи (36, Aiduang та ін, 2022). Мономітні системи зазвичай мають лише генеративні гіфи, тоді як димітні системи зазвичай мають два типи гіф (часто генеративні та скелетні), а тримітні системи мають усі три типи гіф. Згідно з дослідженнями (Aiduang та ін, 2022), мономітна міцеліальна мережа пов'язана з нижчими механічними характеристиками, ніж димітні та тримітні гіфальні системи. Наприклад, *T. versicolor* (тримітна гіфальна система) мала кращі механічні властивості (міцність на розтяг та вигин), ніж *P. ostreatus* (мономітна гіфальна система) при вирощуванні на ріпаковій соломі (Aiduang та ін, 2022).

2.2 Біохімічний склад клітинної стінки (хітин, глюкани, білки)

Грибкові клітини утворюють трубкоподібні структури зі складним хімічним складом, клітинні стінки яких характеризуються шарами, що складаються з широко зшитих глюканових та хітинових компонентів, а також з білків, таких як гідрофобіни та манопротеїни (Gow, Latge, Munro, 2017). Хітин є гомополімером β -(1,4)-зв'язаного N-ацетилглюкозаміну, і хоча він становить лише незначну частину всієї клітинної оболонки, він значною мірою сприяє її структурній цілісності та цілісності організму в цілому. Модуль Юнга та міцність на розрив чистих хітинових плівок варіюються від 1,2 до 3,7 ГПа та від 38,3 до 77,2 МПа відповідно. Отже, присутність хітинвмісних грибкових клітинних стінок у міцеліальних композитних матеріалах – навіть у незначних частках – має вирішальне значення для структурних та механічних властивостей матеріалу. Оскільки клітинні стінки грибів демонструють значний ступінь фенотипової різноманітності та пластичності, це сприяє технологічності матеріалу (Elsacker та ін. 2020; Gow, 2017).

Найпоширенішими полісахаридами в клітинних стінках грибів є глюкани. Вони необхідні для інтеграції функціональних білків та скелетного хітину, а також для формування найважливіших структурних компонентів клітинних стінок грибів. Глюкани в грибах з'єднані через альфа (α) або бета (β) зв'язки. Альфа 1,3 є найпоширенішими альфа-глюканами. Вони забезпечують стійкість до значної деформації клітинних стінок у вигляді структурних мікрофібрил. Структура бета-глюканів є більш складною. Вони в основному містять β 1,3 та β 1,6 зв'язки, утворюючи вторинні мікрофібрили (Yang, Park, Qin, 2021).

Хоча гриби є багатим джерелом багатьох білків, небагато білків було ідентифіковано. Ферменти, що беруть участь у розкладанні лігноцелюлози, є одними з найбільш досліджених груп білків грибів. Лаккази, пероксидази, оксидази, целюлази та різні глікозидази містяться в інших видах грибів для участі в розкладанні. Принцип, за яким ферменти розкладають лігноцелюлозу

у грибів, полягає у взаємодії окислювальних та гідролітичних ферментів. Гриби мають два типи систем розкладу: внутрішньоклітинну та зовнішній шар клітинної оболонки, який є важливим для розкладу полісахаридів. Більше того, позаклітинно гідролітичні ферменти відповідають за розклад полісахаридів, а окислювальні ферменти відповідають за розклад лігніну та відкритих фенільних кілець (Andlar M., 2018). В основному, існують три групи грибів з різним впливом та механізмами деградації лігноцелюлози, це гриби м'якої гнилі, білої гнилі та бурої гнилі. Гриби м'якої гнилі можуть руйнувати поверхневі полісахаридні шари рослин і здебільшого є аскоміцетами. Пероксидази беруть участь у модифікації лігніну та виробленні лакказ, що призводить до потемніння та розм'якшення деревини. Ці ферменти мають обмежені функції руйнування. Гриби білої гнилі можуть руйнувати лігнін, целюлозу та геміцелюлозу. Руйнування лігніну відбувається ефективніше, ніж у грибів коричневої та м'якої гнилі. Деревина змінює свою текстуру та стає вологою, м'якою та шовковистою. Її колір стає білим або жовтим. Гриби коричневої гнилі - це базидіоміцети, які мають ферментну систему, ніж гриби м'якої гнилі, щодо руйнування лігніну. Вони можуть швидко метаболізувати целюлозу та геміцелюлозу та лише незначно модифікувати лігнін. Внаслідок окислювальної реакції лігніну деревний залишок має кубічну форму та коричневий колір (Andlar, 2018). Гідрофобіни є однією з інших важливих груп білків, унікальних для грибів. Гідрофобіни локалізовані на зовнішній поверхні клітинних стінок нитчастих грибів. Вони необхідні для росту грибів та взаємодії між грибами з навколишнім середовищем, сприяючи розвитку в повітрі (гриби схильні рости вгору) та сприяючи прикріпленню грибів до твердих опор. Крім того, гідрофобіни роблять гриби гідрофобними, збираючись в амфіпатичну мембрану, оскільки гідрофобна сторона виходить назовні, а гідрофільна поверхня поєднується з полісахаридами клітинної стінки (Yang, 2021; Andlar, 2018).

У літературі присутня досить невелика кількість досліджень щодо того, як характеристики матеріалу змінюються залежно від використовуваного виду

або штаму грибів, вони вказують на важливу кореляцію між (філо)генетичною природою та механічними властивостями, які, серед інших причин, можна пояснити складом клітинної стінки. Наприклад, вища міцність на стиск і жорсткість виявлена у міцелію *T. versicolor* порівняно з *P. ostreatus*, а у *P. ostreatus* жорсткіші (в 2 рази, E : 28 МПа), ніж у *G. lucidum* (E : 12 МПа). Це можна пояснити вищим вмістом полісахаридів у компонентах клітинної стінки *P. ostreatus* (Haneef et al., 2017).

З іншого боку, *G. lucidum* демонструє більше видовження при розриві (в 3 рази, ϵ : 33%) та вищі значення міцності (σ : 0,8 МПа) порівняно з *P. ostreatus* (ϵ : 9% та σ : 0,7 МПа), оскільки міцелій *G. lucidum* містить більшу кількість білкових та ліпідних складових, пов'язаних з інфрачервоними спектрами поглинання міцелію, які можуть діяти як пластифікатори. Міцелій *G. lucidum* також демонструють ширший розподіл модуля Юнга (Haneef, 2017). Міцність на розтяг непересованого *T. versicolor* (σ : 0,04 МПа, E : 4 МПа) порівняно з *P. ostreatus* (σ : 0,01 МПа, E : 2 МПа), вирощеного на ріпаковій соломі, суперечить властивостям термопресованого *T. versicolor* (σ : 0,15 МПа, E : 59 МПа) порівняно з *P. ostreatus* (σ : 0,24 МПа, E : 97 МПа). Ствоєння міцелію з найвищою міцністю на розтяг можна віднести до *S. commune*. Модуль Юнга (E : 913 МПа) та міцність на розтяг (σ : 9,5 МПа) дикої типу *S. commune* до 76 та 9 разів сильніші порівняно з *G. lucidum* та відповідно в 33 та 9 разів для *P. ostreatus*. Однак, подовження при розриві було до 23 разів вищим для *G. lucidum* та в 6 разів вищим для *P. ostreatus* (Elsacker та ін. 2020; Haneef, 2017; Appels, 2018).

2.3. Пориста структура та її значення для формування композитів

Клітинні стінки гіф містять різні біополімери, включаючи ліпіди, хітин (полісахариди, що сприяють жорсткості), β -глюкани та інші глікопротеїни. Ці компоненти забезпечують природну жорсткість мережі міцелію та містять широкий спектр поверхнево-активних хімічних груп. Численні дослідження показали, що фізичні та поживні зміни в середовищі, де росте міцелій,

впливають на напрямок росту та анастомоз (біфуркацію або злиття) провідних гіф. Ці фактори, у свою чергу, впливають на локальну зв'язність та архітектуру мережі. Програмованість структури міцелію під час виробництва дозволяє розробляти пористі структурні матеріали з бажаними властивостями, що мають потенціал для різних практичних застосувань. В останніх розробках міцелій показав себе як перспективний біокаркас для тканинної інженерії. Автоклавані міцелієві мережі продемонстрували біосумісність з первинними фібробластами шкіри людини, що дозволяє їм безпосередньо прикріплюватися та проліферувати всередині шкіри.

Подібно до інших біологічних фібрилярних мереж, таких як деревна геміцелюлоза та колаген, міцелій демонструє сильну кореляцію між своїми структурними характеристиками та механічними властивостями в об'ємі. Під час дослідження (Haneef, M. et al. (2017) було виявлено, що додавання картопляного декстрозного бульйону (КДБ) до живильного субстрату стимулює біосинтез пластифікаторів (ліпідів та білків), одночасно зменшуючи вміст хітину в гіфальній стінці міцелію. В результаті модуль пружності міцелієвої мережі зменшився приблизно в 2-3 рази (і продемонстрував збільшення подовження приблизно на 130%) порівняно з мережею, вирощеною без КДБ. Зміна виду міцелію також продемонструвала зміни в хімічному складі гіф, що вплинуло на модуль пружності міцелієвої мережі. Крім того, умови навколишнього середовища, такі як рівень CO₂, температура, вологість та освітленість, безпосередньо впливають на щільність міцелієвої мережі (що змінюється в діапазоні від 0,029 до 0,35 г/см³). Під час аналізу механічних властивостей міцелієвих мереж за допомогою графіка Ешбі вони демонструють поведінку, подібну до пінопластів або інших випадкових полімерних мереж. Багатомасштабна континуальна модель, що враховує локальні коливання щільності в тканині міцелію, дозволила розглянути спостережувану поведінку деформаційного зміцнення мережі міцелію під осьовим стискальним та розтягувальним навантаженням (Olivero та ін. 2023).

Дослідження систематично характеризує мікроструктурні та гігротермічні властивості багат шарових будівельних біокомпозитів (БББ), виготовлених з конопляних та солом'яних субстратів, колонізованих *Ganoderma lucidum* та *Trametes versicolor*. У дослідженні було оцінено, як варіації комбінацій субстрат-грибок та параметри виготовлення впливають на мікроструктуру БББ, а також характеристику ключових ізоляційних властивостей, включаючи адсорбцію вологи, паропроникність, водопоглинання та теплопровідність. Дослідження прагне встановити пряму кореляцію між мікроструктурними характеристиками та експлуатаційними характеристиками матеріалу, пропонуючи цінну інформацію про взаємодію грибів і субстрату та оптимізуючи конструкцію БББ для сталого утеплення будівель. Аналізувались різні моделі композитних матеріалів, скорочені назви яких (ГКБП, ГКБН, ГКЗН, ГСЗП, ТКБП, ТСБП, ГСБС, ТКБС) для зручності шифрувалися наступним чином:

- Вид грибів: *Ganoderma lucidum* (G), *Trametes versicolor* (T);
- субстрат: Конопля (K), Солома (S);
- Додаток: З додатком (Z), Без додатку (B);
- Метод дезінфекції: Непастеризований (N), Пастеризований (P), Стерилізований (C). (Motamedi, Rouse, Promis, 2025)

Цей аналіз мав на меті дослідити взаємодію між грибним міцелієм та конопляним субстратом, формування гіфальних мереж та загальну морфологію матеріалу. Розуміння цих мікроструктурних особливостей є важливим, оскільки вони безпосередньо впливають на механічну цілісність, пористість та міжфазні зв'язки всередині композиту. Аналіз зосереджувався на двох вибраних зразках: GNOR та VNOR .

Переплетена структура гіф вказує на густу мережу, що свідчить про ефективну колонізацію субстрату, яка є вирішальною для формування МВС (мікробатичних конопель). За даними дослідження (Yang, Park, Qin, 2021), видовжений і тонкий вигляд гіф, ймовірно, є результатом усадки під час

процесу сушіння, оскільки гіфи втрачають вміст води. Діаметр ниток міцелію коливаються від 1 до 3 мкм для GHOP та приблизно 1 мкм для VHOP, що відповідає нижньому діапазону розмірів ниток білого міцелію (1–30 мкм) (Yang, Park, Qin, 2021). Виходячи з взаємодії між міцелієм та субстратом, багатомасштабний ефект волокон між міцелієм та гранулами позитивно впливає на механічні властивості композиту, підвищуючи ударостійкість (Cai та ін., 2023)

Щільна, взаємопов'язана міцеліальна мережа, ймовірно, зміцнює зв'язок між гранулами, ефективніше розподіляє навантаження та покращує розсіювання енергії при ударі, що сприяє більшій довговічності. Мережа міцелію виглядає щільнішою у *Ganoderma lucidum*. Враховуючи, що субстрат однаковий в обох зразках, це свідчить про те, що гранули конопляної шийки можуть не так ефективно підтримувати розвиток у *Trametes versicolor*. Щільніший ріст грибів у зразку на основі *Ganoderma* призводить до меншої пористості, що впливає на гідрагенні та теплові властивості. Щільно переплетені нитки гіфів ефективно заповнюють порожнечі між гранулами конопель, створюючи більш цілісну матрицю. Це свідчить про те, що клітини *Ganoderma lucidum* демонструють кращу колонізацію субстрату, покращуючи адгезію частинок і загальну цілісність композиту порівняно з *Trametes versicolor*.

Також спостерігається, що міцелій не проникає у внутрішню структуру агрегатів, що є суттєвою перевагою оскільки збереження пористої структури покращує ізоляційні властивості матеріалу, зменшуючи теплопровідність. Крім того, при великих збільшеннях наявності міцелію на поверхні гранул свідчить про часткове перетравлення лігноцелюлози грибом. Ця взаємодія вказує на здатність грибка руйнуватися та прилипати до субстрату, потенційно впливаючи на механічні властивості матеріалу. Присутність міцелію помітно більш виражена у *Ganoderma lucidum*, що свідчить про сильнішу ферментативну активність або колонізацію поверхні порівняно із *Trametes versicolor* (Motamedi, Rouse, Promis, 2025).

Крім того, частково сферичні або зернисті структури, що спостерігаються на гранулах, ймовірно, є частиною мережі міцелію. Ці утворення, ймовірно, є хламідоспорами, спеціалізованими грибковими структурами, відомими своєю стійкістю до суворих умов, таких як посуха та високі температури. Їхня присутність свідчить про потенційний механізм адаптації, який посилює здатність міцелію виживати в складних умовах навколишнього середовища. Незважаючи на цю грибкову активність, клітинні стінки субстрату зберігають свою фундаментальну морфологію, що вказує на те, що хоча міцелій взаємодіє з субстратом, він суттєво не змінює його структурну цілісність. Хоча ці спостереження виявляють чіткі відмінності у формуванні мережі та колонізації субстрату, їх функціональний вплив на поведінку, пов'язану з вологою, вимагає подальшого аналізу (Motamedi, Rouse, Promis, 2025).

2.3.1 Гідрохімічні характеристики (випробувань на сорбцію, проникність та водопоглинання)

Випробувань на сорбцію Здатність композитів до сорбції вологи досліджувалась на моделях БББ, що представляють собою різні комбінації клітин продуцентів, субстратів, добавок та методів дезінфекції. Ізотерми сорбції, виміряні при 23 °С, дали змогу порівняти вплив міцелію, обробки, субстрату та типів добавок на сорбцію за різними рівнями відносної вологості для протестованих рецептур.

Графіки ізотерм сорбції показали, що тип добавки має найбільший вплив на гігроскопічність, причому для комбінації GK3H поглинання вологи на 21,82% вище, ніж поглинання вологи для GKBH при 90% відносної вологості, далі йде тип субстрату, де GK3H (на основі конопель) демонструє на 11,38% вище поглинання, ніж GC3P (на основі соломи) при 90% відносної вологості. Тип дезінфекції (GKBP проти GKBH) має менший вплив, з максимальною різницею 5,28% при 80% відносної вологості, тоді як тип міцелію (GKBP проти ТКБП) демонструє найменший вплив, причому поглинання GKBP лише на 4,34% вище, ніж ТКБП при 60% відносної вологості. Початкова

інтерпретація незначної різниці в сорбції, що спостерігається між ГКБП та ТКБП, показує сильну колонізацію поверхні обома видами. Присутність хітину в міцеліальних структурах може збільшувати гідрофобність поверхні, що потенційно призводить до подібної взаємодії із вологою в умовах низького тиску (Motamedi, Rouse, Promis, 2025).

Хоча різниця в поглинанні води між ГКБП та ТКБП кількісно невелика (4,34% при 60% відносної вологості), структурний аналіз дає цінну інформацію про цю поведінку. *Ganoderma lucidum* утворює щільнішу та більш взаємопов'язану гіфальну мережу порівняно з *Trametes versicolor*, що, як правило, призводить до створення більш пухкої та більш локалізованої структури. Щільніша мережа в ГКБП, ймовірно, посилює зв'язок між внутрішніми порами, одночасно обмежуючи їхній об'єм, тим самим зменшуючи капілярну конденсацію при високій відносній вологості. І навпаки, більш пориста структура ТКБП може надати більше місць адсорбції, але зі зниженою взаємозв'язністю, що призводить до локалізованого насичення, яке не призводить до збільшення загального вмісту води.

Крім того, відносно вища сорбція, що спостерігається в композитах на основі конопель (наприклад, ГКЗН) порівняно з композитами на основі соломи (наприклад, ГСЗП), узгоджується з відмінностями в ефективності колонізації грибами. Спостерігався більш однорідний розвиток міцелію в композитах на основі конопель, тоді як композити на основі соломи демонстрували анізотропну колонізацію та неповне покриття міжзеренних просторів. Це призводить до менш ефективних шляхів транспортування води та зниженої здатності до однорідного розподілу води по всьому об'єму матеріалу, незважаючи на вищі значення відкритої пористості (Motamedi, Rouse, Promis, 2025)..

Показовим є вплив добавок, який спостерігається в ГКЗН, також узгоджується з мікроструктурними тенденціями. Харчові добавки посилюють активність грибів та проліферацію гіф, збільшуючи загальну площу поверхні, доступну для взаємодії з вологою. Це також може сприяти утворенню більш

складних капілярних мереж у композиті, що призводить до збільшення затримки вологи при вищих рівнях відносної вологості. Дещо вище поглинання вологи в ГКБП через взаємопов'язаність мережі та значне збільшення поглинання з використанням добавок (ГКЗН), вказує на вищу гігроскопічну здатність, пов'язану зі збільшеною площею поверхні. Підсумовуючи ці кореляції стає очевидним, що сорбційна поведінка в композитах на основі міцелію визначається не лише загальною пористістю або видами грибів, але й просторовою конфігурацією та зв'язністю гіфальної мережі, що утворюється під час колонізації.

Інтеграція мікроструктурних особливостей в інтерпретацію вимірювань вологості дає більш повне розуміння динаміки вологості та підтверджує гіпотезу про те, що контроль морфології грибів за допомогою параметрів виготовлення є ключем до адаптації характеристик МВК для будівельних застосувань.

Також виявляють суттєві відмінності: ГКБП та ГКБН демонструють вищі значення вологості моношару, ніж ТКБП, що вказує на сильнішу початкову спорідненість до вологи. Це підтверджує гіпотезу про те, що присутність хітину в *Ganoderma lucidum* (Yang, Park, Qin, 2021), збільшує гідрофобність поверхні, а також створює внутрішні зони, що сприяють багатшаровій адсорбції за умов високої відносної вологості (Motamedi, Rousse, Promis, 2025)..

Далі порівнювали ізотерми адсорбції для рецептури ГКЗН за п'яти температур (15 °C, 23 °C, 30 °C, 35 °C та 40 °C) для оцінки впливу температури на здатність до зберігання вологи за різних рівнів відносної вологості. Ізотерми показали стабільний вміст вологи в діапазоні 0–5% до 60% відносної вологості, зростаючи до 25–30% при 90% відносної вологості за всіх температур, що вказує на мінімальний вплив температури на ємність зберігання (кг/кг). Як правило, при вищих температурах (35 °C та 40 °C) спостерігається незначне збільшення адсорбованої вологи, можливо, через незначне розширення пор. Однак, оскільки цей матеріал вже є дуже пористим,

температура суттєво не змінює його внутрішню структуру, що призводить лише до незначних змін в адсорбції вологи. Цей висновок відрізняється від гігроскопічної поведінки інших ізоляційних матеріалів, де температура зазвичай суттєво впливає на сорбцію вологи, що свідчить про необхідність подальших валідаційних випробувань з додатковими рецептурами для підтвердження цієї поведінки (Motamedi, Rouse, Promis, 2025).

Проникність. Це випробування допомогло оцінити паропроникність за градієнтів відносної вологості 0/50% та 0/80% з використанням трьох рецептур (ГСЗП, ГКЗН та ТСБП). Для кожної суміші було випробувано три зразки. Результати дослідження підтвердили вищу проникність у складі соломи та *Ganoderma lucidum* (ГСЗП) порівняно із зразками соломи та *Trametes versicolor* (ТСБП), а також конопель та *Ganoderma lucidum* (ГКЗН), хоча їхні значення залишаються дуже близькими. Для випадку градієнта відносної вологості 0/80 коефіцієнт опору зменшився приблизно на 22% для СБП, на 28% для ГСЗП та на 30% для ГКЗН.

Хоча паропроникність зазвичай асоціюється із загальною пористістю, зв'язність пор та гіфальна архітектура можуть відігравати не менш важливу роль у перенесенні пари вологи через композити на основі міцелію. *Ganoderma lucidum* розвиває щільну, безперервну гіфальну мережу, яка утворює тісно пов'язані шляхи між частинками субстрату. У випадку композитів на основі соломи, таких як ГСЗП, ця структура не тільки зберігає взаємозв'язок пор, але й стабілізує геометрію пор, запобігаючи руйнуванню під час висихання та тим самим підтримуючи ефективну дифузію пари. Це пояснює відносно високу проникність, що спостерігається в ГСЗП, незважаючи на потенційно нижчу загальну пористість порівняно з ТСБП. І навпаки, міцелій *Trametes versicolor* демонструє більш фрагментовану та локалізовану картину колонізації, що призводить до дискретних зон пор, які погано пов'язані між собою. Хоча це може призвести до вищої загальної пористості, відсутність безперервності між пустотами серйозно обмежує перенесення пари, збільшуючи коефіцієнт опору дифузії пари μ . Це підтверджує ідею, що «ефективна пористість», тобто частка

порового простору, яка сприяє об'ємному транспорту, є більш релевантною, ніж абсолютна пористість, при інтерпретації паропроникності в біокомпозитах (Motamedi, Rousse, Promis, 2025).

Більше того, поєднання солом'яного субстрату та поживних добавок у ГСЗП, ймовірно, посилило як інтенсивність росту міцелію, так і структурну однорідність, що ще більше сприяло оптимальному балансу між розміром пор, розподілом та зв'язністю. Це може пояснити, чому ГСЗП демонструє не тільки вищу паропроникність, ніж ТСБП, але й різкіше зниження за умов відносної вологості 0/80%, що відображає покращений транспорт вологи навіть за підвищених градієнтів вологості.

Насичення вільною водою. Випробування на насичення вільною водою було проведено для кількісної оцінки відкритої пористості та водоутримувальної здатності композитів на основі міцелію. Шляхом занурення зразків у воду в контрольованих умовах цей тест оцінює, наскільки ефективно кожна формуляція поглинає та утримує воду, тим самим надаючи важливе розуміння структури пор та гіротермічних характеристик. Було проаналізовано вісім формуляцій для оцінки впливу ключових параметрів, включаючи види грибів, тип субстрату та обробку, на поглинання води.

Отримані результати підкріплюють та контекстуалізують спостережувані гіротермічні тенденції, надаючи уявлення про взаємозв'язок між морфологією грибів, структурою субстрату та поведінкою МВК щодо зберігання води. Такі моделі, як ГКБП, демонструють відносно високу суху щільність (152 кг/м^3) у поєднанні з нижчою відкритою пористістю (85%) та помірним насиченням вільною водою (580%), що відображає щільно переплетену мережу гіф. Ця компактна структура мінімізує об'єм пустот та перешкоджає проникненню води, що сприяє низьким коефіцієнтам капілярної адсорбції та помірній сорбційній здатності при високій відносній вологості. На противагу цьому, ТСБП демонструє вищу відкриту пористість (88%) та насиченість водою (704 кг/м^3), що узгоджується з фрагментованим та слабо пов'язаним ростом гіф. Така архітектура призводить до численних ізольованих

або тупикових пор, які сприяють високому поглинанню води, але забезпечують обмежений опір переносу вологи. Незважаючи на таку високу пористість, ізотерми сорбції для ТСБП показують лише помірний вміст вологи, що вказує на те, що сорбція у парофазній фазі ускладнюється відсутністю безперервних шляхів та локалізованим характером розвитку гіф. Збагачені добавками рецептури (наприклад, GKЗН та GCЗП), як правило, демонструють щільнішу внутрішню організацію та знижену капілярну сорбційну поведінку, ймовірно, через посилену колонізацію грибами та більшу розгалуженість гіф. Ці рецептури демонструють нижчі рівні насичення вільною водою (375–382 кг/м³) та демонструють більш поступові криві сорбції, як це видно в GKЗН. Це свідчить про те, що хоча добавки збільшують площу поверхні для адсорбції пари, вони одночасно обмежують швидку інфільтрацію рідини, ймовірно, зменшуючи великі, безперервні канали пор. Композити на основі соломи, такі як GCЗП та GCБС, демонструють як вищу пористість (до 88%), так і підвищене насичення вільною водою, що вказує на більшу схильність до капілярного поглинання води та об'ємного насичення. Така поведінка зумовлена менш компактною та більш гетерогенною структурою частинок соломи, що сприяє нерівномірному росту грибів та більшим пустотам. Як було показано раніше, коефіцієнт капілярного поглинання для GCЗП більш ніж утричі вищий, ніж для GKБП, що підтверджує домінуючий вплив морфології субстрату на рідкофазний транспорт води. Загалом, ці результати демонструють, що утримання води в МВК визначається не лише відкритою пористістю, але й геометрією, зв'язністю та функціональністю внутрішньої мережі пор, які формуються видами грибів, типом субстрату та параметрами обробки. Щільна, добре інтегрована гіфальна структура мінімізує чутливість до вологи та сприяє стабільній роботі, тоді як пористі, слабо організованими мережам властиве високе водопоглинання, що погіршує довговічність матеріалу (Motamedi, Rousse, Promis, 2025).

Загалом, ці результати демонструють, що утримання води в МВК визначається не лише відкритою пористістю, але й геометрією, зв'язністю та функціональністю внутрішньої мережі пор, які формуються видами грибів, типом субстрату та параметрами обробки. Щільна, добре інтегрована гіфальна структура мінімізує чутливість до вологи та сприяє стабільній роботі, тоді як пористі, слабо організовані мережі дозволяють високе водопоглинання, але погіршують довговічність матеріалу.

Було показано загальну обернену залежність між відкритою пористістю та сухою щільністю, що підтверджує, що щільніші композити, як правило, мають менше доступних пор. Ця тенденція відображає вплив колонізації грибами: щільні гіфальні мережі, особливо у формуляціях на основі *Ganoderma lucidum*, таких як ГКБП та ГКЗН, посилюють когезію частинок та зменшують об'єм пор. Однак відхилення від цієї тенденції, такі як у ТКБС, свідчать про видоспецифічні моделі росту; тут фрагментована колонізація *Trametes versicolor* може призводити до утворення високопористих, але структурно пухких композитів. Ці розбіжності підкреслюють, що на пористість впливає не лише ущільнення, але й зв'язність та розподіл пор (Motamedi, Rouse, Promis, 2025).

Спостережувані структурні конфігурації, сформовані видами грибів та взаємодією з субстратом, мають вирішальне значення для інтерпретації теплової поведінки матеріалу. Оскільки утримання та транспортування вологи безпосередньо впливають на тепловий потік, розуміння цих мікроструктурних відмінностей забезпечує основу для оцінки теплової ефективності багатокомпонентних МВК у реальних умовах навколишнього середовища.

2.3.2 Термічна характеристика

Взаємодія між щільністю, відкритою пористістю та утриманням вологи підтверджує, що теплову характеристику в МВК не можна відокремити від їхніх гідрогенних та мікроструктурних характеристик. Заміна повітря адсорбованою або капілярно зв'язаною водою в мережі пор, що визначається

морфологією гіф, структурою субстрату та зв'язністю пор, безпосередньо впливає на теплопровідність. Теплоперенесення слід інтерпретувати як результат пов'язаних процесів тепло- та масопередачі, модульованих внутрішньою архітектурою матеріалу. Було проведено термічні дослідження для оцінки властивостей теплопередачі композитів на основі міцелію як функції відносної вологості, вмісту вологи та температури, щоб оцінити індивідуальний та комбінований вплив кожного параметра на теплові характеристики. Було оцінено ключові рецептури, включаючи ГКБП, ГСБС та ТКБС, для встановлення кількісної кореляції між мікроструктурними особливостями та теплопровідністю (Motamedi, Rouse, Promis, 2025).

Збільшення температури може посилювати газопровідність у порах, тим самим безпосередньо сприяючи збільшенню теплопровідності. Однак слід зазначити, що на загальну теплову реакцію також впливають зміни вмісту вологи та інших властивостей матеріалу. Підвищення температури відповідає експоненціальному зростанню тиску насичення. Отже, за постійної відносної вологості (ВВ) у кліматичній камері, в результаті підвищення температури, тиск пари пропорційно зростає. Це пояснює непрямий наслідок підвищення температури – збільшення вмісту вологи, що зберігається в матеріалі. У всіх трьох композитах (ТКБС, ГКБП, ГСБС) теплопровідність зростає як з температурою, так і з відотною вологістю, що підтверджує домінуючу роль вологи у посиленні теплопередачі шляхом заміщення повітря в мережі пор. Однак величина та прогресія цього збільшення значно варіюються залежно від мікроструктури матеріалу.

ГКБП демонструє найстабільнішу теплову реакцію, лише з незначним зростанням провідності. Така поведінка відображає спостережувану щільну та згуртовану гіфальну мережу, яка не тільки обмежує загальне поглинання вологи, що підтверджується низьким капілярним поглинанням та помірним рівнем сорбції, але й запобігає розширенню пор під впливом термічного навантаження. В результаті геометрія пор та газонаповнена структура залишаються значною мірою збереженими, підтримуючи низьку

теплопровідність навіть за підвищеної відносної вологості та температури. Навпаки, ТКБС демонструє більш круте та нелінійне збільшення теплопровідності. Це корелює з його високим насиченням вільною водою та фрагментованою, пористою морфологією гіф, що дозволяє значно накопичувати вологу та динамічну реконфігурацію пор. Рівно організованій мікроструктурі бракує структурної жорсткості, щоб протистояти тепловому розширенню пор, наповнених вологою, що посилює чутливість композиту до змін навколишнього середовища (Motamedi, Rouse, Promis, 2025).

Зразок на основі соломи, такий як ГСБС, займає проміжні позиції. Незважаючи на те, що вони також колонізовані *Ganoderma lucidum*, їх вища варіація теплопровідності може бути пов'язана з більш гетерогенною та анізотропною колонізацією солом'яного субстрату, що створює більші, менш обмежені пори з покращеною здатністю до транспортування вологи.

Ця нерівномірність, зумовлена субстратом, порушує структурну цілісність гіфальної матриці, що призводить до появи локалізованих зон високого накопичення вологи та збільшення провідних шляхів зі зростанням температури (Motamedi, Rouse, Promis, 2025).

2.4. Характеристика основних родів грибів, що використовуються (*Pleurotus*, *Ganoderma*, *Trametes*, *Fomes* тощо)

Для переробки сільськогосподарських відходів з метою отримання біокомпозитних матеріалів, можна використовувати різні види грибів. Зазвичай вони належать до базидію- або аскоміцетів, хоча залежно від процесу ферментації та бажаного застосування, один може бути більш придатним за інший. Повідомлялося, що базидіюміцети білої гнилі, що належать до *Agaricales* або *Polyporales*, є придатними кандидатами для ефективного вирощування міцелійних матеріалів на лігноцелюлозних субстратах (наприклад, поширені роди грибів, а саме: *Agaricus*, *Coriolus*, *Coriolopsis*, *Cyclocybe*, *Daedaleopsis*, *Fomes*, *Fomitopsis*, *Ganoderma*, *Gloeophyllum*, *Irpex*, *Laetiporus*, *Lentinula*, *Lentinus*, *Megasporoporia*, *Oudemansiella*, *Oxyporus*,

Pleurotus, *Phaeolus*, *Piptoporus*, *Polyporus*, *Psycoporus* та *Trametes*, які класифікуються як гриби, що викликають білу та буру гниль, можуть бути використані у виробництві МБК завдяки їх високій швидкості колонізації та здатності розкласти велику кількість органічної біомаси. Згідно з результатами попередніх досліджень, рід *Pleurotus* є найпродуктивнішим продуцентом МБК з 25,0%, далі йдуть *Ganoderma* (22,2%), *Trametes* (18,1%), *Psycoporus* (4,2%), *Polyporus* (2,8%), *Agaricus* (2,8%), *Coriolus* (2,8%) та *Lentinula* (2,8%) (Appels, 2019; Tacer-Caba, 2020; Pohl, 2022; Chan, 2021).

Окрім відмінностей у поведінці росту в різних установках ферментації, інші цінні ознаки можуть забезпечити деякі значні переваги, такі як, наприклад, здатність продукувати хламідоспори під час вегетативного росту міцелію. Ця багаторічна структура виживання дозволяє безстатеве утворення спор незалежно від плодових тіл, що дозволяє уникнути перестановки генетичної спадщини і тому ідеально підходить як джерело інокуляту для збереження специфічних для штаму ознак. Додатковим аспектом, який слід враховувати при виборі штаму, є склад конкретної клітинної стінки. Наприклад, види можуть відрізнятися співвідношенням хітину/ферментів в їхній клітинній стінці (Dias, Jayasinghe, Waldmann, 2021), що, у свою чергу, впливає на ефективність пост-обробки (наприклад, кількість доступних сайтів хімічного зшивання) і, отже, на властивості матеріалу. У сукупності важливо вибрати найбільш підходящий вид відповідно до субстрату, режиму ферментації та бажаного застосування матеріалу, проаналізувавши існуюче грибокве біорізноманіття, перш ніж розглядати подальше вдосконалення штаму (Aiduang та ін., 2022).

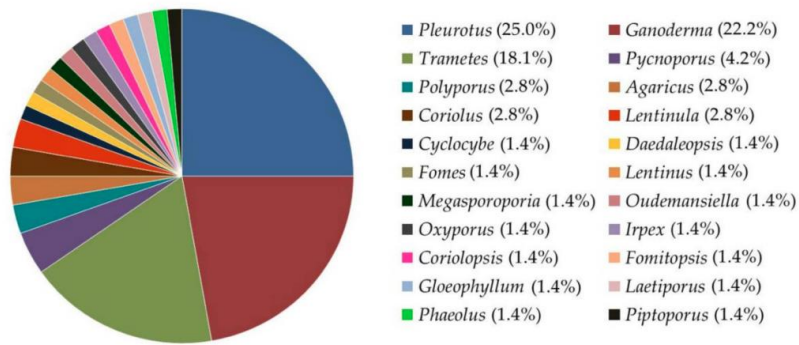


Рис. 2.2. Співвідношення % родів грибів, що використовуються у виробництві композитів на основі міцелію (Aiduang та ін., 2022)

З 2012 по 2022 рік було опубліковано майже 100 оригінальних статей, у яких представлено майже 70 видів грибів, що використовуються для виробництва композитів на основі міцелію (Sydor, Cofta, Doczekalska, Vonenberg, 2019).

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОЩУВАННЯ МІЦЕЛІЮ

3.1 Характеристика субстратів та джерел живлення (агровідходи, деревина, біомаса)

Сільськогосподарські відходи визначаються як лігноцелюлозний матеріал через його основні лігноцелюлозні компоненти, що включають целюлозу, геміцелюлози та лігнін (Aiduang та ін, 2022).

Лігноцелюлоза є основним структурним компонентом багатьох рослин, сільськогосподарських культур та дерев і складається з целюлози, геміцелюлози та лігніну, з невеликою кількістю золи, білків та пектину. Лігнін, пов'язаний як з геміцелюлозою, так і з целюлозою, є ароматичним полімером, синтезованим з фенілпропаноїдних попередників. Відомо, що він надає клітинній стінці рослин структурну підтримку та стійкість до мікробної атаки та оксидативного стресу (Elsacker та ін. 2020)..

Зазвичай, целюлоза є найпоширенішим компонентом (від 35 до 50%), далі йдуть геміцелюлоза (від 20 до 35%) та лігнін (від 10 до 25%). Однак склад целюлози, геміцелюлози та лігніну в сільськогосподарських відходах варіюється залежно від виду рослини, тканини та зрілості рослини (Suwannarach , Kumla, Zhao, Kakumyan, 2022). Сільськогосподарські відходи (наприклад, деревна тріска, тирса, бавовна, льон, коноплі, солома, лушпиння, відпрацьовані гриби, жом цукрової тростини та інші) в основному використовуються як субстрати для виробництва МВК, оскільки вони можуть розкладатися грибами (Aiduang та ін, 2022; Tacer-Caba, 2020; Pohl, 2022; 55, 56-58). Крім того, сільськогосподарські відходи були відібрані та використані у виробництві МВК залежно від відходів, доступних у кожній країні. Тип сільськогосподарських відходів та їх склад можуть безпосередньо впливати на ріст міцелію, оскільки гіфи безпосередньо контактують із субстратом і, як

					НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОЩУВАННЯ МІЦЕЛІЮ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Мезінова І.Р.</i>						
<i>Керівник</i>		<i>Красінько В.О.</i>					47	143
<i>Реценз.</i>						47		
<i>Н. Контр.</i>						<i>Кафедра БТМ</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Стабніков В.П.</i>						

відомо, використовують необхідні поживні речовини, отримані з субстрату (Nashiruddin, 2021). Важливо, що додавання різних поживних добавок до субстратів може додатково підтримувати ріст міцелію (Kumla та ін, 2020).

При зростанні на картопляному декстрозному бульйоні гіфи *P. ostreatus* руйнуються вздовж своєї центральної частини та демонструють меншу ширину ниток порівняно з ростом на целюлозному субстраті, що пов'язано з меншою кількістю синтезу хітину (Haneef та ін., 2017). В результаті матеріал з низьким співвідношенням хітин/полісахарид демонструє більше поглинання води, нижчий модуль Юнга та вище видовження (Haneef та ін., 2017). Харчові уподобання продуцента залежать від використаного виду або штаму: наприклад, при вирощуванні на деревному субстраті *P. ostreatus* залишає целюлозу майже неушкодженою та використовує геміцелюлозу як основне джерело енергії та вуглецю (Elsacker та ін. 2020).

Вкрай важливо вибрати найбільш підходящий штам відповідно до субстрату, умов росту або установки ферментації та запропонованого застосування (Vandelook, Elsacker, Wylick, De Laet, Peeters, 2021). Були отримані різні результати щодо властивостей матеріалу з використанням різних видів грибів під час виробництва міцелію (Manan, Ullah, Ul-Islam, Atta, Yang, 2021). Повідомлялося, що активність *Trametes multicolor* на ріпаковій соломі призводить до гладкої та піноподібної структури міцелію, тоді як колонізація *Pleurotus ostreatus* на тому ж субстраті (ріпакова солома) призводить до утворення міцелію з шорсткою структурою (Appels, 2018). Сапротрофи грибів білої гнилі демонструють хорошу швидкість колонізації субстрату, мають сильний мікоризний, ендоефітний або патогенний характер, а також є найефективнішими у перетравленні матеріалу клітинних стінок рослин (лігноцелюлози) завдяки секреції лігнінолітичних ферментів (Alaneme та ін, 2023).

Композит, виготовлений з тирси, мав найнижчу з усіх субстратів водопоглинальну здатність, а кавова лушпиння – найвищу, що тісно пов'язано

з розвитком міцелію та щільністю матеріалів (Attias, Danaï, Abitbol, Tarazi, 2020). Це може бути пов'язано зі складом субстрату та його розміром (Joshi, 2020; Alemu, 2022).

На здатність до розкладання та колонізації різних типів субстрату, впливають різні методи біосинтезу лігноцелюлозних ферментів. Загалом багато факторів, включаючи світло, вологість, рН, температуру та період інкубації, є важливими факторами, які можуть впливати на ріст та колонізацію міцелію на субстратах (Aiduang та ін, 2022; Kumla, 2020).

3.2. Вплив умов культивування (температура, вологість, рН, аерація)

МБК утворюються, коли міцелій колонізує субстрат усередині цвілі під час процесу інкубації (Elsacker та ін. 2020). Утворення товстої грибкової оболонки під час інкубації міцелію зазвичай відбувається у два етапи: перший етап, коли міцелій зв'язується з цвіллю, і другий етап, коли грибкова оболонка росте поза цвіллю, утворюючи компактний продукт МВМ (Elsacker та ін. 2020). Оптимальні умови росту для більшості штамів грибів визначені у діапазоні від 21 до 30 °С, вологість від 70 до 100% та значення рН від 5 до 8 (Haneef та ін., 2017; Alaneme та ін, 2023).

В дослідженні ростових властивостей на картопляному декстрозному агарі (КДА) та декстрозному агарі Сабуро (СДА), *Pleurotus ostreatus* генерував міцелій ватоподібної текстури, регулярної щільності та регулярного розвитку, тоді як *Ganoderma lucidum* забезпечувала флоккозну текстуру, низьку щільність та розріджений ріст міцелію на КДА. Як показано в табл 3.1., температура та середовище для росту мали прямий вплив на середній ріст міцелію *P. ostreatus* та *G. lucidum*. Після 12 днів інокуляції *P. ostreatus* продовжує рости вище, ніж *G. lucidum* на КДА (23,28 см) та СДА (9,85 см) при 22°C, а також на КДА (5,43 см) та СДА (4,43 см) при 30°C. *P. ostreatus* розвивав міцелій у ширшому діапазоні температур від 22 до 30°C як на КДА, так і на СДА. Міцелій *P. ostreatus* та *G. lucidum* розвивався максимально при

температурі 22°C. Янг та ін. описали *P. ostreatus* як часто культивованій штам грибів завдяки його здатності рости в широкому діапазоні температур та використовувати різноманітні умови живлення (Alaneme та ін, 2023).

Одною із необхідних умов мікроклімату є також добре провітрюване темне середовище з низькою концентрацією CO₂, що сприяє росту міцелію. Головною перевагою інкубації грибів у темряві є те, що темні ділянки часто генерують вологу, необхідну спорам для розмноження (Vandelook, Elsacker, Wylick, De Laet, Peeters, 2021).

Таблиця 3.1.

Вплив різних температур і середовищ на інтенсивність росту міцелію грибів *G. lucidum* та *P. ostreatus* (Мажіб та ін., 2024)

Температура, °C	Ростовий субстрат	Середній радіальний ріст міцелію, см	
		<i>G. lucidum</i>	<i>P. ostreatus</i>
22,0	КДА	9,03	23,28
	СДА	1,0	9,85
30,0	КДА	1,0	5,43
	СДА	1,0	9,85
37,0	КДА	1,0	1,0
	СДА	1,0	1,0

Оскільки гриби є облігатними аеробами, то мікроорганізми потребують кисню для широкого спектру метаболічних процесів, пов'язаних з енергією. Процес аеробного дихання включає серію процесів, які використовують кисень з навколишнього повітря як реагент. Грибне травлення, асиміляція, дихання, транслокація та синтез, всі з яких опосередковуються ферментами, що є чутливими до змін температури. Гриби, як і всі інші організми, потребують значної кількості азоту для синтезу білків та іншого вмісту клітин або продуктів, таких як нуклеопротейни, ліпопротейни, ферменти та хітин, присутній у клітинних стінках гіф (Alaneme та ін, 2023).

Спостерігалось, що час інкубації міцелію коливається від 5 до 42 днів залежно від об'єму інокульованого субстрату (Alaneme та ін, 2023).

Тривалість інкубаційного періоду впливає на якість композитних матеріалів. Щільність композитів на основі грибів збільшувалася зі збільшенням інкубаційного періоду від 195 кг/м³ до 280 кг/м³ (Ayele, Haile, Alemu, Kamaraj, 2020). Це може бути пов'язано з тим, що порожнечі між волокнами заповнюються, оскільки міцелій продовжує рости, а субстрат міцніше зв'язується, що, у свою чергу, збільшує щільність. Аналогічно, триваліший час інокуляції збільшує склад міцелію, такий як хітин (Shakir, 2020), що позитивно впливає на міцність матеріалів на стиск (Girometta, Picco, Baiguera, 2019). З іншого боку, тривалий інкубаційний період призводить до повної деградації живильного субстрату, що спричиняє зниження міцності на стиск (Elsacker та ін. 2020; Matos та ін, 2018). Екстенсивний період росту тирси понад 4 тижні призвів до зниження міцності матеріалу (Matos та ін, 2018). Основною причиною цього може бути фізична природа субстрату та його хімічний склад (Alemu, Tafesse, Mondal, 2022).

Крім того, кількість вологи у зразках та температура, за якої зберігаються та вирощуються гриби, є двома факторами навколишнього середовища, які вважаються найбільшими. Крім того, інші дослідження показують, що як температура, так і середовище для вирощування мали безпосередній вплив на ріст міцелію (Majib та ін., 2024).

Оскільки параметри обробки, такі як час та умови росту, а також методи сушіння матеріалу, різняться для різних штамів та субстратів, це суттєво впливає на властивості матеріалів. Наприклад, час інкубації зазвичай залежить від розміру матеріалу та коливається від 5 до 42 днів для різних штамів грибів і залежить від природи субстрату (Haneef та ін., 2017). Матеріали, вирощені протягом тривалішого періоду, є термічно стабільнішими та менш пористими, тому подовжений час інкубації збільшує міцність матеріалу. У міру зростання міцелію простори між волокнами заповнюються, і волокна міцно з'єднуються, що підвищує загальну щільність (Haneef, 2017). Навпаки, подовжений час

інкубації може призвести до повної деградації субстрату, який діє як армуючий матеріал; таким чином, він сприяє покращенню пружної жорсткості та зменшує зсувну здатність (Yang et al., 2017). Середній рівень вологості коливається від 70% до 100% (Appels, 2019; Haneef, 2017). Водотримуюча здатність грибкового міцелію значною мірою залежить від субстрату. Наприклад, вміст води в матеріалі на основі *T. multicolor* коливався від 5,8%–7,2% до 7,6%–9,6% при зростанні на бавовняній та ріпаковій соломі відповідно (Appels, 2019).

Міцелію потрібен кисень для росту та вироблення вуглекислого газу. Як правило, низький вміст вуглекислого газу ініціює формування плодового тіла; отже, слід підтримувати високий рівень вуглекислого газу, щоб запобігти формуванню плодового тіла та забезпечити ефективний ріст міцелію. Аналогічно, матеріали високої щільності синтезуються в темряві з низькою концентрацією вуглекислого газу та на світлі з високою концентрацією вуглекислого газу, що вказує на взаємозв'язок між світлом та вуглекислим газом щодо їхнього спільного впливу на щільність волокон (Appels, 2019). Нещодавнє дослідження запропонувало біохімічне рішення для регулювання формування плодового тіла. У дослідженні повідомлялося, що використання інгібіторів глікогенсинтазикаінази-3 (GSK-3) у середовищі для культивування пригнічувало формування плодового тіла у штамі *Pleurotus djmouir* та підтримувало ріст міцелію. Цей підхід простий у використанні, економічно ефективний та надійний (Manan, Ullah, Ul-Islam, Atta, Yang, 2021).

Для біокомпозитів вирішальними є кінцеві фізико-механічні характеристики. Нижче вказані властивості міцеліальних біокомпозитів у таблиці 3.2.:

Узагальнення властивостей міцеліальних біокомпозитів

Таблиця 3.2.

Гриб (Fungal Species)	Температура/Час Культивування	Субстрат/Наповню вач	Ключова Властивість та Значення	Джерело
-----------------------------	----------------------------------	-------------------------	---------------------------------------	---------

<i>Ganoderma lucidum</i>	24°C/14 днів	Відходи агропромисловості	Теплопровідність (λ): 0.047 ± 0.002 Вт м ⁻¹ К ⁻¹	(Jiménez-Obando et al., 2025)
<i>Pleurotus ostreatus</i>	25°C/ 14 днів	Конопляна костра	Макс. згинальна напруга (σ_f): 0.397 МПа	(Sağlam & Acun Özgünler, 2022)
<i>Ganoderma williamsianum</i>	25°C/ 14 днів	Кукурудзяна лушпайка	Межа міцності на стиск (σ_c): 0.46 МПа	(Aiduang et al., 2022)
<i>Pleurotus ostreatus</i>	24°C/ 30 днів	Тирса бука	Щільність (після сушіння): 0.16 г/см ³	(Hollingsworth et al., 2021)

Дослідження показали, що використання *Ganoderma lucidum* на агропромислових відходах, культивованого за температури 24°C протягом 14 днів, дає матеріал з низькою теплопровідністю (0.047 ± 0.002 Вт м⁻¹ К⁻¹), що підтверджує його потенціал як ізолятора (Jiménez-Obando et al., 2025).

Композит, створений за допомогою *Pleurotus ostreatus* на конопляній кострі при 25°C досягнув максимальної згинальної напруги 0.397 МПа, демонструючи значну міцність для застосування в неконструкційних елементах (Sağlam & Acun Özgünler, 2022).

У іншому джерелі вказано, що використання кукурудзяної лушпайки як субстрату для *Ganoderma williamsianum* призвело до високої межі міцності на стиск (0.46 МПа), що вказує на ефективність використання сільськогосподарських відходів для отримання міцних матеріалів (Aiduang et al., 2022).

Довгий період культивування (30 днів) *Pleurotus ostreatus* на тирсі бука за 24°C призводить до високої щільності (0.16 г/см³), що є важливим параметром

для визначення його застосування, наприклад, як легкого наповнювача (Hollingsworth et al., 2021) (табл.3.2.).

3.3. Порівняльний аналіз глибинного і твердофазного культивування міцелію

Гриби можуть рости на твердих субстратах без наявності вільно текучої води, що відомо як твердофазна культура. Швидкість росту міцеліальної колонії статистично залежить від хімічного складу середовища вирощування. Моніторинг та управління процесом культивування є досить складним завданням, коли субстрат неоднорідний, не містить вільної води та має низьку провідність (Majib та ін., 2024). Проте, зростання чистої міцеліальної біомаси може бути досягнуто і в умовах твердофазної ферментації. В таблиці 3.3. наведено порівняння твердофазного і глибинного культивування грибів для одержання біокомполімерів:

Порівняльна таблиця глибинного і твердофазного культивування грибів для одержання біокомполімерів

Таблиця 3.3.

Критерій	Глибинне культивування (submerged)	Твердофазне культивування (solid-state)	Літературні джерела
Наявність вільної води	Потребує рідини, однорідне середовище	Відсутня вільна вода; субстрат неоднорідний	Majib та ін., 2024
Тип субстрату	Рідкі середовища	Тверді природні/штучні субстрати	Majib та ін., 2024
Складність контролю процесу	Контрольований pH, DO, температура, аерація	Складно контролювати через низьку провідність і неоднорідність	Majib та ін., 2024
Швидкість росту міцелію	Рівномірна, швидка	Залежить від хімічного складу; варіабельна	Majib та ін., 2024
Типи отримуваної біомаси	Вегетативна зважена біомаса	Чиста міцеліальна біомаса, піни (foams)	Ecovative, 2019 (патент)
Ферментаційне обладнання	Біореактори	Великі інкубаційні камери	Ecovative (патент WO2019099474A1)

Приклади застосування	Метаболіти, ферменти, біомаса	Біоматеріали, міцеліальні піни	Vandelook, 2021; Shanmugam та ін., 2021
Умови для інтенсивного росту повітряних гіф	Не характерно	30 °C, 50–70 тис. ppm CO ₂ , 40–99% RH	Vandelook, 2021; патент US20150033620A1
Запобігання утворенню плодових тіл	Менш актуально	Досягається високим CO ₂ і температурою	Sakamoto, 2021
Придатність грибів	Широкий спектр видів	Оптимально — Polyporales: <i>Ganoderma</i> sp.	Shanmugam та ін., 2021
Основні регулятори росту	Нутрієнти і аерація рідини	Градiєнт CO ₂ , осмотичні мікрокраплі, потік повітря	Vandelook, 2021; Vandelook et al., 2021
Отримуваний матеріал	Зависла біомаса	Структуровані міцеліальні біополімери	Vandelook, 2021

Деякі компанії інвестували в розробку великомасштабної інфраструктури для твердофазної ферментації. Ecovative продемонструвала свою велику кліматично-контрольовану інкубаційну камеру (рис. 3 А), яка використовується для вирощування значної кількості чистої міцелієвої піни одночасно (<https://patents.google.com/patent/WO2019099474A1/en>). Зокрема, для *Ganoderma* sp. визначили специфічні умови росту, які стимулюють рясний ріст повітряних гіф (рис. 3 В) (<https://patents.google.com/patent/WO2019099474A1/en>, Vandelook, 2021). Цей тип гіф характеризується зростанням назовні, від субстрату, в повітря (Vandelook, Elsacker, Wylick, De Laet, Peeters, 2021). Щоб стимулювати таку поведінку росту, підтримували сталий температурний режим (± 30 °C), рівень CO₂ (50–70 k ppm) та відносну вологість (40–99%), що жорстко контролюється всередині інкубаційних камер (<https://patents.google.com/patent/US20150033620A1/en>, 71)]. Ці умови є оптимальними для запобігання будь-якій диференціації міцелію в плодові тіла, оскільки грибівники використовують нижчу температуру та концентрацію CO₂ для оптимальної врожайності (Sakamoto, 2021). З доступної літератури

відомо, що представники родини *Polyporales*, такі як *Ganoderma* sp., є придатними для вирощування міцеліальних пін (Shanmugam та ін., 2021). Основною рушійною силою, що стимулює зовнішній ріст міцелію, у вищезгаданих умовах, є градієнт вуглекислого газу, індукований клітинним диханням. Накопичення CO₂ всередині субстрату природним чином створює градієнт, вздовж якого міцелій ростиме назовні, щоб досягти більш сприятливого середовища. Друга рушійна сила, що стимулює вертикальне розширення, є результатом створення осмотичного потенціалу на вершині. Шляхом осадження мікрокрапель, що містять розчинену речовину (розчинена речовина є мінералом, білком або вуглеводом), розширення гіф, яке зумовлене тургорним тиском, може бути спрямоване та стимульоване (Vandelook, 2021). Крім того, застосування постійного потоку повітря над зростаючим міцелієм модулює зовнішній ріст та форму біополімеру. Швидкість, з якою повітря витісняється над ящиками з субстратом, у поєднанні з рівнем відносної вологості безпосередньо впливає на щільність повітряного міцелію та модулює ступінь однорідності отриманих міцелієвих пін (див. табл. 3.4.) (Vandelook, Elsacker, Wylick, De Laet, Peeters, 2021).

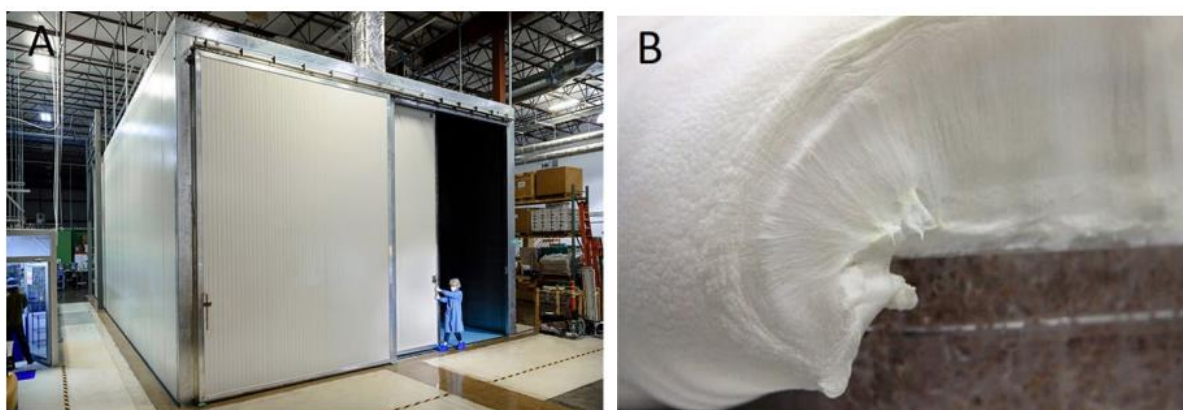


Рис. 3.1. Твердофазна ферментація міцелію: А- Інкубаційна камера для великомасштабного виробництва ©Ecovative (<https://patents.google.com/patent/WO2019099474A1/en>); В- Зовнішній ріст повітряних гіф *Ganoderma* sp. у твердофазній установці для ферментації (Vandelook, 2021)

Вплив зміни швидкості потоку повітря та відносної вологості на суху щільність та міцність на розтяг мікологічних біополімерів *Ganoderma sp.* при 5% CO₂ та ±30 °C

Витрата повітря (м ³ /хвилину)	Відносна вологість	Суха щільність (кг/м ³)	Міцність на розтяг (МПа)
2,83	>99%	31,72	0,12
2,83—4,95	>99% drop to 96% for 48 h	23,23	0,09
8,49—10,62	>99%	53,18	0,21

3.4. Біоінженерні підходи (генетична модифікація штамів для покращення властивостей міцелію)

Сучасні методи генної інженерії та інші біотехнологічні методики дають змогу покращити фізіологічні характеристики продуцента для отримання прогнозованого кінцевого результату. Наприклад, генетично модифікований штам *Schizophyllum commune* призвів до створення стерильного штаму шляхом впливу на молекулярні механізми, що беруть участь у формуванні плодового тіла. Це призвело до усунення небажаної здатності до формування плодового тіла та спор, і, крім того, цей мутантний штам продемонстрував утричі вищу швидкість росту, ніж штами дикого типу (Vandelook, 2021).

У другому випадку, покращення штамів можна досягти за допомогою генетичних модифікацій, які вже застосовувалися для багатьох біотехнологічних застосувань (Kumla, 2020; Majib та ін., 2024). Нещодавній крок вперед у цілеспрямованій генетичній модифікації став можливим завдяки розробці CRISPR/Cas9 як універсального інструменту генної інженерії (Ayele, 2020). Системи на основі CRISPR/Cas9 були створені для низки фламентових грибів, але з деякими проблемами, що залишаються (Girometta, Picco, Baiguera, 2019). Цікавим рішенням, що дозволяє обійти специфічні для господаря системи транскрипції для немодельних організмів, є використання *in vitro* зібраних комплексів рибонуклеопротеїнів (RNP) Cas9. Ці RNP можуть бути використані для різних видів шляхом трансформації протопластів,

опосередкованої поліетиленгліколем (PEG), без необхідності видоспецифічної адаптації, як це відбувається з системами експресії *in vivo*, що потребують валідації промоторів, генетичних елементів та плазмід. Однак слід зазначити, що протопластація не є простою для багатьох видів фламентових грибів, і що, можливо, доведеться розглянути інші методи трансформації (Girometta; 2019). Перспективність використання генної інженерії для налаштування міцеліальних матеріалів була успішно продемонстрована для *Schizophyllum commune*. Було показано, що мутантний штам *S. commune* $\Delta sc3$, який не здатний експресувати гідрофобін *sc3*, призводить до отримання міцеліальних матеріалів зі збільшеною щільністю та механічною міцністю, тим самим зміщуючи їх класифікацію з категорії природних матеріалів до термопластичних матеріалів. Як інший приклад, введення гена *S. cerevisiae* CDA1, що кодує хітиндеацетилазу, під контролем промотора гліцеральдегід-3-фосфатдегідрогенази (ГФД), у штам для виробництва міцеліального матеріалу призвело до появи матеріалів зі значно вищим модулем стиску (тобто співвідношенням напруження до деформації матеріалу) (Vandelook, 2021).. Аналогічно, сконструйована експресія β -1,3-глюкансинтаз (BGS1 та BGS2) під контролем конститутивного промотора ГФД дала трансформанти з вмістом β -глюкану на 135–165% вищим у *Ganoderma* sp. (Vandelook, 2021.. Окрім грибів, сконструйовані бактеріальні штами, що використовуються під час спільного культивування, також можуть бути значно корисними для покращення властивостей матеріалів та уникнення забруднень. Наприклад, спільне культивування зі сконструйованими штамми *Bacillus*, що секретують поліама-глутамінову кислоту як біоплівку, призвело до дворазового збільшення модуля пружності, або ж спроектоване виробництво меланіну забезпечило кращий захист від ультрафіолету в міцеліальних матеріалах (Vandelook, 2021). Нарешті, спільне культивування зі сконструйованим штамом *Streptomyces natalensis*, що продукує натаміцин (специфічний для *Ascomycetes* антибіотик), дозволило придушити повторювані забруднення, такі як *Trichoderma* sp. (Vandelook, 2021).

РОЗДІЛ 4. ФОРМУВАННЯ, МОДИФІКАЦІЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МІЦЕЛІАЛЬНИХ КОМПОЗИТІВ

4.1 Методи пресування та сушіння

Після досягнення зрілості вирощені МВК піддають термічній обробці за задалегідь вибраної температури та часу, щоб знищити мікроорганізм та усунути вміст вологи в МВК, що утворюється в процесі (Elsacker та ін. 2020).. Гаряче пресування та сушіння в печі є найпоширенішими методами, що використовуються для зневоднення та ущільнення МВК після інкубації, що часто призводить до покращення їх механічних властивостей (Jones, Mautner, Luenco, Bismarck, John, 2019). Кілька авторів використовували різні методи сушіння, включаючи витримку в печі при температурі від 60 до 125 °С протягом 2 годин (Haneef та ін., 2017; Alaneme та ін, 2023); конвекційне нагрівання за допомогою сонячних сушарок при 82 °С протягом 12 годин та термічне пресування при 250 °С протягом 20 хвилин (Jiang, Walczyk, McIntyre, Bucinell, Tudryn, 2019); гаряче пресування із зусиллям менше 30 кН при 150 °С протягом 20 хвилин (Appels, 2019).; сушіння в печі протягом 48 годин при 60 °С (Attias, Danai, Tarazi, Pereman, Grobman, 2019); та сушіння в конвекційній печі при температурі 70 °С протягом 5-10 годин (Elsacker, Vandeloock, Brancart, Peeters, De Laet, 2018). Манан та ін. (Manan, Ullah, Ul-Islam, Atta, Yang, 2021) зазначили, що на механічні властивості МВК впливає температура пресування. Порівнявши властивості гарячепресованих композитів з *P. ostreatus*-ріпакової соломи із холоднопресованими МВК було відзначено, що гаряче пресування збільшує міцність і жорсткість МВК (Alaneme та ін, 2023).

Існує кілька методів, які використовуються в широкому діапазоні температур та протягом різних інтервалів часу для зневоднення та денатуру матеріалів. Наприклад, нагрівання в інфрачервоній печі, нагрівання

					НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Мезінова І.Р.			РОЗДІЛ 4. ФОРМУВАННЯ, МОДИФІКАЦІЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ МІЦЕЛІАЛЬНИХ КОМПОЗИТІВ	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Красінько В.О.					59	143
Реценз.						59		
Н. Контр.						<i>Кафедра БТМ</i>		
Затверд.		Стабніков В.П.						

інфрачервоною лампою, нагрівання в мікрохвильовій печі та випікання в печі зазвичай проводяться протягом 2 годин при температурі 60–125 °С, (Haneef та ін., 2017). Аналогічно, звичайне нагрівання за допомогою сонячних сушарок проводиться протягом 8 годин при 60 °С або протягом 2 годин при 220 °С, тоді як сушіння за допомогою машини проводиться при 60 °С протягом 24 годин. Як правило, висушені зразки не можна вважати абсолютно висушеними через фактор вологості навколишнього середовища. Вміст води у висушеному зразку коливається від 0,6% до 20,0%. Піч з циркуляцією повітря може бути найкращим вибором для повного сушіння синтезованих матеріалів. Ретельно висушені матеріали мають меншу теплопровідність порівняно з матеріалами з фіксованою вологістю. Більше того, теплове сушіння зупиняє ріст міцелію, а його нитки втрачають внутрішні зв'язки; таким чином, вони виглядають плоскими. Як наслідок, модулі пружності висушених зразків загалом вищі, ніж у живих матеріалів (Manan, Ullah, Ul-Islam, Atta, Yang, 2021).

4.2. Поєднання з іншими матеріалами (агрегати, наповнювачі)

Субстрати, що містять натуральні волокна, які не руйнуються під час виробництва міцеліальних матеріалів, володіють зміцнювальними властивостями, оскільки натуральні волокна служать для армування та запобігання руйнуванню при зсуві. Натуральні волокна мінімізують розтріскування поверхні під час вимірювань зсуву, а також покращують модуль Юнга та міцність на стиск. Дослідження різних типів волокон показують, що стан волокна впливає на модуль Юнга при стисканні, оскільки подрібнені конопляні волокна (<5 мм) призводять до модуля Юнга, який у 1,6 рази вищий, ніж у пухкої стружки ((Elsacker, 2018; Elsacker та ін. 2020). Інше дослідження показує, що міцність на стиск матеріалів, що містять натуральні волокна (деревна тріска), зростає до 300% при змішуванні піщаних або гравійних заповнювачів порівняно з чистими матеріалами. Такі добавки, як діоксид кремнію, глина, перліт, метилцелюлоза, гліцерин-агароза, можна

додавати до волокон для утримання вологи або підвищення в'язкості субстрату. Тип волокон також впливає на займистість міцеліального композиту. Утворення обвуглення є сприятливим при додаванні великої кількості діоксиду кремнію (наприклад, присутнього в рисовому лушпинні). Лігнін містить стабільні циклічні кільця, які розкладаються на ароматичні фрагменти, основні складові вуглецю (Elsacker та ін. 2020).

4.3. Хімічна/біологічна обробка для покращення властивостей.

Існує кілька методів постобробки міцелію, наприклад нанесення натуральних смол та покриттів. Залежно від функції матеріалу, можна використовувати різні типи покриттів. Щоб зробити біокомпозит стійким до атмосферних впливів, натуральні олії та шелак (природний полімер) є двома варіантами герметизації пор матеріалу.

Наприклад, цеглини вежі Ну-Фі Девіда Бенджаміна були піддані просоченню природними оліями, наприклад лляну олію, так і шелак для збереження та захисту меблів на основі грибів. Ефірні олії використовуються, як дезінфектант у складі біокомпозитів. Крім того, наносять їстівні плівки з карагенану, хітозану та ксантанової камеді, щоб створити фізичний бар'єр для води з антимікробними властивостями. Наночастинки, такі як наноцелюлоза, здатні проникати в пори та одночасно підтримувати структуру відкритою для пористої структури матеріалу, щоб стіна могла дихати. Окрім захисту від атмосферних впливів, для підвищення механічних властивостей матеріалу також можна використовувати натуральні смоли. Як міцність, так і жорсткість покращуються шляхом введення біосмоли в армуючі оболонки міцеліального композиту при використанні його як сендвіч-структури. Таким чином, вакуумна інфузійна обробка є адекватним та широко використовуваним методом. Однак, до країв серцевини матеріалу слід додати віск, щоб запобігти надмірному поглинанню смоли; значне просочення призведе до несприятливих характеристик для сендвіч-структури (Elsacker та ін. 2020).

4.4. Сфери застосування грибних композитів

Матеріали, які виробляють менше забруднення та відходів під час виробництва, використання, транспортування та знесення, а також є економічно доцільними, вважаються сталими матеріалами (Flagel, 2020). Більшість традиційних будівельних матеріалів не підлягають переробці, споживають багато енергії, є екологічно шкідливими та вимагають високих витрат. Коли такий матеріал потрапляє в навколишнє середовище, він залишається там протягом багатьох років (Alemu, Tafesse, Mondal, 2022). Більшість традиційних промислово виготовлених матеріалів є найбільшими споживачами енергії та викидниками парникових газів як у розвинених, так і в країнах, що розвиваються. У країнах, що розвиваються, лише виробництво будівельних матеріалів становило 32% від загального світового споживання енергії та 19% викидів парникових газів (ПГ) у 2010 році, і цей результат подвоїться або потроїться протягом наступних 50 років (Teixeira, 2018). У той час як у розвинених країнах, таких як США, від усіх промислових викидів у 2002 році близько 6% припадало на будівельний сектор (Alemu, Tafesse, Mondal, 2022). Прогноз того ж автора також передбачив, що близько 80 мільйонів метричних тонн CO₂ буде викинуто будівельним сектором у 2030 році (Alemu, 2022; Flagel, 2020). Більшість будівельних матеріалів у світі, таких як блоки, перегородки, ізоляція та бетон, виготовляються з цементу, гіпсу, піску, металу та деревних виробів. Якщо сприйняття використання цементу як будівельних матеріалів не зміниться у світі, то до 2050 року у світі може бути вироблено 3,5 мільярда метричних тонн цементу (Alemu, 2022; Flagel, 2020). Серед усіх будівельних матеріалів цемент є найбільш широко використовуваним, відіграє вирішальну роль у будівельному секторі та досягає особливих характеристик у будівельній діяльності завдяки своїй довговічності, високій міцності на стиск та стійкості до хімічних речовин та атмосферних впливів (Alemu, 2022; Flagel, 2020). У будівельному секторі використовуються не лише ці різні деревні вироби, а й гіпс та полімери.

Незважаючи на їхню високу міцність та стійкість до погодних умов, ці матеріали відіграють велику роль у забрудненні навколишнього середовища від виробництва до знесення через їхню небіорозкладність та високі викиди. Використання деревних виробів для будівельних цілей призводить до вирубки лісів та неочікуваних коливань погоди.

Біоматеріали поєднують у собі багато стратегій пом'якшення наслідків, таких як низьке споживання енергії та вуглецю, низька вартість, перероблюваність, використання місцевих матеріалів та доступність у вигляді відходів та побічних продуктів; як наслідок, їх можна легко інтегрувати у збірну конструктивну систему (Alemu, 2022; Flagel, 2020). Крім того, будівельні матеріали на біоснові мають кращу термостійкість, легкість виробництва, привабливий вигляд та самозростання, ніж виробництво (Alemu, 2022, 76, 77). Доступність сировини та легкість виробництва мікробних матеріалів призводять до мінімізації витрат. Використання біоматеріалів може знизити витрати приблизно у 80 разів, ніж традиційні матеріали. Біологічні будівельні матеріали можуть зменшити викиди вуглецю майже на 800 мільйонів тонн на рік (Alemu, 2022; Flagel, 2020). Якщо не буде вжито негайних заходів для заміни традиційних матеріалів, таких як цемент, гіпс, та інші полімерні та пластикові вироби, біоматеріалами, буде дуже важко протистояти їхньому впливу на навколишнє середовище. Так само біологічні матеріали мають також непрямі переваги у зменшенні кількості органічних відходів, оскільки більшість сировини, що використовується для виробництва матеріалів на основі мікробів, є місцевими органічними відходами (Alemu, Tafesse, Mondal, 2022).

Міцелій використовується в медичній промисловості та для виробництва молекулярних сполук (Rathore, Prasad, Kapri, Tiwari, Sharma, 2018). Його використовували для виробництва харчових добавок або нутрицевтиків, таких як протипухлинні, протиметастатичні, антиоксидантні, протизапальні, інсектицидні та антимікробні засоби. Окрім біоремедіації та медичного застосування, сьогодні міцелій застосовується у виробництві біоматеріалів,

таких як біоцемент, біоблок та біофермент. Кілька компаній, таких як MycoWorks (<https://www.mycoworks.com>, 2021), NEFFA, Evocative Design та MOGU (Alemu, Tafesse, Mondal, 2022), почали розробляти та комерціалізувати композити, пов'язані з міцелієм, у світі. З 2007 року дизайнери та архітектори почали використовувати вироби на основі міцелію, такі як синтетична шкіра, кухонне начиння, пакувальні предмети, різні меблі, стінові та стельові панелі, біоцемент, а також блоки та кам'яні блоки (Alemu, 2022, Appels, 2021; Ghazvinian, 2019), як альтернативу традиційним матеріалам. На рисунку 4 показано різні матеріали на основі міцелію, композити на основі якого можуть замінити традиційні матеріали. З усіх матеріалів синтетична шкіра складається з чистого міцелію, тоді як пакувальні предмети, меблі, панелі та блоки виготовляються з комбінації міцелію та органічних субстратів (Manan, 2021).

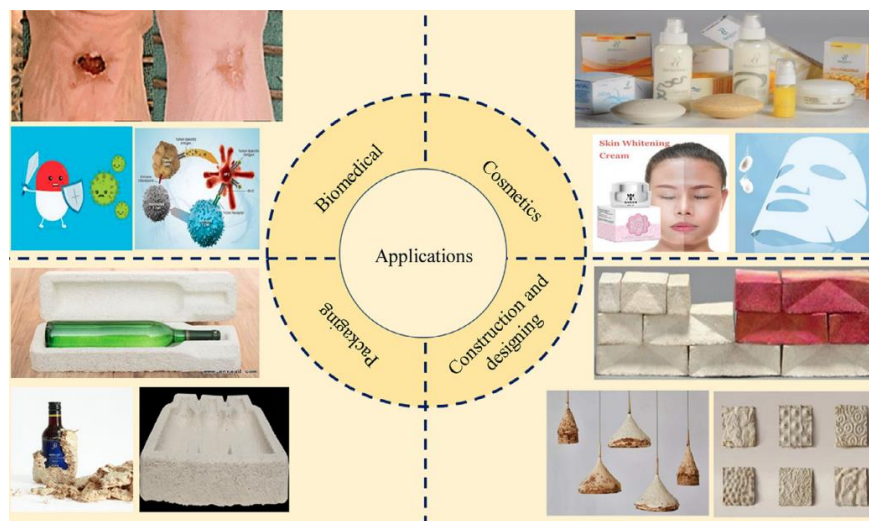


Рис. 4.1. Застосування матеріалів на основі міцелію в різних галузях (Manan, 2021)

4.4.1. Упаковка як альтернатива пластику

В останні роки глобалізація світової промисловості збільшила попит на пакувальні матеріали. Полістирол, отриманий з нафти, наразі є найбільш використовуваним пакувальним матеріалом; однак він не є біорозкладним та не підлягає переробці, що становить серйозну загрозу для навколишнього середовища. Крім того, виробництво полістиролу є енергоємним процесом і

не є екологічно чистим через викиди парникових газів. Матеріали на основі міцелію завдяки своїй легкій вазі та нетоксичності можуть бути використані для широкого спектру застосувань упаковки, включаючи електроніку, крихкі предмети та харчову промисловість (рис. 4.1.). Зелені біокомпозити з чистих біоматеріалів можуть бути використані як альтернатива традиційній упаковці, отриманій з нафти, у різних галузях. Міцелій має властивість приймати форму прес-форми, що робить його ідеальним матеріалом для виготовлення пакувального матеріалу. Більш того, завдяки контрольованим умовам росту та вибору субстрату, можна виробляти міцелійні матеріали на власний вибір з індивідуальною міцністю, щільністю та іншими структурними особливостями (Manan, Ullah, Ul-Islam, Atta, Yang, 2021).

Концепцію використання міцелію як матеріалу було започатковано у 2007 році (Sydor, Bonenberg, Doczekalska, 2018) власниками компанії Evocative Design Ебеном Байєром та Гевіном Макінтайром. Ця компанія виробляє високоякісну пакувальну продукцію, яка може бути на 100% переробленою та нетоксичною (Krivanek, 2020). Використання матеріалу на основі міцелію як альтернативи полістиролу та пластиковій упаковці було розпочато у 2013 році (Alemu, 2022; <https://ecovatedesign.com/>).



Рис. 4.2. Композитний міцелійний матеріал, що використовується як альтернатива пакувальній упаковці пінополістиролу ©Ecovative (<https://ecovatedesign.com/>)

Китайська компанія розробила пакувальний матеріал на основі міцелію, вирощуючи гриби на пшеничному соломі. Розроблений матеріал є легким,

біорозкладним та еластичним. В іншому дослідженні за допомогою *Ruspororus cinnabarinus* виробляли оранжево-червоний пакувальний матеріал без додавання зовнішніх пігментів. Розроблений матеріал продемонстрував високу плавучість, тому його можна використовувати для виробництва морських буїв (Serimi, 2019). У нещодавньому дослідженні повідомили про зелений синтез біоблоків *P. ostreatus* з використанням різних сільськогосподарських відходів, включаючи пшеничні висівки, цукрову тростину, тирсу та суміш цих матеріалів. Синтезований матеріал мав гідрофобну природу та продемонстрував чудову термічну та механічну стабільність, що дозволяє йому знайти застосування як пакувальні матеріали, а також як стінові панелі та фільтруючі мембрани для видалення токсичних матеріалів (Manan, 2021; Joshi, 2021).

4.4.2. Будівельні матеріали (ізоляція, панелі)

Будівельні матеріали на основі міцелію включають блокові матеріали (Islam, Tudryn, Bucinell, Schadler, Picu, 2018), деревно-стружкові плити (Kho, 2020), акустичні матеріали (Pelletier, 2017; Pelletier, 2019), теплоізоляцію (Schritt; Vidi; Pleissner, 2021), облицювальні матеріали (Lee, Choi, 2021) поверхневі матеріали (тонкі листи та плівки) (Jones, 2019; Nawawi, 2021) та пастоподібні матеріали (Sun, 2019). Наприклад, МДФ виготовляється з блоку міцелію за допомогою процесу гарячого пресування. Різні ступені товщини досліджувалися в кількох дослідженнях. Дослідники (Appels, 2019; Kho, 2020) вивчали характеристики композиту з міцелію сільськогосподарських побічних продуктів, що складається з двох видів грибів, включаючи *P. ostreatus* та *T. multicolor*, шляхом використання трьох процесів виготовлення (безпресового, холодного та гарячого пресування). Після використання гарячого пресування спостерігалось покращення жорсткості та однорідності композиту. Цей процес змінює модуль пружності композиту від піноподібної речовини до коркоподібної та деревноподібної речовини, яка має щільність 100–390 кг/м³. В результаті, вага обох композитів на основі грибного міцелію

була легшою, ніж у деревоволокнистої плити середньої щільності (МДФ; 500–1000 кг/м³) та орієнтовано-стружкової плити (ОСБ; 550–700 кг/м³), при цьому композит зберіг бажані механічні властивості звичайного деревного композиту (Aiduang та ін, 2022).

У роботі (Aiduang та ін, 2022) досліджували склеювання міцелієм як природний клей при розробці високоміцних біоплит, виготовлених зі спресованих субстратів у поєднанні з різними видами грибів. Це може мінімізувати шкоду, пов'язану з клеями на основі формальдегіду, які, як вважається, мають небезпечний вплив на здоров'я та навколишнє середовище. За температури 160 °С та сили стиснення 10 МПа протягом 20 хвилин біоплита продемонструвала набагато вищу внутрішню міцність склеювання до 2,51 МПа, що перевищує встановлені стандартні діапазони для фанерних плит як у Китаї, так і в США. Ця біоплита також продемонструвала інші потенційно корисні характеристики з точки зору водо- та вогнестійкості. Робота (Liu, 2018) описує дослідження впливу різних температур на новий композит зі стебла бавовни та міцелію, який був виготовлений за допомогою процесу гарячого пресування. Зі збільшенням температури нижче 200 °С, що використовується в процесі гарячого пресування, виникали нові хімічні зв'язки між міцелієм та частинками стебла бавовни, що призвело до більш компактної структури композиту з покращеною міцністю на вигин та внутрішнє склеювання, порівнянною з деревоволокнистою плитою. Також спостерігалось зниження стійкості до термічного розкладання. У дослідженні (Sun, 2019) розробили модифіковану міцелієм деревну панель з частинок м'якої деревини та грибного міцелію з використанням целюлозних нанofібрил (ЦНБ) як природного сполучного речовини. Додавання ЦНБ покращило фізичні та механічні властивості композитів, оскільки значення навантаження збільшилися на 5% для 400 кг/м³ при додаванні ЦНБ. Примітно, що ЦНБ утворювали однорідну міцеліальну плівку, що покривала частинки деревини на мікроскопічному рівні. Модифікація міцелію також зменшила водопоглинання та товщину при набуханні композиту, водночас збільшуючи

модуль розриву та еластичність. Композит з додаванням ЦНБ потенційно може замінити легкі композити на основі формальдегіду, пропонуючи оптимізовані фізичні та механічні властивості та кращу розмірну стабільність (Aiduang та ін, 2022).

Згідно з дослідженням, типове житло використовує до 36% енергії протягом життя. Ріст міцелію на сільськогосподарських побічних продуктах та відходах приваблює дослідників до виробництва низькоенергетичних будівельних матеріалів, а також до підходу до переробки відходів. Крім того, матеріали на основі міцелію мають ряд переваг перед традиційними матеріалами, включаючи низьку вартість, біорозкладність, менший вплив на навколишнє середовище та меншу щільність. Використання широкого спектру субстратів у поєднанні з контрольованими методами обробки дозволяє виробляти матеріали, отримані з міцелію, з бажаною структурою та функцією для конкретних застосувань (Manan, Ullah, Ul-Islam, Atta, Yang, 2021).

Міцність на стиск та вага на кубічний метр міцеліальної цегли становлять близько 30 фунтів на квадратний дюйм та 43 кг ($\approx 0,7$ фунтів на квадратний дюйм/кг) відповідно, що є дуже низьким показником порівняно з 4000 фунтів на квадратний дюйм та 2400 кг ($\approx 1,7$ фунтів на квадратний дюйм/кг) відповідно, отриманими для бетону (Elsacker та ін., 2020). Таким чином, можна зробити висновок, що питома міцність на стиск міцеліальної цегли близька до міцності бетону. Низька теплопровідність – ще одна важлива властивість, яку враховують при виборі цегляного матеріалу для будівництва. Повідомлялося, що міцеліальна цегла (з теплопровідністю від 0,09179 до 0,1534 Вт/мк) демонструє кращі теплоізоляційні характеристики, ніж матеріали на основі смоли (Alaneme та ін., 2023). Подібні значення теплопровідності від 0,074 до 0,087 Вт/мк були отримані для *Oxurogus* (ОХУ) (Alaneme та ін., 2023). В іншому дослідженні (Joshi, Meher, Poluri, 2020) було показано, що біоблоки демонструють покращену термостабільність, гідрофобні властивості та механічну міцність. Дослідження стверджувало, що міцність на стиск біоблоків, розроблених з міцелію *P. ostreatus*, вирощеного на

різних субстратах із сільськогосподарських відходів (таких як пшеничні висівки, цукрова тростина, тирса та їх суміші), знаходиться в діапазоні від 6,0 до 7,5 Н/мм². Змішані субстрати мали найвищу міцність (7,5 ± 0,3 Н/мм²), а цукрова тростина мала найменшу міцність (6,0 ± 0,3 Н/мм²) через відносно більший розмір частинок, що призводило до поганого проникнення міцелію та покриття поверхні біоблоками цукрової тростини. 13-метрова вежа, відома як «Ну-Fi», була побудована з 10 000 міцеліальних цеглин шляхом змішування дерев'яної балки з композитами на основі міцелію для покращення міцності (Elsacker та ін., 2023) (рис. 4.3.). У 2014 році, коли цей проект був представлений, він переміг у конкурсі програми «Молоді архітектори» в «MoMA PSI» в Нью-Йорку (Alaneme та ін, 2023).

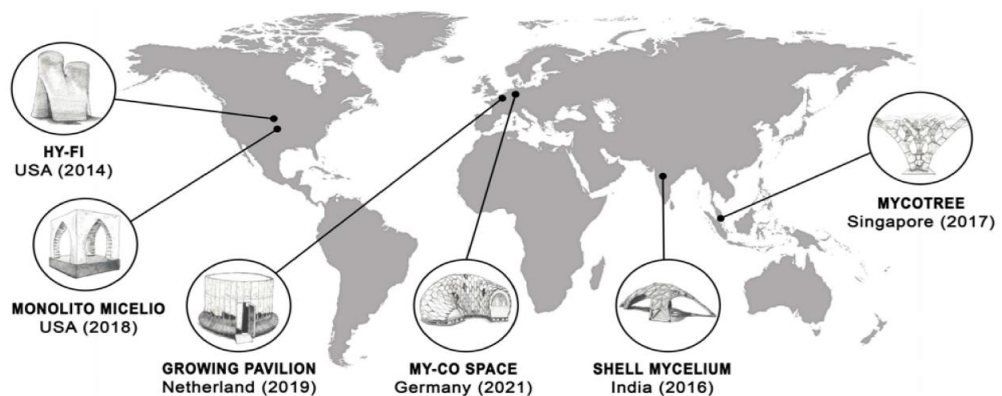


Рис. 4.3. Географічне поширення та рік побудови архітектурних споруд із матеріалів на основі міцелію (Elsacker та ін., 2023)

Композити на основі міцелію, вирощені на соломі та конопляних волокнах, служать природним ізолятором завдяки своїй низькій щільності та низькій теплопровідності, які зазвичай мають міцний зв'язок. У менш щільних матеріалах велика кількість сухого повітря присутня у вільних повітряних просторах, що зменшує теплопровідність. Ця особливість робить менш щільні матеріали чудовими теплоізоляторами. Біопіна на основі міцелію має великий потенціал для застосування як альтернативні ізоляційні матеріали для будівництва та розвитку інфраструктури. Сам міцелій є винятковим акустичним поглиначем, який демонструє сильне низькочастотне поглинання (близько 1500 Гц), і потенційно може замінити звичайні стельові плити для

зменшення шумового забруднення. Згідно з дослідженням, композити на основі міцелію, що містять сільськогосподарські відходи, можуть демонструвати акустичне поглинання до 70%–75%. Волокна в міцеліальних композитах діють як елементи тертя та перешкоджають руху акустичної хвилі; таким чином, вони можуть потенційно зменшувати її амплітуду, коли звукові хвилі рухаються через звивисті проходи матеріалу. Тонкі волокна забезпечують покращене акустичне поглинання, оскільки вони можуть легко рухатися, а велика кількість волокон на одиницю об'єму призводить до більшої кількості шляхів скручування та сприяє кращому опору потоку повітря. Поверхнева пористість та геометрія матеріалів на основі міцелію також відіграють важливу роль в акустичному поглинанні. Дослідження показало значний вплив менш пористого матеріалу на характеристики звукопоглинання порівняно з високопористим матеріалом. Як правило, щільні та компактні матеріали поглинають більше звукової енергії порівняно з тонкими матеріалами. Композити на основі міцелію також мають кращі характеристики пожежної безпеки, ніж традиційні будівельні матеріали, такі як полістирольна ізоляція та ДСП, а також пропонують кращу стійкість до термітів завдяки використанню природних термітицидів (Jones et al., 2020). Матеріали на основі міцелію безпечніші порівняно з традиційними легкозаймистими матеріалами на основі нафти, оскільки перші виділяють менше CO₂ та диму під час горіння та потребують багато часу для займання. Такі унікальні особливості роблять композити на основі міцелію життєздатною, недорогою, безпечною та екологічно стійкою альтернативою традиційним будівельним матеріалам (Manan, 2021; Jones, 2019)

Щодо пастоподібного матеріалу, вивчаються нові методи екструзійного формування для виготовлення міцеліального композиту, які наразі мають обмежені можливості для використання в проектуванні складних 3D-форм. Склад міцелію, отриманого з *G. lucidum* при вирощуванні з сільськогосподарськими відходами, бамбуковим волокном та хітозаном, може створити робочу та екструдовану пастоподібну суміш. Технологія на основі

бамбукового волокна (500 мкм), хітозану (3 мас.%), рН (~6) та вагового співвідношення бамбука до хітозану (60:40) може бути використана для встановлення оптимальних умов росту міцелію. Незважаючи на те, що використання хітозану зменшує жорсткість кінцевого продукту порівняно з іншими продуктами, виготовленими без хітозану, склад дійсно пропонує більший потенціал для використання у виготовленні складних форм матеріалів, пов'язаних з міцелієм, для використання в передових технологіях 3D-друку. Поряд із розширенням спектру застосування цих матеріалів, існують також переваги, пов'язані зі стійкістю та зниженням витрат на енергію. Тенденції розвитку МВК в основному зосереджені на застосуванні в композитних плитах або панелях з використанням різних сільськогосподарських відходів та грибів, для яких було проведено випробування на предмет їх потенційного застосування як у тепловій, так і в акустичній ізоляції. Відповідно, певні методи нагрівання, такі як гаряче пресування та сушіння в печі, були використані в обробці продукції для створення високоефективної, екологічної альтернативи традиційним плитам на основі деревини або піни. Крім того, тонкі листи та плівки міцелію, розроблені з різних грибів, вирощених на органічних речовинах, також використовували метод нагрівання для припинення росту та формування продукту міцелію в тонкі листи, плівки та нанопapіp. Ці інноваційні продукти можуть замінити полімерні покривні матеріали, які зараз використовуються в багатьох сферах застосування, особливо в галузі дизайну та упаковки продукції (Manan, Ullah, Ul-Islam, Atta, Yang, 2021).

4.4.3 Дизайн, меблі, мода (екодизайн, шкірозамінники).

Можна розглядати не лише «класичні» матеріали із застосуванням як будівельні матеріали. Американські компанії Muscoworks та Bolt розробляють шкіру на основі міцелію. Шкіра грибів, вирощена з плодовим тілом грибів *Phellinus ellipsoideus*, продається під торговою маркою Muskin компанією Life Materials (Elsacker та ін. 2020)..

Основним цільовим застосуванням є її використання як замінишки шкіри з використанням таких видів, як *Ganoderma spp.*, *Trametes versicolor*, *Fomes spp.*, *Русноporus spp.* та *Perenniporia spp.* (<https://patents.google.com/patent/US11118305B2/en>, <https://patents.google.com/patent/WO2020115690A1/en>). Традиційне виробництво шкіри тісно пов'язане з тваринництвом, яке однозначно відповідає за значну частку світових викидів парникових газів та постійно зростаючу вирубку лісів ([https:// leatherpanel.org/sites/default/files/publications-attachments/future_trends_in_the_world_leather_and_leather_products_industry_and_trade.pdf](https://leatherpanel.org/sites/default/files/publications-attachments/future_trends_in_the_world_leather_and_leather_products_industry_and_trade.pdf), França та ін., 2021). Хоча найпоширенішими альтернативами є синтетична шкіра, що походить з нафтохімічної промисловості, вона несе таке ж екологічне навантаження, як і небіорозкладні пластмаси (Bhuvanewari, 2018; Kylili, 2018). Мікошкіра пропонує чистішу альтернативу та сприяє вищій стійкості в секторі, який гостро потребує більш екологічних покращень (Jones, Gandia, John, Bismarck, 2020). Ці аргументи в поєднанні з річною світовою ринковою вартістю, яка оцінюється приблизно в 394 мільярди доларів США для шкіряних виробів у 2020 році (www.grandviewresearch.com/industry-analysis/leather-goods-market), забезпечують світле майбутнє для комерційного успіху мікошкіри. Тому не дивно, що компанії, які розробляють міцеліальні матеріали, зараз зосереджуються на виведенні на ринок продуктів з мікошкіри (рис. 4.4.).

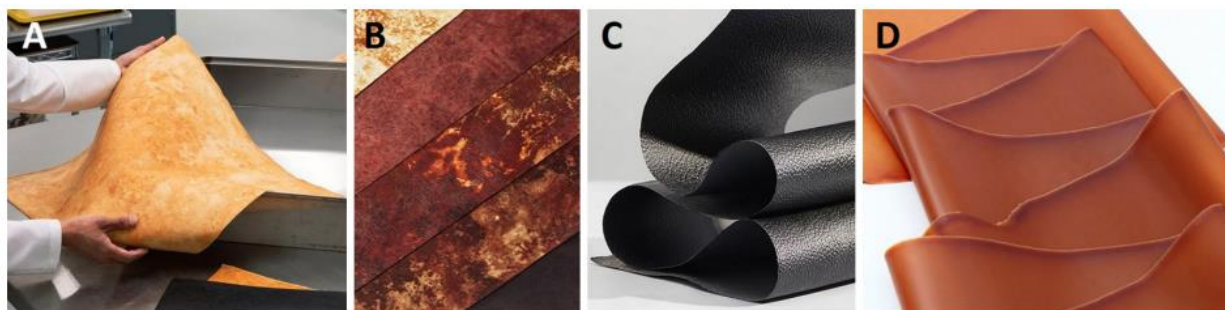


Рис. 4.4. Приклади тканин міцелію, схожих на шкіру: А - Reishi™ від Mucoworks, В - Mylea™ від Mucotech Lab, С - Mylo™ від Bolt threads, D - VTT міцелійна шкіра

У результатах випробувань, помітні відмінності в механічних та фізичних властивостях між брендами мікошкіри. Щоб запропонувати конкурентоспроможну альтернативу, можна впровадити різні стратегії для підвищення механічної міцності матеріалу, щоб він відповідав міцності класичної шкіри. Наприклад, Mylea™ (рис. 4B) містить структурний тканиноподібний матеріал, колонізований міцелієм для покращення міцності на розрив виробу з мікошкіри (<https://mycl.bio/storage/app/media/mylea/Mylea%20Technical%20Data%20Sheet.pdf>). Ця тканина може бути як натуральною, так і синтетичною (наприклад, шкірка рослин, бавовна, марля, трав'яні волокна або штучні полімерні волокна). Такий гібридний матеріал, у якому біоматеріал поєднується зі штучними полімерами, ставить під сумнів його стійкість та біорозкладність. Як природне рішення, наноцелюлозні фібрили (Sun, 2019; Attias, 2021) здаються перспективною біополімерною добавкою для міцеліальної шкіри, оскільки раніше було показано, що вони збільшують міцність на розтяг на 271% при вмісті целюлози 15% та до 626% при вищому вмісті целюлози при ферментації в зануреному біореакторі (Vandelook, Elsacker, Wylick, De Laet, Peeters, 2021). Процес виробництва міцеліальної шкіри Bolt Treads, заснований на технології ферментації Ecovative, включає стиснення товстої міцеліальної піни у тонку компактну тканину (<https://patents.google.com/patent/US11015059B2/en>). Подальша обробка міцелію за допомогою зв'язуючих агентів забезпечує достатню міцність матеріалу для виконання ролі замітника шкіри. Стратегія MusoWorks включає в себе організацію орієнтації повітряних гіф для створення тканих візерунків, подібних до звичайних тканин, у їхньому продукті Reishi™ (Meng та ін, 2021). Нещодавно розроблений альтернативний метод під назвою технологія Fine Mycelium™ дозволяє їм направляти гіфи в пучки спіральної структури, що призводить до високоорганізованих структур, подібних до скручування мотузкою. Компанія стверджує, що ця процедура призводить до кращих механічних властивостей порівняно з існуючими міцеліальними шкірами, синтетичними шкірами та шкірою тварин. Як і у

випадку з традиційним текстильним ткацтвом, зміна орієнтації волокон створює загалом міцніший склад матеріалу (Vandelook, Elsacker, Wylick, De Laet, Peeters, 2021).

Окрім шкіри, різні художники та дизайнери створювали всілякі предмети, такі як текстиль на основі міцелію, який використовується в моді Аніелою Хойтінк, меблі, надруковані на 3D-принтері Еріком Кларенбіком, вирощені лампи Йонасом Едвардом і навіть взуття, рюкзаки та обкладинки для книг (Elsacker та ін. 2020).

4.4.4. Можливості в медицині (біоактивні матеріали, ранові покриття).

Останнім часом у медичній галузі представлені різні живі організми, які ретельно оцінюються на предмет їхньої здатності виробляти біополімери. Завданням дослідників є створення екологічно чистих та економічних матеріалів з цінними властивостями. Наприклад, матеріали на основі бактеріальної целюлози використовуються для різних біомедичних застосувань, таких як загоєння ран, біосенсорика та доставка ліків (Jasim та ін., 2017). Природні біополімери, такі як хітин і целюлоза, є основними компонентами міцелію. Крім того, очищення міцелію легше порівняно з целюлозою як рослинного, так і мікробного походження. Плівки міцелію легко очищаються шляхом нагрівання при 60 °C протягом 2 годин (Haneef та ін., 2017), тоді як бактеріальні плівки потребують багаторазового промивання кип'яченим розчином гідроксиду натрію з подальшим промиванням стерилізованою водою (Kim та ін, 2019), тоді як целюлоза рослинного походження потребує значної фізико-хімічної та механічної обробки для видалення геміцелюлози, лігніну та інших домішок (Ullah, Manan, Kirpono, Ul-Islam, 2019). Пориста та жорстка 3D-структура плівки міцелію робить її потенційним кандидатом для загоєння ран. У дослідженні повідомлялося про розробку плівки міцелію, насиченої куркуміном, як пластиру для загоєння ран, який забезпечував пролонговане вивільнення куркуміну (Khamrai, Banerjee,

Kundu, 2018). Розроблений пластир може бути ефективною системою доставки ліків для загоєння ран завдяки відомим протизапальним, протипухлинним та антиоксидантним властивостям. Загальновідомо, що терапевтична ефективність системи пластирів, насичених ліками, пов'язана з концентрацією препарату та кінетикою його вивільнення з системи пластирів. Постійне вивільнення препарату підтримує безперервну доступність препарату в місці інфекції. Тритерпеноїдні сполуки (ТС), виділені з міцелію *Morchella*, ефективні для лікування деменції та раку (Wang, Zhang, Zhao, 2015). ТС мають хорошу антиоксидантну та протипухлинну активність. Отримані з міцелію *Morchella* ТС значно пригнічували проліферацію клітинних ліній PC-3, HT-29, HepG2, HeLa та HepG2 (Wang, Zhang, Zhao, 2015). Інше дослідження виявило хорошу антиоксидантну та антивікову активність ацетильованих полісахаридів міцелію (*AMPS*) *P. djmour* (Li та ін, 2019). Крім того, грибковий міцелій різних видів демонструє захисну дію на нирки, мозок та печінку (Manan, Ullah, Ul-Islam, Atta, Yang, 2021).

Гриби використовуються в традиційній медицині з давніх часів. Багато видів нитчастих грибів відомі своїми терапевтичними властивостями. Плодове тіло грибів та міцелію багате на речовини, що мають противірусні, антимікробні, омолоджувальні, протизапальні, гіпохолестеринемічні та антиоксидантні властивості. Наночастинки, опосередковані грибами, синтезуються шляхом додавання металевих прекурсорів у ферментаційну культуру, які поглинаються біомасою міцелію та відновлюються до відповідних наночастинок (Guilger-Casagrande, de Lima, 2019). Біомаса після синтезу руйнується хімічною обробкою для вивільнення наночастинок. Наночастинки ZnO, отримані з грибкових полісахаридів, мають покращену біосумісність для потенційного використання в широкому спектрі біомедичних застосувань (Manan, Ullah, Ul-Islam, Atta, Yang, 2021).

Отже, міцелієві композити це новий клас дешевих та екологічно стійких матеріалів, що викликають зростаючий дослідницький інтерес та комерціалізацію в країнах ЄС та США. Ці матеріали використовують природний ріст грибів як низькоенергетичний метод біовиробництва для переробки численних сільськогосподарських побічних продуктів та відходів у більш стійкі альтернативи енергоємним синтетичним матеріалам. Міцелієві композити мають налаштовувані властивості матеріалу залежно від їхнього складу та виробничого процесу, і можуть замінити пінопласт, деревину та пластик для таких застосувань, як ізоляція, дверні серцевини, панелі, підлогові покриття, шафи та інші меблі. Завдяки низькій теплопровідності, високому акустичному поглинанню та пожежобезпечним властивостям, які перевершують традиційні будівельні матеріали, такі як синтетичні пінопласти та інженерна деревина, вони є особливо перспективними як тепло- та акустичні ізоляційні піни. Однак обмеження, що впливають з їхніх, як правило, піноподібних механічних властивостей, високого водопоглинання та багатьох прогалин у документації щодо властивостей матеріалів, вимагають використання міцелієвих композитів як неструктурних або напівструктурних доповнень до традиційних матеріалів для конкретних, придатних застосувань, включаючи ізоляцію, панелі та меблі. Тим не менш, корисні властивості матеріалів, окрім низької вартості, простоти виробництва та екологічної стійкості цих матеріалів, свідчать про те, що вони відіграватимуть значну роль у майбутньому зеленого виробництва різноманітних матеріалів.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАКУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІЦЕЛІЙ-ВМІСНИХ КОМПОЗИТІВ (МВК)

5.1. Характеристика міцелій-вмісних композитів

Кількість пластику, що накопичується в навколишньому середовищі, швидко зростає, проте наше розуміння його стійкості дуже обмежене. Пластикові відходи наразі утворюються зі швидкістю, що наближається до 400 млн тонн на рік (Chamas A. та ін. (2020)). Більшість будівельних та пакувальних матеріалів не є біорозкладними та стають відходами після їх використання. У деяких випадках відходи спалюються, що сприяє забрудненню повітря та створює загрозу для здоров'я населення (Manisalidis I., Stavropoulou E., Stavropoulos A., Bezirtzoglou E. (2020)). Існує нагальна потреба в нових екологічних матеріалах, які будуть біорозкладатися з часом після їх використання, на відміну від продуктів на основі нафти, які розкладаються сотні або тисячі років.

Існуючі сільськогосподарські та деревообробні галузі виробляють побічні продукти у вигляді лігноцелюлози, що потребує контрольованої утилізації. Існує можливість утилізації цих відходів шляхом включення до складу композитних матеріалів. Міцелій вмісні біокомпозити (МВК) – це тип біокомпозитів, що базуються на утилізації лігноцелюлозних відходів та природному рості грибкового організму. Під час росту гриб зміцнює субстрат, який частково заміщується біомасою самого гриба, в результаті чого утворюється біокомпозитний матеріал (Girometta C. та ін. 2019). Лігноцелюлоза є структурним компонентом деревних та недеревних волокон і являє собою основне джерело відновлюваної органічної речовини. Целюлоза, геміцелюлози та пектини є основними полімерними вуглеводами, що складають близько 75% клітинної стінки деревини. Лігнін, ароматичний

НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ				
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Мезінова І.Р.</i>		
<i>Керівник</i>		<i>Красінько В.О.</i>		
<i>Реценз.</i>				
<i>Н. Контр.</i>				
<i>Затверд.</i>		<i>Стабніков В.П.</i>		
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАКУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІЦЕЛІЙ- ВМІСНИХ КОМПОЗИТІВ (МВК)				
		<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
			77	143
<i>Кафедра БТМ</i> ⁷⁷				

гетерополімер, становить більшу частину решти речовини клітинної стінки. Основним джерелом живлення для більшості мікроорганізмів, що мешкають у деревині, є вуглеводи, присутні в клітинних стінках та запасуючих тканинах. Гриби білої гнилі є найефективнішими та найширшими «споживачами» лігноцелюлози завдяки своїй здатності виробляти різноманітні гідролітичні та окислювальні ферменти, що діють з різною специфічністю та синергією (Daniel G. (2016)). Вони належать до базидіоміцетів і унікальні тим, що можуть ефективно мінералізувати лігнін з деревини на додаток до деревних полісахаридів до CO₂ та H₂O (Irbe I., Loris G. D., Filipova I., Andze L., Skute M. (2022)). У свою чергу, клітинні стінки грибів складаються на 80-90% з полісахаридів, а решта - з білків та ліпідів. Хітин є основним скелетним матеріалом і присутній у внутрішній стінці більшості грибів (Zabel R., Morrell J. (2020), Irbe I., Loris G. D., Filipova I., Andze L., Skute M. (2022)). Гриби продовжують відігравати вирішальну роль у багатьох аспектах життя, від антибіотиків до харчових продуктів, таких як пиво, вино, хліб, соєвий соус, темпе та замітники м'яса. Однак, нещодавні дослідження та комерціалізаційні зусилля також продемонстрували значний потенціал міцеліальних матеріалів та міцеліальних композитів, зокрема в галузі виробництва пакувальних матеріалів (Abhijith R., Ashok A., Rejeesh C.R. (2018), <http://ecovatedesign.com/mycocomposite>).

Незважаючи на величезний потенціал цих матеріалів, які комерційно доступні вже понад десять років, їх впровадження відбувається повільно. Dell використовує міцелієву піну для упаковки бізнес-серверів, а IKEA також висловила зацікавленість у впровадженні упаковки на основі міцелію (<http://www.dell.com/learn/us/en/uscorp1/corp-comm/mushroom-packaging>, www.telegraph.co.uk/news/earth/businessandecology/recycling/12172439/Ikea-plans-mushroom-based-packaging-as-eco-friendly-replacement-for-polystyrene.html 2016). Однак інтерес до міцеліальних матеріалів зростає, і компанії зараз активно працюють у США, Італії, Індонезії, Нідерландах, а дослідження охоплюють США, Італію, Бельгію, Нідерланди, Австралію,

Австрію та Швейцарію (Jones M., Mautner A., Luenco S., Bismarck A., John S. (2019)).

Mycocomposite – це інноваційний біоматеріал, отриманий з міцелію, кореневої структури грибів. Розроблений компанією-новатором Ecovative Design, цей матеріал поєднує міцелій із сільськогосподарськими відходами, які служать субстратом для росту грибів. Компанія пропонує екологічно чисту альтернативу традиційним виробничим матеріалам, таким як пластик та пінопласт, сприяючи більш сталому розвитку та циркулярній економіці. Упаковка Mushroom® вирощується за 7 днів, з міцелію та утилізується компостуванням за 45 днів (<https://ecovatedesign.com/>).

Україна інтегрувала у власне законодавство прийняту в ЄС Директиву 2015/720/EU. Після вступу в силу нового закону, біорозкладна упаковка повинна піддаватися фізичному, хімічному, термальному або біологічному розкладанню з утворенням органічних речовин. А компостована упаковка має бути біорозкладаною. Стандарт EN 13432 описує, що компостованою можна назвати тільки ту упаковку, яка за 3 місяці в спеціально створених умовах мінімум на 90% деградує на фрагменти розміром менше 2 мм, а за 6 місяців розкладається на 90% і більше. При цьому відбувається трансформація упаковки на CO₂, а компост має агрономічну цінність і не є токсичним (<https://www.mpak.ua/produktsiya/izgotovlenie-paketov-s-logotipom/biorazlagaemye-pakety/>).

Таким чином у світі стрімко зростає попит на природнім шляхом деградуючі пакети і упаковку, що має замінити традиційні пакувальні матеріали, то промислове використання нових еко матеріалів на основі міцелій вмісних композитів у виробництві різних типів пакування доволі перспективним напрямом.

5.2. Огляд ринку цільової (аналогічної) продукції

Міцелій вмісні композити можна використати під час виробництва пакувальної тари для пакування крафтового вина. Тим більш, що виробники

позиціонують себе як екологічне виробництво і є зацікавленими в екологічному пакуванні, що у вигляді скла потрапляє на повторну переробку, а пакувальна тара вироблена із міцелію (коробки) передаються на компостування.

Нині в Україні офіційно зареєстровано 160 виноробень, із них 40 — крафтові з обсягом виробництва до 100 000 л на рік (<https://nv.ua/ukr/food/eat/shcho-take-wines-of-ukraine-diyalnist-spivpracya-z-mizhnarodnimi-partnerami-ta-populyarizaciya-vina-50400320.html>). Прийmemo, що найпоширеніша тара - пляшка 0,7 л і розрахуємо геометричний розмір екоупаковки з мікокомпозиту. Прийmemo, що пачка для пляшки вина представляє собою прямокутну коробку з двома вкладками (класичний «клатмшел» у картонній коробці). Зовнішні розміри пляшки, представлені нижче:

- $D = 74$ мм (діаметр тіла)
- $H = 300$ мм (повна висота)
- $t = 15$ мм (бічна товщина мікокомпозиту)
- $t_{end} = 20$ мм (верх/низ)

Порожнина під пляшку — циліндр R, H ; увесь простір прямокутного паралелепіпеда, що його оточує, заповнений мікокомпозитом.

Внутрішні габарити коробки: $W = D + 2 \cdot t$, $D_{box} = D + 2 \cdot t$ (ширина × глибина)

$$L = H + 2 \cdot t_{end} \text{ (висота/довжина)}$$

$$\text{Об'єм коробки: } V_{box} = L \cdot W \cdot D_{box}$$

Об'єм мікокомпозиту:

$$V_B = V_{box} - \pi \cdot R^2 \cdot H \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$V_B = V_B / 10^6 \text{ (л)}$$

Таким чином:

$$\bullet W = D_{box} = 74 + 2 \cdot 15 = 104 \text{ мм; } L = 300 + 2 \cdot 20 = 340 \text{ мм}$$

$$\bullet V_{box} = 340 \cdot 104 \cdot 104 = 3676, 160 \text{ мм}^3$$

$$\bullet V_B = 3\,676\,160 - \pi \cdot 37^2 \cdot 300 = 2,4 \text{ л}$$

Питома густина майже всіх біокомпозитів знаходиться у діапазоні 0,54–0,66 г/см³ згідно із статтею (Gutarowska В. та ін. (2024)). Приймаючи середнє значення у 0,6 г/см³, визначимо скільки г мікокомпозиту треба для виробництва упаковки об'ємом 2,4 л = 2400 см³ для пакування 1 винної пляшки (0,7 л):

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 0,6 \text{ г/см}^3 \cdot 2400 \text{ см}^3 = 1440 \text{ г}$$

5.3. Розрахунок річної потужності виробництва

Для задоволення потреби у 100 000 л вина на рік необхідно:

$$0,7 \text{ л} - 1,44 \text{ кг}$$

$$100\,000 \text{ л} - x$$

$$x = 205\,714,3 \text{ кг мікокомпозиту}$$

Оскільки перехід на еко упаковку є процесом поступовим, то для початку пропонуємо задовольняти хоча б 10 % потреби в упаковці на рік. Таким чином, для пакування 10 000 л необхідно 20 571,43 кг мікокомпозиту. Згідно із статтею (Gutarowska В. та ін. (2024)) у мікокомпозиті частка міцелію становить 10, 20 і 40 % (приймаючи середнє значення 23,3 %) тобто 4793,1 кг.

Розраховувавши потребу у 4793,1 кг міцелію на рік, слід визначити, скільки культуральної рідини можна отримати під час культивування *Cladosporium cladosporioides*, який синтезує 23,7 г/л біомаси протягом 120 год (Gutarowska В. та ін. (2024)). Отже, об'єм культуральної рідини становитиме:

$$\frac{4793,1 \times 1000}{120} = 39\,942,5 \text{ л}$$

Далі розраховуємо загальні втрати під час етапів виділення міцелію із культуральної рідини які складають 15 %:

$$39\,943 \text{ л} / (1 - 0,15) = 46\,992 \text{ л}$$

Далі розраховуємо, який об'єм культуральної рідини можна отримати за цикл біосинтезу. Згідно із цими даними розраховуємо кількість необхідних етапів підготовки посівного матеріалу. Прийmemo, що кількість робочих

трудоднів ($T_{рд}$) = 300, тоді кількість культуральної рідини на добу (V_d) становитиме:

$$V_d = C / T_{рд} = 46\,992 / 300 = 157 \text{ л}$$

Об'єм культуральної рідини за цикл ($V_{пц}$) буде становити:

$$V_{пц} = \frac{K_1 * V_d * T_{цф}}{24} = \frac{1,1 * 157 * 128}{24} = 921 \text{ л/цикл}$$

де $T_{цф}$ – загальний цикл роботи ферментера, який включає тривалість виробничого біосинтезу (120 год) та час підготовки ферментера до роботи (8 год). K_1 – коефіцієнт запасу, що враховує можливість нестерильних операцій $K_1 = 1,1 - 1,5$.

Розрахований об'єм культуральної рідини (921 л) можна одержати у ферментері, геометричний об'єм якого складатиме:

$$V_r = \frac{V_{пц}}{K_{зап}} = \frac{921}{0,6} = 1535 \text{ л}$$

Найближчим за об'ємом є стандартний ферментер на 2,0 м³ ($V_{ф}$).

РОЗДІЛ 6. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СТАДІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

6.1. Обґрунтування вибору післяферментаційних процесів отримання біомаси міцелію

Штам *C. cladosporioides*, що класифікується як сапрофіт, використовується для отримання грибової біомаси (міцелію), яку було посилено комерційною відбіленою крафт-целюлозою з м'якої деревини (сосни) для виробництва біокомпозитів (Gutarowska B. та ін. (2024)).

Це ксерофільний та психрофільний гриб, про що свідчить його здатність рости в широкому спектрі вологості та температури. Оптимальна температура росту становить 18–28 °С. Міцелій може бути пухким або щільним і має тенденцію до плоского росту. Клітини не проявляють патогенних ознак, хоча спори можуть бути алергенними, а деякі штами викликають хвороби винограду. Організм не виробляє мікотоксини. Ці характеристики роблять міцелій *C. cladosporioides* хорошим кандидатом для використання у виробництві біокомпозитів (Jevinová P. та ін. (2021)).

6.1.1 Етапи отримання мікокомпозиту

Для отримання готового мікокомпозитного матеріалу необхідно виконати такі стадії:

1. Виділення і очищення біомаси:

- термічна інактивація міцелію
- відділення біомаси із культуральної рідини.
- сушіння грибового міцелію

2. Приготування целюлозної матриці:

- зважування, замочування та деволокнізація целюлозної маси м'якої породи дерев (сосни) (із розрахунку 30 г целюлози на 6 г міцелію, що

					НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 6. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СТАДІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Мезінова І.Р.					83	143
Керівник		Красінько В.О.				83		
Реценз.						Кафедра БТМ		
Н. Контр.								
Затверд.		Стабніков В.П.						

становить 5 г целюлози на 1 г міцелію)

3. Створення готового продукту:

- рафінування суміші пульпи целюлози і міцелію
- формування листів біокомпозиту
- пресування листів біокомпозиту
- сушіння листів біокомпозиту

6.1.2 Термічна інактивація міцелію

Існують різні способи для знищення мікроорганізмів, шляхом дії на них методами, згубними для живих клітин, що об'єднанні під назвою стерилізація. Всі способи стерилізації розділяють на фізичні, механічні та хімічні; або їх ще називають термічні та холодні.

Термічна стерилізація дозволяє знищувати живі клітини мікроорганізмів за допомогою високих температур. У вегетативних (неспорових) клітин денатурація білків і загибель відбувається при 56–60°C. Спори гинуть при 160°C протягом 1–2 год., а у вологому середовищі при температурі 112–120°C протягом 20–30 хв. До методів термічної стерилізації належать: 1) стерилізація сухим жаром (проводиться гарячим повітрям в сушильній шафі), 2) фламбірування (прожарювання термостійких матеріалів у полум'ї), 3) кип'ятіння (за допомогою нагрівання води до точки кипіння від 15–30 хв. до 2 год при температурі біля 100°C.), 4) стерилізація текучою парою (проводиться насиченою водяною парою в автоклаві), 5) пастеризація (прогрівання рідин на водяній бані при температурі 60–90°C протягом 10–30 хв або або в термостаті при наступних режимах: 60–70 °C 30 хв; 80 °C 10–15 хв.), 6) стерилізація парою під тиском (насиченою водяною парою в автоклаві, у режимах: 15–45 хв. при надлишковому тиску 0,5 атм (температура досягає 110 – 112 °C) або 15–45 хв. при надлишковом тиску 1,0 атм (температура досягає 121 °C) або 10–30 хв при надлишковому тиску 1,5 атм (температура досягає 126 °C)) (Ващенко О.В., Міхедькіна О.Й. 2008)).

Під час холодної стерилізації застосовують хімічні речовини або впливають методами фізичної природи.

Хімічні методи ґрунтуються на використанні дезінфектантів та антисептиків або використанні антибіотиків і синтетичних антимікробних речовин з вибірковою дією. Загибель клітин відбувається в результаті коагуляції білків, гідролізу клітинних органел, інактивації клітинних ферментів. Хімічна стерилізація використовується при дезінфекції рук та поверхонь. Таким хімічними речовинами є солі важких металів, формалін, спирти (60–70 % водні розчини), кислоти, антибіотики окисники (хлор, перманганат калія, йод, перекис водню), газоподібні речовини (окис етилену, формальдегід, озон).

Фізичні методи стерилізації: стерилізація радіоактивним γ -випромінюваннями, УФ-променями, ультразвуком. УФ-промені застосовують для стерилізації матеріалів з термолабільної пластмаси. Вегетативні форми чутливіші до опромінення, ніж спори, які в 3 – 10 разів більш стійкі. Даний метод є обмеженим у застосуванні через низьку проникаючу здатність, оскільки мікроорганізми можуть бути захищені пилом, органічними речовинами і дія УФ-променів зменшується внаслідок високої поглинаючої здатності води і скла. γ -Опромінення використовується для стерилізації антибіотиків, вітамінів, гормонів, стероїдів, пластмасового разового і медичного устаткування, шовного і перев'язувального матеріалу. Найменш стійкі до γ -опромінення вегетативні клітки бактерій, трохи більш стійкі цвілеві гриби, дріжджі, бактерійні спори (Ващенко О.В., Міхедькіна О.Й. 2008).

Механічний метод стерилізації (стерилізуюча фільтрація) застосовується, коли речовини є термолабільними, тобто не витримують нагрівання і дії хімічних речовин (білки, сироватки, антибіотики, вітаміни). Розчини цих речовин під тиском або вакуумом пропускають через спеціальні мембранні фільтри (діаметр пор 0,45 – 0,2 мкм). Фільтри затримують мікроорганізми. Мембранні фільтри виготовляють з колодія, ацетату чи нітрату целюлози та ін. матеріалів (Ващенко О.В., Міхедькіна О.Й. 2008)).

Температура сильно впливає на ріст *C. cladosporioides*, причому ріст відбувається в діапазоні від 0°C до 30°C, а оптимальні умови знаходяться приблизно в межах 20-28°C, залежно від дослідженого штаму. Високі температури 35°C і вище пригнічують ріст клітин і проростання спор. (Jevínová P. та ін. (2021))

Для зупинки росту клітин *C. cladosporioides* пропонується використати термічну інактивацію міцелію в культуральній рідині при температурі 60 °C протягом 30 хвилин (Gutarowska B. та ін. (2024)).

6.1.3 Відділення біомаси із культуральної рідини

Вибір методів концентрації та виділення продуктів мікробного біосинтезу залежать від хімічного складу і властивостей цільового продукту та культуральної рідини. Найбільш простий спосіб виділення полягає у випаровуванні або висушуванні, що в результаті дають біомасу продуцента із залишками компонентів поживного середовища. Такі концентрати застосовують для приготування кормових препаратів амінокислот, вітамінів та ферментів.

Щоб повністю зневоднити мікробну біомасу і отримати очищений подут використовують такі методи: сепарацію, фільтрацію, екстракцію, флотацію, іонний обмін, адсорбцію кристалізацію, мембранні способи (Поводзинський В.М. 2006)..

Флотація – використовують під час виробництва кормових дріжджів. Культуральну рідину вспінють і велика частина дріжджів концентрується в піні. Піну відокремлюють від культуральної рідини і отримують напівпродукт із вмістом біомаси в 2—4 рази вище в порівнянні із початковою культуральною рідиною.

Центрифугування широко використовується для розділення суспензій, що містять до 5—10% твердої фази (клітин мікроорганізмів) і для сепарації емульсій. Двофазну систему можна розділяти методом відцентрового фільтрування або осадження. В центрифугах швидкість розділення вища, ніж

при фільтруванні через більшу рушійну силу при обертанні ротору центрифуги.

Фільтрація найчастіше використовується у випадках, де цільовий продукт, розчинений в культуральній рідині або для відділення біомаси найчастіше використовують фільтрацію, що базується на розділенні при пропусканні через мембрану або перегородку. З метою підвищення продуктивності фільтрації застосовують фільтри з механізованим зніманням осаду, наприклад *барабанні вакуум-фільтри*. Перфорований барабан розділений перегородками на секції, обтянутий фільтруючою тканиною, занурений нижньою частиною в ємність, куди безперервно поступає культуральна рідина. При його обертанні секції послідовно підключаються до збірок фільтрату, промивних вод і до колектора стислого повітря. У внутрішній частині, під дією розрідження барабана відбувається фільтрація культуральної рідини. Фільтрат, що збирається, відводиться в збірку, а осад залишається на зовнішній поверхні фільтрувальної тканини. За допомогою ножа відділяється біомаса, що підсохла і завдяки цьому, товщина шару осаду в зоні фільтрації практично незмінюється протягом процесу, що дозволяє вести процес фільтрації в безперервному режимі при стабільній постійній швидкості. Але при фільтрації деяких культуральних рідин, (наприклад актиноміцетів), питомий опір драглистого осаду, що утворюється, дуже великий і призводить до зниження швидкості фільтрації. Щоб інтенсифікувати процес, використовують барабанні вакуум-фільтри з намівним шаром допоміжного матеріалу фільтрації (тонкодисперсного порошку - перліту або діатоміту), який наминають на фільтрувальну тканину перед початком фільтрації культуральної рідини і захищають пори фільтрувальної тканини від закупорювання (Поводзинський В.М. 2006).

У статті (Решотько, Л. М., & Волкова, І. В. (2022)), вказано, що метаболіти гриба *Cladosporium cladosporioides* мають інгібувальну активність щодо вірусів, які вражають рослини картоплі, і можуть впливати на перебіг вірусної інфекції.

Тобто фільтрат культуральної рідини може використовуватися у рослинництві, як біопрепарат, який має противірусну (проти фітопатогенних вірусів картоплі), протигрибну та рістстимулювальну активність (Решотько, Л. М., & Волкова, І. В. (2022)).

6.1.4 Сушіння грибкового міцелію

Для сушки (кінцевої стадії виробництва) біологічних об'єктів використовують методи, що розрізняються по агрегатному полягання вологи у висушуваному матеріалі (сушка з рідкого стану / твердого), а також за типом подачі тепла (конвективна, контактна і радіаційна). Контактна сушка характеризується нагрівання матеріалу в результаті контакту з гарячими поверхнями (плитами), наприклад шафові та вальці сушарки. Така сушка малопридатна для сушки термолабільних препаратів. У конвективній сушці теплота подається до висушуваного матеріалу через газоподібний сушильний агент-теплоносій. Цей метод є основою для роботи пневматичних, розпилюючих і сушарок з киплячим шаром. Варто відмітити, що при сушці біомаси дріжджів температура теплоносія на вході в розпилювану сушарку становить 300-400°C. Саме такої температури і сухі дріжджі, що знаходяться в сушці і при цьому білки, що містяться в біомасі, не піддаються деструкції. Радіаційна сушка характеризується передачею тепла від джерела до матеріалу шляхом інфрачервоного випромінювання. Для сушки пастоподібних, сипких і рідких матеріалів застосовують сушарки з киплячим шаром, в яких гарантується висока інтенсивність тепло- та масообміну, а також безперервність процесу (Поводзинський В.М. 2006)..

Грибну біомасу легко сушити, оскільки її структура не має тенденції до руйнування та затвердіння, як це відбувається з бактеріальною біомасою. При використанні стрічкової сушарки безперервної дії з однопрохідним потоком теплого повітря вниз, температура повітря 75°C є оптимальною для сушіння міцелію *Penicillium* без вакуумного фільтра при вмісті твердих речовин 20%; час перебування 20–30 хвилин дає продукт з вологістю 8–10%. Нагрівання при

занадто високій температурі знижує харчову цінність продукту через зміну доступності лізину. (SINGLE-CELL PROTEIN (1999))

В нашому випадку біомасу міцелію *C. cladosporioides* пропонується сушити у камері для сушки, при температурі 105 °С протягом 7 годин з метою усунення зайвої вологи (Gutarowska B. та ін. (2024)).

6.2. Підбір технологічного обладнання з врахуванням матеріальних потоків по стадіях

Вихідні дані:

- об'єм культуральної рідини з однієї ферментації – $V_{кр} = 921$ л ;
 - концентрація біомаси в КР = 23,7 г/л біомаси;
- втрати на стадіях виділення цільового продукту складають 15 %:

Розподіл втрат цільових продуктів по стадіях та підбір необхідного обладнання наведено в таблиці 6.1:

Таблиця 6.1.

Розподіл втрат по стадіях та підбір необхідного обладнання

№ п/п	Назва стадії (операції)	Матеріальні потоки на стадії	Кількість по стадіях			Необхідне обладнання
			Надійшло	Втрати під час виділення міцелію (разом 15 %)	Вийшло	
1	2	3	4	5	6	7
1	ТП 1.1. Зберігання культуральної рідини	Культуральна рідина (КР)	921 л	–	921 л	Реактор-збірник об'ємом 1,0 м ³
2	ТП 2.1. Знищення життєздатних клітин продуцента під дією теплової обробки	Культуральна рідина (КР)	921 л	–	921 л	Реактор-збірник об'ємом 1,0 м ³
3	ТП 3.1. Фільтрація на барабанному вакуум-фільтрі	Біомаса	21,83 кг (921 л x 23,7 г/л) з врахуванням 90 % вологості 218,3 кг	5 % (10,96 кг)	207,34 кг	Збірник об'ємом 250 л Барабанний вакуум фільтр
		Фільтрат	–	–	713,66 л (921 л – 207,34 кг)	Перекачується перистальтичним насосом продуктивністю 100 л/хв до збірнику об'ємом 1,0 м ³ Фільтрат – на виготовлення біопрепарату

Продовження табл. 6.1.

4	ТП 4. Сушіння міцелію	Вологий міцелій	207,34 кг	–	–	Збірник об'ємом 250 л
		Сухий міцелій	–	5 % (10,36 кг)	196,98 кг	Сушильна камера об'ємом 200 л Лотки загальним об'ємом 250 л
5	ТП 5.1 Зважування і замочування целюлози	суха м'яка деревна крафт-целюлоза (із розрахунку 5 г целюлози на 1 г міцелію)	984,9 кг (196,98 кг x 5 г)	–	–	Збірник об'ємом 1000 л
		Вода дистильована (у наявній літературі немає відомостей, прийmemo співвідношення целюлоза: вода = 1:3)	2954,7 л	–	–	Збірник об'ємом 4000 л
		Підготована целюлоза	–	–	3939,6	
6	ТП 6. Змішування міцелію і деревної пульпи	Підготована целюлоза	3939,6	–	–	Міксер гомогенізатор Збірник об'ємом 5000 л
		Сухий міцелій	196,98 кг	–	–	
		маса біокомпозиту	–	–	4136,58 кг	

Закінчення табл. 6.1.

7	ТП 7. Формування пакувальних листів біокомпозиту	маса біокомпозиту	4136,58 кг	–	–	Формувальна машина Rapid-Köthen Semi-Automatic
		Сформовані листи із біокомпозиту	–	–	4136,58 кг	Лотки для пакувальних листів біокомпозиту
8	ТП 8. Пресування пакувальних листів біокомпозиту	Сформовані вологі пакувальні листи із біокомпозиту	4136,58 кг	–	–	Пресувальна машина
		Ущільненні вологі пакувальні листи біокомпозиту	–	–	4136,58 кг	Лотки для листів біокомпозиту
9	ТП 9. Сушіння пакувальних листів біокомпозиту	Ущільненні вологі пакувальні листи біокомпозиту	4136,58 кг	–	–	Лотки для листів біокомпозиту
		Сухі пакувальні листи біокомпозиту	–	5 % (206,83 кг)	3929,75 кг	Камера для сушки

6.3. Специфікація обладнання

Загальний перелік обладнання, що буде використовуватися для виробництва мікокомпозиту наведено у табл. 6.2.

Таблиця 6.2.

Специфікація обладнання. Виробництво мікокомпозиту

Позиція	Найменування позиції	Кількість	Характеристика обладнання
1	2	3	4
РЗ-1, РЗ-2	Реактор-змішувач	2	Збірник-змішувач РСГП-1000 ВК об'єм: 1 м ³ . температура у середині: 20-95 °С, температура у сорочці: +5 ...+140°С, потужність: 380 кВт, Матеріал: AISI 312. Габаритні розміри: 2100x1850 мм, Маса: 1140,0 кг
https://promvit.com.ua/reaktor-rsgp-1000-vk-s-modernizirovannym-mexanizmom-podema-kryshki-bez-nizhnej-chasti-ramy-mexanizma-podema/			
РЗ-3	Реактор-змішувач	1	Збірник-змішувач РС-250, об'єм: 250 л мішалка від 0 до 60 об/хв. Матеріал: AISI 312, потужність: 1635 Вт Габаритні розміри: 1630x1420x1310 мм, Маса: 265,0 кг
https://promvit.com.ua/reaktor-dlya-prigotovleniya-rastvorov-s-donnoj-rotornoj-meshalkoj-i-parovoj-rubashkoj/			
РЗ-4	Реактор-змішувач	1	Збірник-змішувач, об'єм: 4000 л, Матеріал: AISI 312, Габаритні розміри: 3120 x 1400 x 1500 мм
https://www.mabe.de/en/products/pressure-vessels/16-bar-vertical/4000-l			
РЗ-5	Реактор-змішувач	1	Збірник-змішувач, об'єм: 5000 л, Матеріал: AISI 312, Габаритні розміри: 3730 x 1400 x 1500 mm
https://www.mabe.de/en/products/pressure-vessels/16-bar-vertical/5000-l			
БВФ-6	Барабанный вакуум фільтр	1	Барабанный вакуум фільтр Krauss-Maffei Середній розмір частинок: 1-300 μm, Фільтраційна здатність: 100-2,000 л/м ² год, тиск: до 70 mbar, Робоча температура: до 95 °С
https://www.andritz.com/products-en/separation/disc-drum-filters/krauss-maffei-tsf-vacuum-drum-filter			

СК-7	Сушильна камера	1	Сушильна камера, об'єм завантаження до 100 л, температура: 30-100 °С, потужність: 25,5 кВт, розміри: 2050*1610*2600
https://tehnolog.com.ua/catalog/pharma/drying-cabinet-for-pharmaceuticals-herbs-etc/			
МГ-8	Міксер-гомогенізатор	1	Міксер-гомогенізатор САТ Х 1000 Unidrive Швидкість перемішування: 4 000 — 35 000 об/хв, потужність: 1050 Вт, живлення: 230 В
https://labreaktiv.ru/catalog/obshhelaboratornoe-oborudovanie/dispersatory-i-gomogenizatory/mechanicheskie/mechanicheskij-gomogenizator-x-1000/			
НВ-11 НВ-12 НП-13 НП-14 НП-15	Насос-перистальтичний	5	Насос-перистальтичний, продуктивністю 100 л/хв, потужність Вт.
ФМ-9	Формувальна машина	1	Формувальна машина Rapid-Köthen. Температура сушіння 93 ± 1°С з рециркуляцією води (відповідно до стандарту). Підключення: 400 V, 50 Hz or 440/460V, 60Hz, стиснуте повітря: 600 кПа Розміри: 2350 x 860 x 1450 mm
https://www.rycobel.com/products/rapid-k%C3%B6then-semi-automatic-sheet-forming-machine			
ПМ-10	Пресувальна машина	1	Пресувальна машина. Виробнича потужність: 25 тонн/день. Робоча швидкість: 250-280 м/хв. Чиста ширина паперу: 2400мм
https://www.gmpapermachinery.com/uk/product-2400mm-25tons-kraft-paper-machine-line			
СК-11	Сушильна камера	СК	Сушильна камера СВ-300, об'єм завантаження до 221 л, Розміри: 1090x980x690 мм, максимальне завантаження 126 кг, максимальна температура 200 °С
https://labimpex.com.ua/ua/p386553332-vakuumnyj-sushilnyj-shkaf.html?srsltid=AfmBOorvjrORSBGLnzH2NmAbgYrrFETiP-iG3V97F4ZTRzf8VqPYfNPi			

РОЗДІЛ 7. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ

ТП 1. Зберігання культуральної рідини після закінчення культивування

ТП 1.1. Зберігання культуральної рідини *C. cladosporioides*

Після закінчення поцесу культивування культуральну рідину, що містить міцелій *Cladosporium cladosporioides* за допомогою насоса перекачують у реактор-збірник (РЗ-1) об'ємом 1000 л із зберігається за температури 4 °С.

ТП 2. Термічна інактивація культуральної рідини

ТП 2.1. Знищення життєздатних клітин продуцента під дією теплової обробки

У сорочку реактору-збірника (РЗ-1) із культуральною рідиною подають пару, щоб досягти температури у збірнику на рівні 60 °С і витримують протягом 30 хв з метою припинення росту продуцента.

ТП 3. Очищення біомаси від компонентів поживного середовища і культуральної рідини

ТП 3.1. Фільтрація на барабанному вакуум-фільтрі

Культуральну рідину у реакторі-збірнику (РЗ-1) охолоджують до кімнатної температури і перекачують на барабану установку вакуумної фільтрації (БВФ-6) з метою відділення міцелію від культуральної рідини і компонентів поживного середовища. Фільтрат подають у реактор-збірник (РЗ-2) об'ємом 1000 л. Фільтрат буде використовуватися як біопрепарат для рослинництва, який має протівірусну (проти фітопатогенних вірусів картоплі), протигрибну та рістстимулювальну активність. Біомасу збирають у реактор-збірник (РЗ-3) об'ємом 250 л.

					НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 7. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ	Літ.	Арк.	Аркушів
<i>Розроб.</i>		<i>Мезінова І.Р.</i>					95	143
<i>Керівник</i>		<i>Красінько В.О.</i>				95		
<i>Реценз.</i>						<i>Кафедра БТМ</i>		
<i>Н. Контр.</i>								
Затверд.		<i>Стабніков В.П.</i>						

ТП 4. Сушіння вологого міцелію

ТП 4.1 Сушіння міцелію *C. cladosporioides*

Відділену біомасу міцелію із ТПЗ.1 із реактора-збірника (РЗ-3) передають у камеру для сушки (СК-9), де сушать при температурі 105 °С протягом 7 годин з метою усунення зайвої вологи.

ТП 5. Підготовка деревної пульпи

ТП 5.1 Зважування і фізична обробка целюлози

За допомогою технічних вагів у реактор-збірник об'ємом 4000 л (РЗ-4) зважують 928,4 кг сухої м'якої деревної соснової целюлози (із розрахунку 5 г целюлози на 1 г міцелію) і подають через лічильник 2954,7 л води питної (із розрахунку співвідношення целюлоза: вода = 1:3). Після витримання у ємності підготовану целюлозу подають на стадію ТП-6.

ТП 6. Приготування маси біокомпозиту

ТП 6. Змішування міцелію і деревної пульпи

Сушу масу міцелію (від ТП 4) подають у реактор-збірник (РЗ-5) на 5000 л, куди попередньо подали підготовану деревну пульпу (від ТП 5) і за допомогою міксеру-гомогенізатору (МГ-8) перемішують протягом 15 хвилин (5800 об/хв).

ТП 7. Приготування напів-фабрикату

ТП 7.1 Формування пакувальних листів біокомпозиту

Масу біокомпозиту від ТП 6 подають на формувальну машину Rapid-Köthen (ФМ-9) з метою формування пакувальних листів напів-фабрикату біокомпозиту.

ТП 8. Пресування

ТП 8.1 Пресування пакувальних листів біокомпозиту

Сформовані пакувальні листи біокомпозиту від ТП 8 пресують за допомогою пресувальної машини (ПМ-10). Пресування проводилося під власною вагою валика таким чином, що валик тричі прокочувався по поверхні зразка. Цей етап необхідний з метою ущільнення та покращення механічних властивостей (міцності і жорстковсті).

ТП 9. Сушіння

ТП 9.1 Сушіння пакувальних листів біокомпозиту

Пресовані пакувальні листи біокомпозиту від ТП 8 подають партіями по 200 кг у камеру для сушки (СК-11). Сушіння готових листів композиційного матеріалу проводилося при температурі 98 °С та вакуумі 93 кПа протягом 6 хвилин.

РОЗДІЛ 8. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ УПАКОВОК ДЛЯ ВИНА НА ОСНОВІ МІЦЕЛІАЛЬНОГО БІОКОМПОЗИТУ

8.1. Обґрунтування вибору товарної форми випуску екологічної упаковки для вина на основі міцеліального біокомпозиту

Для пакування стандартної винної пляшки об'ємом 0,7 л доцільним було обрано формовану жорстку оболонку з міцеліального біокомпозиту типу «clamshell», яка складається з двох симетричних половин і повністю замінює традиційну картонну або комбіновану тару. Такий вибір зумовлений властивостями самого матеріалу: міцеліальний біокомпозит, що формується на целюлозній матриці, поєднує достатню жорсткість, низьку щільність та помітну енергоємність при ударах, що дозволяє використовувати його одночасно як конструкційну оболонку і як амортизуючий елемент. Завдяки цьому матеріал слугує не лише вкладкою чи проміжним амортизатором, а становить основу всієї товарної форми, забезпечуючи захист скляної тари без залучення додаткових полімерних чи картонних компонентів (Gutarowska et al., 2024).

Вибір «clamshell»-конфігурації є функціонально виправданим, оскільки дві дзеркальні половини забезпечують рівномірний розподіл навантаження по всій поверхні пляшки, щільну фіксацію виробу та надійну стабілізацію при транспортуванні. Конструкція такого типу добре узгоджується з технологією формування біокомпозитів: матриці для двох половин є симетричними, мають відносно просту геометрію та не потребують складних піднутрень, що зменшує витрати на виготовлення прес-форм і полегшує масштабування виробництва. Додатковою перевагою є зниження кількості складальних операцій: після росту та висушування біокомпозиту готові половини практично не потребують механічної доробки, а їх подальше використання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
Розроб.		Мезінова І.Р.			РОЗДІЛ 8. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ УПАКОВОК ДЛЯ ВИНА НА ОСНОВІ МІЦЕЛІАЛЬНОГО БІОКОМПОЗИТУ	Літ.	Арк.	Аркуші
Керівник		Красінько В.О.					98	143
Реценз.						98		
Н. Контр.						Кафедра БТМ		
Затверд.		Стабніков В.П.						

зводиться до простого з'єднання за допомогою засічок або конструктивного замка (Willicombe, 2023).

Функціональність такої упаковки підкріплюється її екологічною цінністю. Оскільки матеріал повністю біорозкладний і не містить екологічно проблемних компонентів, відпрацьована тара може бути утилізована шляхом компостування. Відсутність полімерних шарів або ламінованих структур спрощує маркування та дозволяє підкреслити екологічну спрямованість кінцевого продукту — важливий чинник для сегмента преміальних вин, де екоорієнтованість часто є частиною маркетингової стратегії. Крім того, натуральна текстура міцеліального матеріалу формує виразний візуальний та тактильний імідж, що сприяє диференціації продукту на ринку.

У процесі проектування було враховано геометричні параметри пляшки: діаметр тіла становить 74 мм, висота — 300 мм, а конструктивна товщина стінки біокомпозиту та верхньої/нижньої амортизаційної ділянки становить відповідно 15 мм і 20 мм. Такий підхід забезпечує необхідний запас міцності та поглинання ударів, особливо у торцевій частині пляшки — зоні, де під час транспортування виникають найбільші навантаження. Додатково враховано технологічну особливість матеріалу — лінійну усадку після сушіння, яка може варіювати залежно від рецептури та параметрів обробки. Через це фактичне калібрування прес-форм рекомендується проводити після одержання перших експериментальних зразків, що дозволяє скоригувати робочі розміри матриць і забезпечити стабільність конструкції у серійному виробництві.



Рис.8.1. Приклад пропонованого товарного випуску упаковки

(<https://www.polar-tech.com/shop/item/wb11/>)

Вибір формованої міцеліальної оболонки як товарної форми для винної пляшки є комплексно обґрунтованим. Він поєднує захисні властивості, технологічну доцільність, екологічну перевагу та ринкову привабливість. Упаковка виконує відразу декілька функцій — механічний захист, стабілізацію пляшки, покращення користувацького досвіду та підсилення екологічного позиціонування продукту — що робить її оптимальним рішенням для індустрії екологічно орієнтованих винних виробів.

У межах проєктування пакувального рішення для винної продукції було обґрунтовано доцільність вибору товарної форми, що поєднує жорстку зовнішню коробку та внутрішню формовану вставку з міцеліального біокомпозиту. Така конструкція відповідає сучасним вимогам до безпечного транспортування скляних виробів, оскільки поєднує структурну міцність зовнішньої оболонки та високі амортизаційні властивості біокомпозитного вкладиша. Формована вставка створюється шляхом лиття у прес-форму та точно повторює геометрію стандартної пляшки об'ємом 0,7 л, що забезпечує фіксацію тари у стабільному положенні та мінімізує ризики її переміщення під час транспортування.

Використання міцеліального матеріалу як основного компонента внутрішньої форми дозволяє замінити пінополістирольні та інші полімерні амортизувальні елементи екологічним і біорозкладним аналогом, який має природну пористу структуру та здатний ефективно поглинати ударні навантаження. Окрім цього, міцеліальний біокомпозит містить рослинну клітковину, що сприяє стабільності форми після сушіння та забезпечує потрібну механічну міцність без необхідності використання синтетичних зв'язувальних речовин (Gutarowska et al., 2024).

Зовнішня коробка виконує роль несучої конструкції, надає пакуванню необхідної жорсткості та слугує площиною для маркування, брендуння й інформаційного оформлення. У поєднанні з внутрішньою біокомпозитною формою вона створює цілісну двокомпонентну систему, здатну надійно захищати скляну пляшку від ударів, вібрацій і стискальних навантажень. Такий формат є технологічно доцільним, екологічно орієнтованим і відповідає сучасним тенденціям заміни традиційних пакувальних вставок матеріалами біологічного походження.

Механічне формування внутрішньої вставки з міцеліального біокомпозиту здійснюється із готових висушених листів, які підлягають адаптації до об'ємної форми майбутньої упаковки. На початковому етапі листи нарізають за розмірами, що відповідають половині внутрішнього об'єму коробки для стандартної пляшки об'ємом 0,7 л. Для надання матеріалу пластичності та можливості точного повторення контуру матриці листи злегка зволожують до контрольованої вологості, яка забезпечує їх еластичність без втрати структурної цілісності.

Після підготовки листи укладають у прес-форму, яка повторює зовнішній контур пляшки, забезпечуючи рівномірний обхват та правильну геометрію внутрішньої порожнини. Пресування матеріалу може виконуватись механічним або вакуумним способом, що дозволяє щільно прилягання листа до поверхні матриці та зменшує ймовірність утворення порожнин чи зморшок. Утримання матеріалу у формі триває до завершення процесу стабілізації, під

час якого лист висихає та фіксує остаточну форму. Контроль за умовами сушіння — температурою і тривалістю — дозволяє уникнути деформацій, тріщин або ламкості матеріалу.

Після завершення сушіння внутрішній елемент витягують із матриці і, за необхідності, проводять остаточну підрізку та корекцію країв для забезпечення щільного прилягання до зовнішньої коробки. Отриманий вкладиш готовий до інтеграції у двокомпонентну упаковку, де він виконує функції амортизації, стабілізації та захисту скляної пляшки під час транспортування та зберігання. Ця технологія формування дозволяє ефективно використовувати готові листи біокомпозиту, забезпечує повторюваність форми та високі експлуатаційні характеристики внутрішньої вставки.

8.2. Специфікація обладнання

Специфікацію обладнання, зображеного на апаратурній схемі (див. *графічна частина*), наведено у табл. 8.1.

Таблиця 8.1.

Специфікація обладнання на виробництво упаковки для пляшок вина на основі міцеліального біокомпозиту

Позиція	Найменування	Кількість	Технічна характеристика
1	2	3	4
P-1	Промисловий різак для картону	1	Промисловий різак для картону YC-1625L. Максимальна швидкість розрізу – 1200 мм/с. Габарити (мм): 2500x1600 ¹
ЗВ-3	Зволожувальна камера	1	Система розпилювального зволоження. Системи для картону/паперу з форсунками. Продуктивність 50 од/хв. Габарити не наведено ²

ПМ-3	Пресувальна машина	1	Пресувальна машина ZC026. Максимальна площа пресування (мм): 860x660. Робочий тиск до 100 тон. Нагрів до 200 °С до 10 секунд. Габарити не наведено ³
Р-4	Машина для підрізки	1	Машина для підрізки НМ-QB1310. Робочий тиск до 150 тон. Продуктивність 70 од/хв. Габарити (мм): 1700x1500x2700 ⁴
ПА-5	Пакувальний апарат	1	Роботизована система «pick & place». Продуктивність 30 од/хв. Габарити не наведено ⁵
КМ-6	Картонажна машина	1	Картонажна машина КХ4540. Продуктивність 15 од/хв. Габарити (мм): 2600x1000x1000 ⁶
ФА-7	Фасувальний апарат	1	Фасувальний апарат SPCSM. D16A1. D. Продуктивність до 90 од/хв. Габарити не наведено ⁷
АП-8	Автоматизований укладальник	1	Автоматизований пакувальник ВОХТЕР 4г. Продуктивність до 6000 пляшок/год. Габарити не наведено ⁸
ПП-9	Палетопакувальник	1	Палетопакувальник FS-165. Продуктивність 20 сек/палета. Габарити (мм): 2650x1650x2400 ⁹

Примітка: 1 - <https://yuchencut.en.made-in-china.com/product/kEFpGNYusnhL/China-Yuchen-CNC-Intelligent-Flatbed-Automatic-CNC-Digital-Box-Sample-Making-Machine-Cardboard-Corrugated-Paper-Rigid-Grey-Board-Cutting-Cutter-Plotter-Carton-Maker.html>, 2 - <https://www.huataogroup.com/spray-humidifier-system/spray-humidification-system.html>, 3 - <https://www.pulpmoldingequipment.com/sale-13432015-paper-pulp-tray-forming-100-tons-hot-press-machine.html>, 4 - <http://dghongming.com/products/showproduct.php?id=393&lang=en&>, 5 - <https://www.paxiom.com/robotic-case-packing-pick-and-place-robots/>, 6 - <https://mywaymachine.en.made-in-china.com/product/KOpTbfuPJrU/China-Small-Box-Carton-Case-Erector-Machine-Horizontal-Case-Erector-Carton-Erecting-Machine.html>, 7 - <https://cnshanghaiipc.en.made-in-china.com/product/qwefWolKyAbZ/China-Case-Packing-Machine-for-Bottles-Jars-Cans.html>, 8 - <https://www.maspac.com/en/crate-packer-unpacker/>, 9 - https://tms-agro.com.ua/palietopakovochnaja-mashina--%C2%ABfs-165%C2%BB?utm_source=google&utm_campaign=packing&utm_medium=cpc&gclid=CjwKCAiAz_DIBhBJEiwAVH2XwFMVioU5SEOEUG0NgJcpN_taYg_luwIKh1WeakGHNfBkJiCT12xFaBoChbQQA_vD_BwE

8.3. Опис технологічного процесу

ТП 1. Розрізання листів біокомпозиту

Готові листи міцеліального біокомпозиту розміром 580 × 435 мм подаються на промисловий різальний агрегат (Р-1), де здійснюється їх нарізання на плоскі заготовки габаритом 104 × 104 мм. Із одного листа отримують 20 заготовок, при цьому частка технологічних відходів становить

приблизно 14 %. З урахуванням кількості продукції та відсотку обрізків загальна потреба в заготовках становить близько 4694 шт. Обрізки, зібрані після різання, автоматизовано повертаються на стадію приготування біокомпозитної пульпи (див. КП), що дозволяє мінімізувати втрати матеріалу та підвищити ресурсну ефективність виробництва. Після завершення різання заготовки конвеєром передаються на наступну операцію. Тривалість операції – 6 годин.

ТП 2. Зволоження біокомпозитних пластин

Відрізані заготовки надходять у камеру зволоження (ЗВ-2), де здійснюється рівномірне обприскування їхньої поверхні водою з обох боків. Процес відбувається у два етапи: спочатку автоматичні форсунки зволожують верхню поверхню, після чого матеріал перевертається на конвеєрі та проходить повторне обприскування. Зволоження підвищує пластичність біокомпозиту, полегшуючи його подальше формування у прес-формі без ризику розтріскування. Підготовані заготовки подаються у формувальні матриці та транспортуються до пресувальної ділянки. Тривалість операції – 1,5 години.

ТП 3. Пресування зволжених біокомпозитних пластин

Заготовки у формувальних матрицях надходять у пресувальну машину (ПМ-3), де під дією температури та тиску набувають геометрії половини внутрішньої упаковки для пляшки. Пресування здійснюється за температури 98 ± 2 °C протягом 10 секунд, що забезпечує фіксацію форми, висушування матеріалу та стабілізацію структури. Гарячий прес стискає зволожений біокомпозит, утворюючи об'ємну форму, яка слугує захисною вставкою в майбутній упаковці. Після завершення пресування деталі вивантажуються на конвеєр і передаються на наступну операцію. Тривалість операції – 13 годин.

ТП 4. Підрізка готових біокомпозитних форм

Сформовані деталі надходять до різального модуля (Р-4), де здійснюється точне обрізання країв та вирівнювання контурів. Процес необхідний для забезпечення щільного з'єднання двох половинок упаковки та коректного

розміщення їх у картонній коробці. Обрізки повертаються у цикл підготовки біокомпозитної маси, що сприяє зниженню відходів виробництва. Після підрізання деталі спрямовуються на пакувальну дільницю. Тривалість операції – 1 година.

ПМФ 5. Пакування, маркування та фасування готової продукції

ПМФ 5.1. Пакування пляшок вина у біокомпозитну упаковку

Готові половинки біокомпозитної упаковки подаються на конвеєр пакувального апарата (ПА-5). Робот-маніпулятор встановлює на конвеєр нижню половину упаковки, після чого другий робот розміщує в ній пляшку вина. Третій маніпулятор накладає верхню половину, забезпечуючи з'єднання обох елементів та повне охоплення пляшки. Закритий біокомпозитний блок передається на наступний етап. Кількість готових упакованих пляшок на цій стадії становить 2347 шт. Тривалість операції – 1 година.

ПМФ 5.2. Фасування упакованих пляшок по коробках

Упаковані пляшки надходять до фасувального автомата (ФА-7). На попередній ділянці картонажна машина (КМ-6) формує та маркує картонні коробки. Фасувальний апарат укладає кожну біокомпозитно упаковану пляшку у коробку, після чого коробка закривається: метод закривання може включати механічні засувки або нанесення клею-гарячого розплаву (hot-melt). Закриті коробки подаються на групове пакування. Тривалість операції – 10 хвилин.

ПМФ 5.3. Пакування готової продукції у групову тару

Закриті коробки надходять до автоматизованого укладальника (АП-8), який формує партії по 9 коробок у пластикові ящики. Загальна кількість сформованих ящиків — 261 шт. Сформовані ящики передаються до палетопакувальника (ПП-9), де здійснюється укладання їх на палети та обмотування поліетиленовою стрейч-плівкою. Підготовлені палети транспортуються на склад для тимчасового зберігання до моменту відвантаження.

РОЗДІЛ 9. КОНТРОЛЬ ВИРОБНИЦТВА НАПІВФАБРИКАТУ

9.1. Показники контролю готової продукції

9.1.1 Фізичні показники якості листів біокомпозиту

• *видима густина*, визначається за допомогою приладу Lorentzen & Wettre, тип 222, Швеція (ISO 534:2011) – опису методики apparent density не має у мережі у вільному доступі

• *міцність на розрив*, згідно з ISO 2758:2014 (розривний прилад Mullen, Lorentzen & Wettre, Кіста, Швеція). *Міцність на розрив (ring grain)* це максимальний тиск, що розвивається гідравлічною системою під час проштовхування еластичної діафрагми через круглу область паперу, коли тиск прикладається способом, описаним у методі. Випробувальний зразок, розміщений над круглою еластичною діафрагмою, жорстко затиснутий по периферії, але вільно випирає разом з діафрагмою. Гідравлічна рідина подається з постійною швидкістю, випираючи діафрагму до розриву випробувального зразка. Міцність на розрив випробувального зразка дорівнює максимальному значенню прикладеного гідравлічного тиску і варіюється у діапазоні від 70 кПа до 1400 кПа.

• *опір роздиранню*, визначений за допомогою тестера Elmendorf (Testing Machines, Нью-Касл, Німеччина, США, ISO 1974:2012)

Методика визначення. Початковий розріз робиться на випробувальному зразку (з чотирьох накладених один на одного листів), який потім розривається поза площиною на задану відстань вздовж однієї лінії розриву за допомогою маятника. Робота, що виконується при розриві випробувального зразка, вимірюється як втрата енергії маятника. Середня сила розриву одного листа розраховується шляхом ділення виконаної роботи на відстань розриву та кількість листів у випробувальному зразку.

Зразок повинен бути без складок, заломів або інших видимих дефектів у

					НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 9. КОНТРОЛЬ ВИРОБНИЦТВА НАПІВФАБРИКАТУ	Літ.	Арк.	Аркушів
<i>Розроб.</i>		<i>Мезінова І.Р.</i>					106	143
<i>Керівник</i>		<i>Красінько В.О.</i>				106		
<i>Реценз.</i>						<i>Кафедра БТМ</i>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>		<i>Стабніков В.П.</i>						

ділянці, з якої вирізано випробувальний зразок, і випробувальний зразок не повинен містити жодної частини зразка, що знаходиться на відстані менше 15 мм від краю листа або катушки. Якщо є водяні знаки, це має бути зазначено у звіті про випробування. Визначають дві сторони зразка зручним способом, наприклад, сторону один і сторону два, і однією стороною догори. Зі зразка вирізають чотири прямокутні аркуші однакового розміру. Ширина кожного аркуша повинна бути (50 ± 2) мм або (76 ± 2) мм (залежно від розміру затискачів, 25 мм або 36 мм). Краї кожного листа повинні бути паралельні бажаному напрямку випробування та мати таку довжину, щоб після початкового розрізу, зробленого або як частина підготовки зразка для випробування, або за допомогою вбудованого ножа (5.1.5), нерозривна довжина становила $(43,0 \pm 0,5)$ мм. Довжина листа дорівнює сумі глибини затискання, початкової довжини розрізу та нерозривної довжини. Збирають розрізані листи в комплекти по чотири штуки, однаковою стороною зверху, щоб сформувати зразки для випробування. Або ж розташуйте чотири листи зразка так, щоб їхні машинні напрямки були паралельні, а однакові сторони були спрямовані в один бік, і одночасно розріжте зразок для випробування, як описано вище. Нерозривна довжина повинна бути такою, як зазначено вище. Краї листів, що складають зразок для випробування, повинні бути вільними та не злиплими. Вирізають достатню кількість зразків для випробування, щоб отримати щонайменше 10 достовірних показників у кожному необхідному головному напрямку (тобто загалом щонайменше 40 листів у кожному напрямку). ПРИМІТКА. Видимий опір розриванню залежить від кількості листів, розірваних одночасно. Для деяких видів паперу різниця в видимій стійкості до розриву при одночасному розриві одного та чотирьох аркушів може перевищувати 20%.

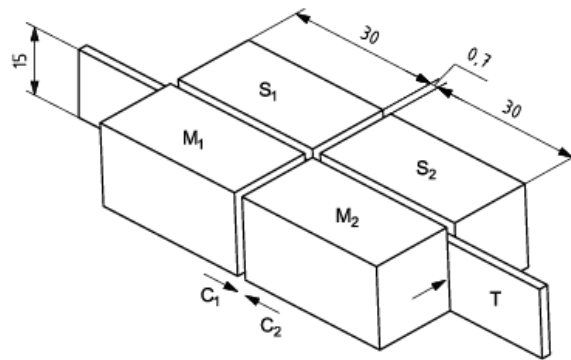
Вибирають відповідний маятник або комбінацію маятника/допоміжної маси таким чином, щоб середні показники знаходилися в діапазоні від 20% до 80% від максимального показника шкали. Окремі показники, отримані поза цими межами, повинні бути зазначені у звіті про випробування. Піднімають

маятник у початкове положення та закріплюють його за допомогою механізму спуску маятника. Розміщують випробувальний зразок (що складається з чотирьох листів) у затискачах. Якщо проріз зроблено заздалегідь, його слід розташувати по центру між затискачем на рамі та затискачем на маятнику. Затягують затискачі. Встановлюють покажчик, якщо він є, до упору. Різко натискають на механізм спуску маятника та утримують його натиснутим. Обережно беруть маятник рукою під час його зворотного коливання, не порушуючи положення покажчика, якщо він є. Записують отримане значення як опір розриву або показник шкали. Повертають маятник та, якщо він є, покажчик у початкове положення та видалить розірваний папір. Повторюють цю процедуру для інших дев'яти випробувальних зразків, орієнтуючи їх так, щоб одна сторона була спрямована по черзі до маятника та від нього. Перевіряють, чи повністю розірвані випробувальні зразки. Шлях розриву може відхилитися від напрямку розрізу. Якщо відхилення перевищує 10 мм в одному або двох з 10 випробувань, відхиляють ці показники та проводять подальші випробування, щоб довести кількість задовільних показників до 10. Якщо в більш ніж двох випробувальних зразках відхилення перевищує 10 мм, включають результати та зазначають цей факт у звіті про випробування. Якщо замість розриву звичайним способом листи будь-якого випробувального зразка відшаровуються, оголюючи широку смугу розірваної поверхні (ефект, відомий як «шкірка»), застосовуйте критерії попереднього абзацу до середньої центральної лінії розірваної смуги через випробувальні зразки.

Якщо опір розриву зразка або наявного маятника чи комбінації маятника/допоміжної маси такий, що задовільних результатів неможливо отримати, використовуючи випробувальний зразок, що складається з чотирьох листів, випробування можна проводити з використанням більшої або меншої кількості листів. Чітко вказують це відхилення у звіті про випробування. Якщо листи скручуються, переконайтеся, що вони нахилиються до маятника, а не від нього, обережно згинаючи їх у затискачі. При цьому слід уникати впливу на вміст вологи у випробувальних ділянках.

• *індекс міцності на стиснення SCT* (індекс SCT), виміряний за допомогою обладнання Haida International Equipment Co., Ltd., Дунгуань, Китай (ISO 9895:2008);

Методика визначення . Компресійний тестер з двома затискачами (див. рисунок 3.1) для утримання випробувального зразка шириною 15 мм. Кожен затискач включає нерухому затискну щелепу (S1, S2) та рухому затискну щелепу (M1, M2). Затискачі (C1 та C2) повинні мати довжину 30 мм та поверхню з високим коефіцієнтом тертя. Затискачі повинні бути здатні утримувати випробувальний зразок (T) у положенні з постійною силою затиску 2300 ± 500 Н. Затискачі повинні бути сконструйовані таким чином, щоб вони міцно захоплювали випробувальний зразок по всій його ширині. Нерухомі затискні поверхні повинні знаходитися в одній площині та з одного боку випробувального зразка. Затискають поверхні рухомих затискачів повинні знаходитися в одній площині та паралельно до поверхонь нерухомих затискачів. На початку випробування вільний проміжок між затискачами повинен становити $0,70 \text{ мм} \pm 0,05 \text{ мм}$. Після початку випробування затискачі повинні рухатися один до одного зі швидкістю $3 \text{ мм/хв} \pm 1 \text{ мм/хв}$. Вимірювальний прилад повинен мати систему вимірювання та відображення, щоб максимальне зусилля стиску можна було визначити з похибкою менше ніж $\pm 1 \%$ від показань, коли воно знаходиться в межах від 10 % до 100 % від повного діапазону шкали. Вимірювальний прилад повинен бути сконструйований таким чином, щоб можна було підключити пристрій для калібрування тензодатчика з використанням гир відомої маси. Як альтернатива, можна використовувати калібровані тензодатчики. Вимірювальний прилад повинен мати пристрій, що показує зусилля затискання, що створюється губками, виражене в ньютонах.



Key	
C ₁ and C ₂	clamps
M ₁ and M ₂	movable jaws
S ₁ and S ₂	stationary jaws
T	test piece

Рис. 9.1. Схематичне зображення компресійного тестеру з двома затискачами (ISO 9895:2008)

З непошкоджених ділянок зразка вирізають випробувальні зразки у вигляді смужок довжиною не менше 70 мм та шириною 15 мм ± 0,1 мм. Вирізають випробувальні зразки довшою стороною паралельно машинному напрямку, щоб визначити міцність на стиск у машинному напрямку. Вирізають випробувальні зразки довшою стороною паралельно поперечному напрямку, щоб визначити міцність на стиск у поперечному напрямку. Вирізають достатню кількість випробувальних зразків, щоб провести щонайменше 20 визначень у кожному необхідному напрямку. Це випробування, як і всі інші випробування, що залежать від опору стиску, дуже чутливе до зміни вмісту води у випробувальному зразку. Тримайте випробувальні зразки подалі від води, тепла, прямого освітлення, повітря, що видихається, та інших умов, які можуть змінити їх вміст води. Переконайтеся, що затискачі не піддаються впливу тепла від ламп, двигунів тощо. Міцність на стиск вимірюється на невеликій ділянці розміром 0,7 мм × 15 мм. Щоб мінімізувати вплив локальних варіацій у папері, рекомендується провести щонайменше 20 визначень.

• *випробування на індекс розтягу та видовження*, проведуть за допомогою випробувальної машини на розтяг INSTRON, модель 5564 (Хай-Віком, Велика Британія, ISO 1924-2:2008)

Методика визначення. Зі зразків непошкодженого листка вирізають зразки для випробування шириною ($15 \pm 0,1$) мм та довжиною, достатньою для затискання в затискачах. Випробувальна довжина, тобто відстань між лініями затискання, становить (180 ± 1) мм. Довгі краї зразків для випробування повинні бути прямими, паралельними з точністю до $\pm 0,1$ мм по загальній довжині затискання, чисто вирізаними та непошкодженими. Вирізають достатню кількість зразків для випробування, щоб можна було провести щонайменше десять випробувань у кожному напрямку, що цікавить (напрямок машини, поперечний напрямок).

Відрегулюють затискачі на необхідну початкову випробувальну довжину та поміщають випробувальний зразок у затискачі, переконавшись, що випробувальна область між лініями затискання не торкається голими руками. Під час роботи з випробувальними зразками рекомендується використовувати одноразові або легкі бавовняні рукавички. Вирівнюють та щільно затискають випробувальний зразок так, щоб усунути будь-який помітний провис, але на випробувальний зразок не чинилося значного навантаження. Необхідно переконатися, що випробувальний зразок затиснутий таким чином, щоб він був паралельний напрямку прикладання сили розтягу. Розпочинають випробування та продовжують його, доки випробувальний зразок не розірветься. Записують максимальну дію сили розтягу та, за потреби, записують або видовження в міліметрах, або, для приладів з прямим зчитуванням, деформацію при розриві у відсотках. Випробують щонайменше десять зразків у кожному напрямку, щоб отримати десять достовірних результатів у кожному напрямку, що цікавить. Відхиляють усі показники зразків, які ламаються в межах 10 мм від лінії затискання.

• *жорсткість на згин*, виміряна двоточковим методом згідно з ISO 5628:2019 (TMI Testing Machines Inc., Нью-Касл, Німеччина, США); – опису методики *bending stiffness* не має у мережі у вільному доступі

• *повітропроникність*, виміряна за допомогою тестера Бендтсена виробництва TMI Testing Machines Inc., США (ISO 5636-3:2013);

Методика визначення. Випробувальний зразок затискають між круглою прокладкою та кільцевою плоскою поверхнею відомих розмірів. Абсолютний тиск повітря з одного боку випробувальної зони випробувального зразка еквівалентний атмосферному тиску, а різниця тисків між двома сторонами випробувального зразка підтримується на невеликому, практично постійному значенні протягом випробування. Визначення потоку повітря через випробувальну зону за заданий час.

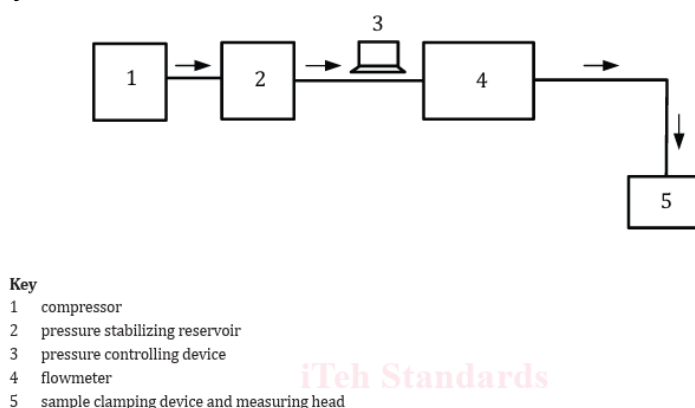


Рис 9.2. Схематичне зображення установки для визначення повітропроникності (ISO 5636-3:2013)

1. Компресор, що генерує повітря під тиском близько 127 кПа. За необхідності мають бути передбачені фільтри для забезпечення чистоти повітря та відсутності олії.

2. Резервуар для стабілізації тиску, об'ємом близько 10 літрів, встановлений між компресором та пристроєм регулювання тиску, або інші засоби забезпечення стабільного потоку повітря. ПРИМІТКА. Резервуар для стабілізації тиску зазвичай не постачається з апаратом. Його забезпечення або інші засоби забезпечення стабільного потоку повітря є відповідальністю користувача.

3. Пристрій регулювання тиску для контролю тиску повітря на вході витратоміра. Він повинен складатися з маностатної вантажу, регулятора тиску або інших засобів створення стабільного номінального тиску повітря ($1,47 \pm 0,02$) кПа, виміряного на маностаті. ПРИМІТКА Більшість апаратів Бендтсена

постачаються з трьома змінними маностатними вантажами, але лише маностат на 1,47 кПа відповідає вимогам цієї частини ISO 5636.

4. Витратоміри зі змінною площею для вимірювання швидкості потоку в таких діапазонах: від 5 мл/хв до 150 мл/хв, від 50 мл/хв до 500 мл/хв та від 300 мл/хв до 3000 мл/хв. Роздільна здатність цих витратомірів зі змінною площею повинна становити 2 мл/хв, 5 мл/хв та 20 мл/хв відповідно. Витратомір зі змінною площею може бути замінений електронним витратоміром повітря з діапазоном вимірювання, придатним для вимірюваного матеріалу, що дозволяє визначати витрату повітря з похибкою менше ± 5 мл/хв або ± 5 %, залежно від того, що більше. На деяких апаратах доступні діапазони вимірювання становлять від 0 до 300 мл/хв та від 300 мл/хв до 3000 мл/хв. Роздільна здатність цих витратомірів зі змінною площею повинна становити 1 % від шкали максимального зчитування.

5. Вимірювальна головка, що складається з пристрою, в якому випробуваний зразок затиснутий між кільцевою плоскою поверхнею та круглою гумовою прокладкою. Кільцеве кільце та прокладка повинні мати такі розміри, щоб випробувальна площа випробуваного зразка, обмежена будь-яким з них, становила (1000 ± 20) мм². Трубка, що використовується для з'єднання головки з витратоміром, повинна бути виготовлена з гуми або пластику, з внутрішнім діаметром $(7,0 \pm 0,5)$ мм та довжиною (690 ± 10) мм.

Підготовка зразка: Вирізають не менше 10 випробувальних зразків та позначте їхні дві сторони, наприклад, сторону 1 та сторону 2. Випробувальна ділянка повинна бути без складок, зморшок, отворів, водяних слідів або дефектів, не властивих зразку. Достатній розмір випробувального зразка становить 100 мм x 100 мм. Якщо повітропроникність, виміряна з двох сторін, суттєво відрізняється, і якщо цю різницю потрібно показати у звіті про випробування, для кожної сторони потрібно провести 10 випробувань.

Випробують щонайменше 10 зразків, п'ять зі стороною 1 вгору та п'ять зі стороною 1 вниз. За потреби оберають витратомір зі змінною площею, який дає показання більше 20 % діапазону шкали з тиском 1,47 кПа. Не слід

використовувати потоки повітря понад 1200 мл/хв, оскільки за високих потоків повітря перепад тиску між витратоміром та вимірювальною голівкою значно знижує тиск у вимірювальній голівці. Перевіряють, чи показання потоку повітря, отримані з непористою пластиною, затиснутою у вимірювальному зазорі, дорівнюють нулю. Поміщають випробувальний зразок у вимірювальний зазор та записують показання витратоміра зі змінною площею щонайменше через 5 с після затискання, у мл/хв, з точністю показань, зазначеною в 5.4. Повторюють для решти зразків. Усі види паперу певною мірою чутливі до вологи, і показники слід знімати в початковій точці стабілізації, щоб уникнути будь-якого можливого впливу вологи, що надходить, на випробовуваний зразок або на його видалення з нього.

Обчислюють повітропроникність P у мікрометрах за паскаль-секунду з точністю до трьох значущих цифр за рівнянням:

$$P = 0,0113 \times q$$

де q – середня швидкість потоку повітря у мілілітрах за хвилину, що проходить через випробувальну площу 1000 мм^2 при відповідному тиску $1,47 \text{ кПа}$ у вимірювальній голівці.

За потреби обчислюють середню повітропроникність для кожної сторони окремо. Якщо середні значення для двох сторін суттєво відрізняються (більше ніж на 10 %), для кожної сторони потрібно 10 випробувань.

• *кути контакту*, виміряні за допомогою гоніометра PGX (TMI Testing Machines, США) згідно зі стандартним методом TAPPI T 458.

З кожної тестової одиниці зразка вирізають десять чистих смужок зразка розміром $100 \pm 1 \times 15 \pm 0,1 \text{ мм}$, без складок, зморшок, плям, водяних плям та інших дефектів, які зазвичай не властиві паперу, так, щоб вони були репрезентативними для тестової одиниці.

Методика визначення. Поміщають тестову смужку на предметне скло на випробувальному столі. Тісно закріплюють її на поверхні предметного скло за допомогою невеликих вантажів або затискачів, розміщених достатньо близько з кожного боку шприца, розташованого над предметним скло, щоб запобігти

деформації паперу, коли він змочується краплею. Або ж можна використати двосторонню самоклеючу стрічку, щоб закріпити тестову смужку на предметному склі. Розміщують кінчик голки для підшкірного введення на відстані 2,5 мм від поверхні смужки та капають краплю води на папір. Як тільки мине заданий час контакту краплі з папером, швидко визначають обидва кути контакту (ліва та права сторони зображення краплі). Внутрішні кути (С) між базовою лінією краплі та двома дотичними до кривої у двох точках контакту з базовою лінією позначаються кутами контакту. Для початкової змочуваності, яка використовується як міра якості лінійки, вимірюють кути після того, як крапля контактувала з папером протягом 5 секунд. Для швидкості зміни змочуваності, яка використовується як міра якості письма, роблять додатковий набір вимірювань через 60 секунд. Під час випробування вимикайте лампу, коли вона не потрібна, щоб уникнути нагрівання зразка більше, ніж це необхідно. Випробують п'ять смужок зразка з одного боку та п'ять з іншого. Проведуть випробування на незволожених ділянках.

Для кожної сторони визначають середню швидкість зміни змочуваності в градусах за секунду наступним чином:

$$R = C - C' / 55$$

де

R = швидкість зміни кута змочування

C = середній кут контакту через 5 с

C' = середній кут контакту через 60 с

9.2. Методи контролю упаковки для пляшок вина на основі міцеліального біокомпозиту

Контроль якості упаковки з міцеліального біокомпозиту здійснюється відповідно до вимог технічних умов та національних/міжнародних стандартів на пакувальні матеріали з формованих волокнистих мас (аналогічні до стандартів на лите формоване пакування з пульпи). Перевірка проводиться для кожної партії сформованих половинок упаковки та готових одиниць тари.

1. Контроль зовнішнього вигляду

Мета: виявлення дефектів, що можуть вплинути на міцність або геометрію.

Методика: огляд проводять при природному або штучному освітленні 300–600 лк. Візуально перевіряють цілісність, відсутність тріщин, розривів, сторонніх включень, непресованих ділянок, обвуглення чи набрякання. Оцінюють рівномірність кольору та структури.

Допускаються незначні текстурні неоднорідності, що не впливають на функціональність; тріщини, наскрізні отвори, відшарування — не допускаються.

2. Перевірка геометричних розмірів

Мета: забезпечення відповідності форми пляшки та стабільності пакування.

Методика: вимірювання проводять штангенциркулем з точністю 0,1 мм або 3D-сканером. Контролюють довжину, ширину, висоту, товщину стінки, діаметр посадкового місця під горлечко, глибину ложе. Для кожної партії вимірюють не менше 10 одиниць.

Допуски: лінійні розміри $\pm 1,0$ мм; товщина стінки $\pm 0,3$ мм; відхилення симетрії не більше 2 мм.

3. Визначення маси однієї половини упаковки

Мета: контроль стабільності формування та щільності матеріалу.

Методика: зважування на лабораторних вагах (точність 0,01 г). Відбирають 20 одиниць з партії.

Відхилення не більше $\pm 5\%$ від номіналу.

4. Випробування на стиск (механічна міцність) (ДСТУ 7305:2013, https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=59397)

Мета: оцінити здатність біокомпозиту захищати скляну пляшку від механічних ударів та навантажень.

Методика: випробування проводять на прес-машині. Частину упаковки розташовують між плитами преса; навантаження прикладають зі швидкістю 10 мм/хв. Фіксують максимальне навантаження до деформації 10 %.

Мінімальна міцність на стиск — не менше 60–80 Н (або значення, отримане експериментально для вашого матеріалу).

5. Ударостійкість (поглинання енергії) (<https://ua.electronicensilemachine.com/info/how-is-the-charpy-impact-test-conducted-17192022713361408.html>)

Мета: перевірити, чи поглинає упаковка удар при транспортуванні.

Методика: використовується випробування на падіння вантажу (drop-weight test). На упаковану пляшку (у двох половинках) скидають вантаж масою 0,5–1,0 кг із висоти 100 мм. Оцінюють наявність тріщин на упаковці та ці Integrity скляної тари.

Пляшка не повинна пошкоджуватися; упаковка — без наскрізних дефектів.

6. Вологовбирання та стійкість до вологи (ДСТУ Б В.2.6-70:2008, https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY_ALL/DSYU1/dstu_b_v.2.6-70-2008.pdf)

Мета: оцінити, чи зберігає упаковка форму при впливі підвищеної вологості.

Методика: зразки витримують 24 год при відносній вологості $75\pm 5\%$ і температурі 23 ± 2 °С. Після кондиціонування оцінюють: зміни маси (%), деформацію, зміну міцності на стиск.

Приріст маси $\leq 10\%$; деформація $< 3\%$; зниження міцності $\leq 20\%$.

7. Теплостійкість (стійкість до 40–50 °С) (ДСТУ Б В.2.6-100:2010, https://ksv.do.am/GOST/DSTY_ALL/DSYU1/dstu_b_v.2.6-100-2010.pdf)

Мета: визначити поведінку матеріалу при зберіганні в теплих умовах.

Методика: зразки витримують 2 год при 50 °С у сушильній шафі.

Перевіряють усадку, деформацію та тріщини.

Відсутність структурних пошкоджень; усадка $\leq 2\%$.

8. Оцінка шорсткості та рівності поверхні (ДСТУ 2413-94, https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=92004)

Мета: забезпечити правильне з'єднання половинок упаковки та рівномірність контакту з пляшкою.

Методика: вимірювання поверхневої шорсткості профілометром або візуально-еталонним методом.

$R_a \leq 50\text{--}80$ мкм (для термопресованих біокомпозитів).

9. Контроль з'єднання двох половинок упаковки

Мета: перевірка герметичності та стабільності фіксації пляшки між половинками.

Методика: після механічного стиснення (роботом) оцінюють ступінь зчеплення. Пляшка не повинна зміщуватися у вертикальній чи горизонтальній площині. Зусилля роз'єднання вимірюють динамометром (норма — не менше 15Н) (https://microtech-ua.com/index.php?id_product=15519&controller=product&id_lang=3).

10. Контроль запаху та хімічної інертності

Мета: запобігти перенесенню запахів на винну продукцію.

Методика: запакована пляшка витримується 24 год у закритій тарі. Органолептичний контроль запаху упаковки та перевірка відсутності запаху в зоні пляшки.

Сторонні запахи не допускаються.

Узагальнені дані методів контролю упаковки

Показник	Мета контролю	Методика виконання	Обладнання	Норма Допуски /
Зовнішній вигляд	Виявлення дефектів формування	Візуальний огляд при 300–600 лк	Робоче освітлення, оглядовий стіл	Тріщини, розриви, відшарування — не допускаються
Геометричні розміри	Перевірка відповідності пляшці та коробці	Вимірювання у 3–5 точках	Штангенциркуль 0,1 мм або 3D-сканер	Лінійні розміри $\pm 1,0$ мм; товщина $\pm 0,3$ мм
Маса однієї половини	Контроль рівномірності щільності	Зважування 20 одиниць	Ваги лабораторні (0,01 г)	Норма 28–32 г; відхилення $\leq \pm 5\%$
Міцність на стиск	Перевірка стійкості до навантаження	Зразок стискають зі швидкістю 10 мм/хв до деформації 10 %	Прес-машина універсальна	$\geq 60\text{--}80$ Н (або за експериментальним значенням)
Ударостійкість	Перевірка поглинання енергії	Тест падіння вантажу 0,5–1,0 кг з висоти 100 мм	Прилад drop-weight або лабораторний стенд	Пляшка ціла, тріщини в упаковці — не допускаються
Вологовбирання	Стійкість до вологості при зберіганні	24 год при $75\pm 5\%$ RH, 23 ± 2 °C; вимір маси й деформації	Камера кліматична, ваги	Приріст маси $\leq 10\%$, деформація $\leq 3\%$
Теплостійкість	Поведінка при 40–50 °C	2 год у сушильній шафі	Шафа сушильна	Усадка $\leq 2\%$, без тріщин
Шорсткість поверхні	Забезпечення щільного з'єднання половинок	Вимір поверхневої шорсткості	Профілометр або еталони шорсткості	$R_a \leq 50\text{--}80$ мкм
Якість з'єднання половинок	Оцінка фіксації пляшки	Вимір зусилля роз'єднання та стабільності фіксації	Динамометр, стенд для складання	Зусилля з'єднання ≥ 15 Н; без зміщення пляшки
Органолептичний контроль запаху	Перевірка хімічної інертності	Витримування запакованої пляшки 24 год у закритій тарі	Контейнер, еталонні носії	Сторонні запахи не допускаються

РОЗДІЛ 10. СКЛАДАННЯ ПАТЕНТНОЇ ЗАЯВКИ

10.1. Галузь і застосування корисної моделі

Корисна модель належить до галузі промислової біотехнології та виготовлення композиційних матеріалів на основі грибного міцелію. Запропонований спосіб застосовується у виробництві екологічних пакувальних елементів для захисту винної склотари від механічних пошкоджень під час транспортування та зберігання. Матеріал, отриманий на основі біомаси *C. cladosporioides* (Gutarowska et al., 2024) та деревної пульпи, поєднує властивості амортизації, невисоку масу та повну біорозкладність.

Завдяки можливості формування матеріалу як у вигляді плоских структур (листів), так і у вигляді тривимірних профільованих форм (вкладишів для пляшок), технологія може бути адаптована до виробництва тари для вина, міцних напоїв, косметичної продукції або лабораторного скла. Процес не потребує синтетичних полімерів чи токсичних реагентів, що робить його корисним для підприємств з екологічною орієнтацією.

10.2. Відомі аналоги та їх основні недоліки (розширена версія)

1. Синтетичні пакувальні матеріали (полістирол, поліетилен, пінополіуретан)

Це найпоширеніша група аналогів, що застосовується для захисту пляшок (Tajeddin, & Arabkhedri, 2020).

Переваги:

- висока амортизаційна здатність і стійкість до ударів;
- низька маса;
- технологічна простота виготовлення у будь-які форми методом лиття або спінення.

					НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Мезінова І.Р.			РОЗДІЛ 10. СКЛАДАННЯ ПАТЕНТНОЇ ЗАЯВКИ	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Красінько В.О.					120	143
Реценз.						120		
Н. Контр.						Кафедра БТМ		
Затверд.		Стабніков В.П.						

Недоліки:

- відсутність біорозкладності: полімери розкладаються сотні років, утворюють мікропластик;
- значний екологічний слід виробництва (енергоємність, нафтохімічна сировина);
- проблемність переробки після використання, особливо у випадку багатокомпонентних полімерів;
- не підходять для підприємств, що переходять до концепції «зеленої упаковки».

У контексті сталого розвитку ця група аналогів фактично вважається застарілою.

2. Міцеліальні композити на основі базидіальних грибів

Промислові компанії (Ecovative, Mogu, MycoWorks) використовують біомасу *Pleurotus ostreatus*, *Ganoderma lucidum*, *Fomes fomentarius*, *Trametes versicolor* (Barta, Simion, Tiuc, & Vasile, 2024).

Переваги:

- повна біорозкладність;
- можливість формування твердих елементів без полімерних зв'язувальних речовин;
- біобезпечність субстратів;
- широка варіативність форм, отриманих методом прямого вирощування у матриці.

Недоліки:

- тривале твердофазне культивування (10–14 днів), що ускладнює масштабування;
- необхідність забезпечення стерильних умов у великих об'ємах субстрату, що підвищує собівартість;
- залежність структури композиту від стабільності росту гіф в об'ємі матриці;

- ризик контамінації через довгу тривалість росту;
- нерівномірність товщини та щільності матеріалу у великих виробках.

Такі аналоги добре підходять для декоративних виробів, проте менш ефективні для високоточних пакувальних елементів, де потрібна жорстка стандартизація.

3. Целюлозні прес-форми (формований папір) (Semple, Zhou, Rojas, Nkeuwa, & Dai, 2022)

Використовуються для виготовлення лотків для яєць, кутових захисних вкладок для електроніки.

Переваги:

- легкодоступна сировина (макулатура, картон, целюлоза);
- нижча собівартість порівняно з пластиками;
- часткова біорозкладність та можливість вторинної переробки.

Недоліки:

•недостатня жорсткість та ударостійкість без додаткових хімічних добавок;

- схильність до деформацій при зволоженні;
- значне споживання води під час формування;
- менший ступінь амортизації порівняно з міцеліальними композитами.

У випадку захисту винної тари прес-папір часто не забезпечує необхідного рівня ударопоглинання.

4. Біокомпозити на основі бактеріальної целюлози (Sumini et al., 2025)

Відомі рішення використовують *Komagataeibacter xylinus* для утворення еластичних целюлозних структур.

Переваги:

- висока міцність волокон бактеріальної целюлози;
- рівномірність структури;
- біосумісність і повна біорозкладність.

Недоліки:

- надзвичайно висока собівартість;
- низька продуктивність (3–10 г/л), що обмежує промислове застосування;
- складність масштабування ферментації.

Для пакувальної індустрії матеріал є економічно недоцільним.

Жоден із наведених аналогів не поєднує одночасно:

- швидке глибоке нарощування біомаси (3–5 діб),
- однорідність структури композиту,
- низьку собівартість,
- простоту змішування з целюлозною пульпою,
- можливість формування як листів, так і об'ємних форм.

Саме тому використання *Cladosporium cladosporioides* як продуцента для біокомпозиту усуває ключові технологічні недоліки відомих рішень.

10.3. Постановка задачі корисної моделі та її вирішення

Проблемою, яку мають вирішити, є створення біорозкладного пакувального матеріалу для винної тари, що:

- має захищати пляшку від ударів і вібрацій;
- придатний для промислового масштабування;
- не потребує довготривалого вирощування у матриці;
- може виготовлятися у стандартизованих листах або пресованих 3D-формах;
- має низьку вартість виробництва;
- відповідає екологічним вимогам.

Розв'язання задачі досягається шляхом застосування біомаси *S. cladosporioides*, отриманої у глибокому культивуванні, яка після фільтрації, сушіння та змішування з деревною пульпою формує біокомпозит з високою однорідністю структури і достатньою механічною міцністю. Спосіб виключає необхідність прямого вирощування міцелію у формі, що скорочує час виробництва і підвищує технологічну стабільність.

10.4. Опис запропонованого способу

Усі технологічні стадії описані відповідно до технологічних операцій, наведених у файлі курсової.

1. Культивування продуцента

C. cladosporioides вирощують у глибокому процесі до досягнення біомаси $\approx 23,7$ г/л.

2. Термічна інактивація культуральної рідини

Культуру нагрівають до 60 °С протягом 30 хв, що дозволяє зупинити метаболізм гриба та полегшує подальше відокремлення.

3. Фільтраційне відділення біомаси

Суспензію подають на барабанний вакуум-фільтр, де відбувається видалення культуральної рідини й отримання вологого міцелію.

4. Сушіння міцелію

Отриману біомасу сушать при 105 °С протягом 7 год до вологості близько 5 %.

5. Підготовка деревної пульпи

Крафт-целюлозу замочують, диспергують і доводять до необхідної консистенції.

6. Змішування з міцеліальною біомасою

Сухий міцелій і пульпу змішують у міксері-гомогенізаторі при 5800 об/хв у масовому співвідношенні 1:5.

7. Формування матеріалу

Композитна маса подається у формувальну машину Rapid-Köthen для створення листів або в прес-форми для тривимірних елементів.

8. Пресування та сушіння

Листи або об'ємні елементи пресують і висушують при 98 °С, вакуум 93 кПа протягом 6 хв. Результат — жорстка, рівномірна та легка біокомпозитна структура, придатна для пакування винної пляшки.

10.5. Формула корисної моделі

Спосіб отримання біокомпозитного пакувального матеріалу на основі грибного міцелію *Cladosporium cladosporioides*, який включає культивування продуцента, термічну інактивацію, фільтраційне відділення біомаси, сушіння, змішування з деревною пульпою та формування пакувальних елементів, який відрізняється тим, що як наповнювач використовують м'яку деревну крафт-целюлозу у масовому співвідношенні 5:1 відносно сухої біомаси міцелію, а формування здійснюють у листи або тривимірні конструкції з подальшим пресуванням та сушінням при 98 °С і вакуумі 93 кПа.

10.6. Реферат

Корисна модель стосується отримання біорозкладного пакувального матеріалу на основі біомаси *C.cladosporioides* та деревної крафт-целюлози. Спосіб включає глибоке культивування продуцента, термічну інактивацію культуральної рідини, фільтраційне відділення та сушіння міцелію. Суху біомасу змішують із підготовленою деревною пульпою у співвідношенні 1:5, формують у листи або тривимірні конструкції, пресують і висушують до стабільного стану. Отриманий матеріал є механічно міцним, легким та повністю біорозкладним, що дозволяє використовувати його як екологічну альтернативу синтетичним пакувальним елементам для захисту винної тари. Спосіб забезпечує скорочення термінів виробництва, зниження собівартості та можливість масштабування.

ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було проведено аналіз наукової літератури на тему «Біотехнологія композитних матеріалів з використанням міцеліальних грибів».

Досліджено виробництво мікокомпозиту на основі міцелію *Cladosporium cladosporioides*, який синтезує 23,7 г/л біомаси протягом 120 год.

Проаналізована технологія виробництва міцелію, яка включає технологічний процес: (виділення і очищення біомаси; приготування целюлозної матриці; створення готового продукту), та розподіл втрат по стадіях і підбір необхідного обладнання та особливості технології виробництва готової продукції, в ході чого було зазначено, що для пакування стандартної винної пляшки об'ємом 0,7 л доцільним було обрано формовану жорстку оболонку з міцеліального біокомпозиту типу «clamshell» тощо.

А також методики контролю виробництва готової продукції (напівфабрикату), що включає фізичні показники якості листів біокомпозиту, а саме видима густина, міцність на розрив, опір роздиранню, індекс міцності на стиснення SCT, жорсткість на згин, повітропроникність, кути контакту, а також готової продукції: контроль зовнішнього вигляду, перевірка геометричних розмірів, визначення маси однієї половини упаковки, випробування на стиск (механічна міцність), ударостійкість (поглинання енергії), вологовбирання та стійкість до вологи, теплостійкість, оцінка шорсткості та рівності поверхні, контроль з'єднання двох половинок упаковки, контроль запаху та хімічної інертності.

Важливим результатом роботи стало складання повноцінної патентної заявки, у якій сформульовано технічну задачу, наведено аналіз аналогів, описано спосіб отримання біокомпозитного матеріалу та сформовано його

					НУХТ БТЕК 02.01.08 КР ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
<i>Розроб.</i>		<i>Мезінова І.Р.</i>			ВИСНОВКИ	Літ.	Арк.	Аркушів
<i>Керівник</i>		<i>Красінько В.О.</i>					126	143
<i>Реценз.</i>						126		
<i>Н. Контр.</i>						<i>Кафедра БТМ</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Стабніков В.П.</i>						

захисну формулу. Запропонований спосіб відповідає принципам сталого виробництва, забезпечує можливість виготовлення пакувальних елементів для винної склотари та має потенціал для подальшої комерціалізації.

У цілому результати роботи свідчать про перспективність міцеліальних біокомпозитів як екологічної альтернативи традиційним полімерним пакувальним матеріалам та демонструють актуальність впровадження таких технологій у промислову практику.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

Ващенко О.В., Міхедькіна О.Й. Методичні вказівки до лабораторних робіт з технічної мікробіології для студентів напрямку підготовки 6091501 «Харчові технології та інженерія» / Уклад. О.В. Ващенко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. –72 с.

Виробництво пакетів і упаковки в Україні. [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://www.mpak.ua/produksiya/izgotovlenie-paketov-s-logotipom/biorazlagaemye-pakety/>

Загартовані під час війни. Що таке Wines of Ukraine та як розвиваються крафтові вина України сьогодні. [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://nv.ua/ukr/food/eat/shcho-take-wines-of-ukraine-diyalnist-spivpracya-z-mizhnarodnimi-partnerami-ta-populyarizaciya-vina-50400320.html>

Поводзинський В.М. ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ. Конспект лекцій для студентів спеціальності 6.092900 та 7.092901 “Промислова біотехнологія” напряму 0929 “Біотехнологія” денної та заочної форм навчання. СХВАЛЕНО на засіданні кафедри біотехнологій мікробного синтезу Протокол № 4 від 24.10.06 р.

Решотько, Л. М., & Волкова, І. В. (2022). ВПЛИВ МЕТАБОЛІТІВ *CLADOSPORIUM CLADOSPORIOIDES* НА ПЕРЕБІГ ВІРУСНОЇ ІНФЕКЦІЇ В РОСЛИНАХ КАРТОПЛІ ЗА УМОВ ПРИРОДНОГО ТА ШТУЧНОГО ІНФІКУВАННЯ ФІТОВІРУСАМИ. *Сільськогосподарська мікробіологія*, 36, 64-71. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.36.64-71>

Abhijith R., Ashok A., Rejeesh C.R. (2018) Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: a review. *Materials Today: Proceedings Volume 5, Issue 1, Part 2, , P. 2139-2145.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.211>

Aiduang W., Chanthaluck A., Kumla J., Jatuwong K., Srinuanpan S., Waroonkun T., Oranratmanee R., Lumyong S., Suwannarach N. Amazing Fungi for Eco-Friendly Composite Materials: A Comprehensive Review. *Review J Fungi (Basel)*. 2022, 8(8):842. doi: 10.3390/jof8080842.

Aiduang W., Jatuwong K., Jinanukul P., Suwannarach N., Kumla J., Thamjaree W., Teeraphantuvat T., Waroonkun T., Oranratmanee R., Lumyong S. Sustainable Innovation: Fabrication and Characterization of Mycelium-Based Green Composites for Modern Interior Materials Using Agro-Industrial Wastes and Different Species of Fungi. *Polymers* 2024, 16(4), 550; <https://doi.org/10.3390/polym16040550>.

Alaneme K. K., Anaele J. U., Oke T. M., Kareem S. A., Adediran M., Ajibuwa Ol. A., Anabaranze Y. O. Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications. *Alexandria Engineering Journal*, Volume 83, 15 November 2023, Pages 234-250. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.012>

Alemu D., Tafesse M., Mondal A. K. Mycelium-Based Composite: The Future Sustainable Biomaterial. *Review Int J Biomater* . 2022, 12:2022:8401528. doi: 10.1155/2022/8401528.

Andlar M., Rezić T., Marđetko N., Kracher D., Ludwig R., Šantek B. Lignocellulose Degradation: An Overview of Fungi and Fungal Enzymes Involved in Lignocellulose, *Eng Life Sci.* 2018, 18(11):768-778. doi: 10.1002/elsc.201800039.

Attias N., Danai O., Tarazi E., Pereman I., Grobman Y.J. Implementing bio-design tools to develop mycelium-based products. *Des. J.* 2019, 22, 1647–1657.

Attias N., Danai O., Abitbol T., Tarazi E. Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: comparative review and experimental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 246, Article ID 119037. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.119037.

Attias N., Reid M., Mijowska S.C., Dobryden I., Isaksson M., Pokroy B. Biofabrication of nanocellulose-mycelium hybrid materials. *Adv Sustain Syst.* 2021;5(2):2000196

Appels F.V.W., Camere S., Montalti M., Karana E., Jansen K.M.B., Dijksterhuis J., Krijgsheld P., Wosten H.A.B., Fabrication factors influencing mechanical, moisture and water-related properties of mycelium-based composites, *Mater. Des.* 2019, 161, 64–71.

Appels F. V., Wosten H. A. Mycelium Materials, *Encyclopedia of Mycology*, 2021, vol. 2, pp. 710–718.

Ayele A., Haile S., Alemu D., Kamaraj M. Comparative utilization of dead and live fungal biomass for the removal of heavy metal: a concise review,” *8e Scientific World Journal*, 2021

Barta, D. G., Simion, I., Tiuc, A. E., & Vasile, O. (2024). Mycelium-based composites as a sustainable solution for waste management and circular economy. *Materials*, 17(2), 404. <https://doi.org/10.3390/ma17020404>

Bhuvaneswari G.H. Degradability of polymers. In: Thomas S., Rane A.V., Kanny K., Thomas M.G., editors. *Recycling of polyurethane foams*. Norwich: William Andrew Publishing; 2018. p. 29–44.

Cai J., Han J., Ge F., Lin Y., Pan J., Ren A. Development of impact-resistant mycelium-based composites (MBCs) with agricultural waste straws. *Constr. Build. Mater.* 2023, 389, 131730.

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.

Chamas A., Moon H., Zheng J., Qiu Y., Tabassum T., Jang J.H., Abu-Omar M., Scott S.L., Suh S. (2020) Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 8, 3494–3511.

Chan X. Y., Saeidi N., Javadian A., Hebel D. E., Gupta M. Mechanical properties of dense mycelium-bound composites under accelerated tropical weathering conditions. *Sci Rep.* 2021, 11(1):22112. doi: 10.1038/s41598-021-01598-4.

Cerimi K. Fungi as source for new bio-based materials: A patent review. *Fungal Biology and Biotechnology*, 2019. DOI: 10.1186/s40694-019-0080-y

Daniel G. (2016) Chapter 8—Fungal Degradation of Wood Cell Walls. In *Secondary Xylem Biology*; Kim Y.S., Funada R., Singh A.P. Academic Press: Boston, MA, USA,; pp. 131–167.

Dell Inc, Green Packaging & Shipping. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.dell.com/learn/us/en/uscorp1/corp-comm/mushroom-packaging>

Dias P.P., Jayasinghe L.B., Waldmann D. Investigation of mycelium-miscanthus composites as building insulation material. *Results Mater.* 2021, 10, 100189. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100189>

Ecovative Design LLC (2019), Mycocomposite - Mycelium-bound Agricultural Byproducts,. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://ecovativedesign.com/mycocomposite>

Ecovative Design, 2020, [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://ecovativedesign.com/>.

Elkhateeb W. A., Daba G. M. Amazing potential of fungi in human life,” *ARC Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2019., vol. 5, no. 3, pp. 12–16

Elsacker E., Vandelook S., Brancart J., Peeters E., De Laet L. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates, *PLoS One* 14, (7) (2019) eo213954.

Elsacker E., Vandelook S., B. Damsin, A. VanWylick, E. Peeters, L. De Laet, Mechanical characteristics of bacterial cellulose-reinforced mycelium composite materials, *Fungal Biol. Biotechnol.* 2021, 8, 18.

Elsacker E., Vandelook S., Wylicka A.V., Ruytinx J., De Laeta L., Peeters E. A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites, *Sci. Total Environ.*, xxx 1–17 (138431), 2020, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431> 0048-9697/c.

Faruque M.A.A., Remadevi R., Razal J., Wang X., Naebe M. Investigation on structure and characteristics of alpaca-based wet-spun polyacrylonitrile composite fibres by utilizing natural textile waste. *J. Appl. Polym. Sci.* 2020, 137, 48370.

Faruque M.A.A., Remadevi R., Razal J., Wang X., Naebe M. Impact of the wet spinning parameters on the alpaca-based polyacrylonitrile composite fibres: Morphology and enhanced mechanical properties study. *J. Appl. Polym. Sci.* 2020, 137, 49264.

Fazli Wan Nawawi W.M., Lee K.-Y., Kontturi E., Murphy R.J., Bismarck A. (2019). Chitin nanopaper from mushroom extract: Natural composite of nanofibers and glucan from a single biobased source. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 7, 6492–6496.

Fazita M.N., Jayaraman K., Bhattacharyya D., Haafiz M.M., Saurabh C.K., Hussin M.H., Khalil H.A. Green composites made of bamboo fabric and poly (lactic) acid for packaging applications—A review. *Materials* **2016**, 9, 435.

Flagel J. *Mycelium: Using Mushrooms to Make Packaging Materials*, Matmatch, Munich, Germany, 2020.

França F., Solar R., Lees A.C., Martins L.P., Berenguer E., Barlow J. Reassessing the role of cattle and pasture in Brazil's deforestation: a response to "Fire, deforestation, and livestock: when the smoke clears." *Land Use Policy*. 2021;108:105195. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105195>

Gavriilidis E. T., Voutetaki M. E., Giouzevas D. G. Effective Structural Parametric Form in Architecture Using Mycelium Bio-Composites. *Architecture* 2024, 4(3), 717-729; <https://doi.org/10.3390/architecture4030037>

Gandia A., Montalti M., Babbini S. Method of producing fungal mats and materials made therefrom. PCT/IB2019/060466 [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/leather-goods-market-size-share-trends-analysis-report-by-product-footwear-home-decor-apparel-by-type-genuine-synthetic-by-region-north-america-asia-pacific-and-segment-forecasts-2021-2028>. 2021. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/leather-goods-market-size-share-trends-analysis-report-by-product-footwear-home-decor-apparel-by-type-genuine-synthetic-by-region-north-america-asia-pacific-and-segment-forecasts-2021-2028>. Accessed 29 Nov 2021.:<https://patents.google.com/patent/WO2020115690A1/en>

Ghazvinian A., Farrokhsiar P., Vieira F., Pecchia J., Gursoy B. Mycelium-Based Bio-Composites for Architecture: Assessing the Effects of Cultivation Factors on Compressive Strength, the eCAADe and SIGraDi Conference, University of Porto, Porto, Portugal, 2019.

Girometta C., Picco A. M., Baiguera R. M. Physicomechanical and thermodynamic properties of myceliumbased biocomposites: a review. *Sustainability*, 2019 vol. 11, no. 1, p. 281.

Greetham L., McIntyre G.R., Bayer E., Winiski J., Araldi S. Mycological biopolymers grown in void space tooling. US14/336,455[Электронный ресурс] – режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US20150033620A1/en>

Guilger-Casagrande M., de Lima R. Synthesis of Silver Nanoparticles Mediated by Fungi: A Review. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2019 Sec. Nanobiotechnology Volume 7 - 2019 | <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00287>

Gosden E. Ikea plans mushroom-based packaging as eco-friendly replacement for polystyrene. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.telegraph.co.uk/news/earth/businessandecology/recycling/12172439/Ikea-plans-mushroom-based-packaging-as-eco-friendly-replacement-for-polystyrene.html> 2016.

Gow N. A. R., Latge, Munro C. A. The Fungal Cell Wall: Structure, Biosynthesis, and Function. *Microbiol Spectr.* 2017, 5(3):10.1128/microbiolspec.funk-0035-2016. doi: 10.1128/microbiolspec.FUNK-0035-2016.

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 (Basel)*; 17(24):6084. doi: 10.3390/ma17246084.

Haneef M., Ceseracciu L., Canale C., Bayer I.S., Heredia-Guerrero J.A., Athanassiou A. Advanced materials from fungal mycelium: fabrication and tuning of physical properties. *Sci. Rep.* 7, 2017. 41292, <https://doi.org/10.1038/srep41292>.

Irbe I., Loris G. D., Filipova I., Andze L., Skute M. (2022) Characterization of Self-Growing Biomaterials Made of Fungal Mycelium and Various Lignocellulose-Containing Ingredients. *Materials (Basel)*, 15(21):7608. doi: 10.3390/ma15217608.

Islam M.R., Tudryn G., Bucinell R., Schadler L., Picu R.C. Stochastic continuum model for mycelium-based bio-foam. *Mater. Des.* 2018, 160, 549–556.

Jasim A., Ullah M. W., Shi Z., Lin X., Yang G. Fabrication of bacterial cellulose/polyaniline/single-walled carbon nanotubes membrane for potential

application as biosensor. *Carbohydrate Polymers Volume* 2017, 163, 1, Pages 62-69. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.01.056>

Javadian A., Le Ferrand H., Hebel D.E., Saeidi N. Application of mycelium-bound composite materials in construction industry: A short review, *SOJ Mater. Sci. Eng.* 7 (2) (2020) 1–9.

Jevinová P., Pipová M., Regecová I., Demjanová S., Semjon B., Marcinčák S., Nagy J., Kožárová I. (2021). Effect of *Cladosporium cladosporioides* on the Composition of Mycoflora and the Quality Parameters of Table Eggs during Storage. *Processes* 9(4), 613; <https://doi.org/10.3390/pr9040613>

Jiang L., Walczyk D., McIntyre G., Bucinell R., Tudryn G. Manufacturing of biocomposite sandwich structures using mycelium-bound cores and preforms, *J. Manuf. Process.* 28, 2017, 50–59, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.029>.

Jiménez-Obando, G., Arcila, J. S., Tolosa-Correa, R. A., Valencia-Cardona, Y. L., & Montoya, S. (2025). Development and Characterization of Mycelium-Based Composite Using Agro-Industrial Waste and *Ganoderma lucidum* as Insulating Material. *Journal of Fungi*, 11(6), 460. <https://doi.org/10.3390/jof11060460>

Jones J., Huynh M., Dekiwadia T., Daver C., John F. Mycelium composites: a review of engineering characteristics and growth kinetics. *Journal of Bionanoscience* 2017. 11, 241–257, doi:10/gdvp8s.

Jones M., Mautner A., Luenco S., Bismarck A., John S. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: a critical review, *Mater. Des.*, 2019. 187 (1–33), 108397, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>.

Jones M., Lawrie A., Huynh T., Morrison P., Mautner A., Bismarck A., John S. Agricultural by-product suitability for the production of chitinous composites and nanofibers utilising *Trametes versicolor* and *Polyporus brumalis* mycelial growth. *Process Biochem.* 2019, 80, 95–102.

Jones M., Weiland K., Kujundzic M., Theiner J., Kählig H., Kontturi E., John S., Bismarck A., Mautner A. Waste-Derived Low-Cost Mycelium Nanopapers with Tunable Mechanical and Surface Properties. *Biomacromolecules* 2019, Volume 20, Issue 9, Pages 3513-3523. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b00791>

Jones M., Gandia A., John S., Bismarck A. Leather-like material biofabrication using fungi. *Nat Sustain.* 2020;4(1):9–16.

Joshi K., Meher M. K., Poluri K. M. Fabrication and Characterization of Bioblocks from Agricultural Waste Using Fungal Mycelium for Renewable and Sustainable Applications. *ACS Applied Bio Materials*, 2020, Vol 3/Issue 4. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsabm.9b01047>

Jose J., Uvais K.N., Sreenadh T.S., Deepak A.V., Rejeesh C.R. Investigations into the development of a mycelium biocomposite to substitute polystyrene in packaging applications. *Arab. J. Sci. Eng.* 2021, 46, 2975–2984.

Kanitkar Y.M., Kulkarni A.P., Wangikar K.S. Characterization of Glass Hybrid composite: A Review. *Mater. Today Proc.* 2017, 4, 9627–9630.

Kaplan-Bie J.H., Greetham L.E., Bonesteel I.T., McIntyre G.R. Increased homogeneity of mycological biopolymer grown into void space. US16/190,585

[Электронный ресурс] – режим доступа: <https://patents.google.com/patent/WO2019099474A1/en>

Kim Y., Ullah M. W., Ul-Islam M., Khan S., Jang J. H., Park J. K. Self-assembly of bio-cellulose nanofibrils through intermediate phase in a cell-free enzyme system. *Biochemical Engineering Journal* 2019, Volume 142, , Pages 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.11.017>

Khamrai M., Banerjee S. L., Kundu P. P. A sustainable production method of mycelium biomass using an isolated fungal strain *Phanerochaete chrysosporium* (accession no: KY593186): Its exploitation in wound healing patch formation. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2018, Volume 16, , Pages 548-557. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.09.013>

Khoo S. C., Peng W. X., Yang Y., Ge S. B., Soon C. F., Ma N. L., Sonne C. Development of formaldehyde-free bio-board produced from mushroom mycelium and substrate waste. *J Hazard Mater.* 2020;400:123296. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123296.

Krivanek S. Fungal Mycelium; the Key to a Sustainable Future. University of Nebraska, Lincoln, NE, USA, 2020.

Kumla J., Suwannarach N., Sujarit K., Penkhrue W., Kakumyan P., Jatuwong K., Vadthanarat S., Lumyong S. Cultivation of Mushrooms and Their Lignocellulolytic Enzyme Production Through the Utilization of Agro-Industrial Waste. *Molecules* 2020, 25(12), 2811; <https://doi.org/10.3390/molecules25122811>

Kumla J., Suwannarach N., Sujarit K., Penkhrue W., Kakumyan P., Jatuwong K., Vadthanarat S., Lumyong S. Cultivation of mushrooms and their lignocellulolytic enzyme production through the utilization of agro-industrial waste. *Molecules*, 2020, 25, 2811. <https://doi.org/10.3390/molecules25122811>

Kylili A., Seduikyte L., Fokaidis P.A. Life cycle analysis of polyurethane foam wastes. In: Thomas S., Rane A.V., Kanny K., Thomas M.G., editors. Recycling of polyurethane foams. Norwich: *William Andrew Publishing*; 2018. p. 97–113.

Lee T., Choi J. Mycelium-composite panels for atmospheric particulate matter adsorption. *Results Mater.* 2021, 11, 100208.

Liu R.; Long L., Sheng Y., Xu J., Qiu H., Li X., Wang Y., Wu H. Preparation of a kind of novel sustainable mycelium/cotton stalk composites and effects of pressing temperature on the properties. *Ind. Crops Prod.* 2019, 141, 111732. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111732>

Li H., Zhao H., Gao Z., Song X., Wang W., Yuan F., Feng Y., Zhang Y., Zhang J., Zhang S., Jia L. The Antioxidant and Anti-Aging Effects of Acetylated Mycelia Polysaccharides from *Pleurotus djamor*. *Molecules* 2019, 24(15), 2698; <https://doi.org/10.3390/molecules24152698>

Livne A., Wösten H.A., Pearlmutter D., Gal E. Fungal mycelium bio-composite acts as a CO₂-sink building material with low embodied energy. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2022, 10, 12099–12106.

Maghsoudi-Ganjeh M., Lin L., Wang X., Zeng X. Bioinspired design of hybrid composite materials. *Int. J. Smart Nano Mater.* 2018, 10, 90–105.

Majib N. M., Yaacob N. D., Ting S. S., Rohaizad N. M., Rashidi A. M. A. Fungal mycelium-based biofoam composite: A review in growth, properties and application. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. 2025, Vol. 41(1) 91–123, DOI: 10.1177/14777606241252702.

Manan S., Ullah M.W., Ul-Islam M., Atta O.M., Yang G. Synthesis and applications of fungal mycelium-based advanced functional materials. *J. Bioresour. Bioprod.* 2021, 6, 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.001>.

Manisalidis I., Stavropoulou E., Stavropoulos A., Bezirtzoglou E. (2020) Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Front. Public Health*, 8, 14. DOI: 10.3389/fpubh.2020.00014

Matos M. P., Teixeira J. L., Nascimento B. L., Griza S., Holanda F. S. R., Marino R. H. Production of biocomposites from the reuse of coconut powder colonized by *Shiitake mushroom*. *Ciencia E Agrotecnologia*, 2019, vol. 43.

Mittal, M.; Chaudhary, R. Biodegradability and mechanical properties of pineapple leaf/coir Fibre reinforced hybrid epoxy composites. *Mater. Res. Express* 2019, 6, 045301.

Meng D., Mukhitov N., Neitzey D., Lucht M., Schaak D.D., Voigt C.A. Rapid and simultaneous screening of pathway designs and chassis organisms, applied to engineered living materials. *Metab Eng.* 2021;1(66):308–18.

Mokhothu T.H., John M.J. Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their biocomposites. *Carbohydr. Polym.* 2015, 131, 337–354.

Mohammed L., Ansari M.M.N., Pua G., Jawaid M., Islam M.S. A review on natural fibre reinforced polymer composite and its applications. *Int. J. Polym. Sci.* 2015.

Muniyasamy S., Reddy M.M., Misra M., Mohanty A.K. Biodegradable green composites from bioethanol co-product and poly(butylene adipate-co-terephthalate). *Ind. Crop. Prod.* 2015, 43, 812–819.

Muthuraj R., Misra M., Mohanty A.K. Studies on mechanical, thermal, and morphological characteristics of biocomposites from biodegradable polymer blends and natural fibres. In *Biocomposites*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015; pp. 93–140.

Motamedi S., Rouse D. R., Promis G. Microstructure-Driven Hygrothermal Behavior of Mycelium-Based Composites for Bio-Based Insulation. *Energies* 2025, 18(11), 2864; <https://doi.org/10.3390/en18112864>

Mycotech Lab. Mylea technical data sheet.pdf. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://mycl.bio/storage/app/media/mylea/Mylea%20Technical%20Data%20Sheet.pdf> Accessed 29 Nov 2021

Naebe M., McGregor B.A., Swan P., Tester D. Associations between the physiological basis of fabric-evoked prickle, fibre and yarn characteristics and the Wool ComfortMeter value. *Text. Res. J.* 2015, 85, 1122–1130.

Nashiruddin N.I., Chua K.S., Mansor A.F., A Rahman R., Lai J.C., Wan Azelee, N.I., Enshasy H. El. Effect of growth factors on the production of mycelium-based biofoam. *Clean Technol. Environ. Policy* 2021, 24, 351–361. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02146-4>

Nawawi W.M., Jones M.P., Kontturi E., Mautner A., Bismarck A. Plastic to elastic: Fungi-derived composite nanopapers with tunable tensile properties. *Compos. Sci. Technol.* 2020, 198, 108327.

Nurazzi M., Laila D. A Review: Fibres, Polymer Matrices and Composites science & technology. *Polym. Matrices Compos.* 2017, 25, 1085–1102.

Olivero E., Gawronska E., Manimuda P., Jivani D., Chaggan F. Z., Corey Z., Almeida T. S., Kaplan-Bie J., McIntyre G., Wodo O., Nalam P. C. Gradient porous structures of mycelium: a quantitative structure–mechanical property analysis. *Sci Rep.* 2023, 13(1):19285. doi: 10.1038/s41598-023-45842-5.

Pavia R., Caldas L., Dias R., Filho T. Role of Bio-Based Building Materials in Climate Change Mitigation: Special Report of the Brazilian Panel on Climate Change, PBMC, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 2018.

Peças P., Carvalho H., Salman H., Leite M. Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review. *J. Compos. Sci.* 2018, 2, 66.

Pelletier M.G., Holt G.A., Wanjura J.D., Lara A.J., Tapia-Carillo A., McIntyre G., Bayer E. An evaluation study of pressurecompressed acoustic absorbers grown on agricultural by-products. *Ind. Crops Prod.* 2017, 95, 342–347.

Pelletier M.G., Holt G.A., Wanjura J.D., Greetham L., McIntyre G., Bayer E.; Kaplan-Bie J. Acoustic evaluation of mycological biopolymer, an all-natural closed cell foam alternative. *Ind. Crops Prod.* 2019, 139, 111533.

Pickering K.L., Efendy M.A., Le T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2016, 83, 98–112.

Pohl C., Schmidt B., Guitar T. N., Klemm S., Gusovius H.-J., Platzk S., Kruggel-Emden H., Klunker A., Völlmecke Ch., Fleck C., Meyer V. Establishment of the basidiomycete *Fomes fomentarius* for the production of composite materials. *Fungal Biol Biotechnol.* 2022 Feb 24;9(1):4. doi: 10.1186/s40694-022-00133-y.

Rathore H., Prasad S., Kapri M., Tiwari A., Sharma S. Medicinal importance of mushroom mycelium: mechanisms and applications. *Journal of Functional Foods*, 2019, vol. 56, pp. 182–193.

Ramamoorthy S.K., Skrifvars M., Persson A. A review of natural fibres used in biocomposites: Plant, animal and regenerated cellulose fibres. *Polym. Rev.* **2015**, 55, 107–162.

Ross P., Wenner N., Moorleghen C. System for growing fungal materials. US17/081,745

Safri S.N.A., Sultan M.T.H., Jawaid M., Jayakrishna K. Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. *Compos. Part B Eng.* 2018, 133, 112–121.

Sakamoto Y. Influences of environmental factors on fruiting body induction, development and maturation in mushroom-forming fungi. *Fungal Biol Rev.* 2018;1:32.

Santos I.S., Nascimento B.L., Marino R.H., Sussuchi E.M., Matos M.P., Griza S. Influence of drying heat treatments on the mechanical behavior and physico-chemical properties of mycelial biocomposite. *Compos. Part B Eng.* 2021, 217, 108870. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108870>

Schritt H.; Vidi S.; Pleissner D. Spent mushroom substrate and sawdust to produce mycelium-based thermal insulation composites. *J. Clean. Prod.* 2021, 313, 127910.

Semple, K. E., Zhou, C., Rojas, O. J., Nkeuwa, W. N., & Dai, C. (2022). Moulded pulp fibers for disposable food packaging: A state-of-the-art review. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, 100908. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100908>

SINGLE-CELL PROTEIN | Mycelial Fungi. Encyclopedia of Food Microbiology Reference Work • 1999

Sumini, M., Andrade, G. J. S., Tischer, C. A., Kobayashi, R. K. T., & Nakazato, G. (2025). Production of bacterial cellulose by *Komagataeibacter xylinus*: biochemistry, synthesis and applications. *Cellulose*, 32(1), 81-94. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-06179-y>

Sağlam, S. S. & Özgünler, S. A. (2024). PRODUCTION OF MYCELIUM-BASED COMPOSITE MATERIALS AND EVALUATION OF THERMAL INSULATION PERFORMANCE. *Journal of Green Building*, 19(2), 193–222. <https://doi.org/10.3992/jgb.19.2.193>

Shanmugam V., Mensah R.A., Forsth M., Sas G., Restas A., Addy C., Xu Q., Jiang L., Neisiany R.E., Singha S., George G. Circular economy in biocomposite development: State-of-the-art, challenges and emerging trends, *Composites Part C* 5, 2021, 100138, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100138>.

Shakir M. A., Azahari B., Yusup Y., Yhaya M. F., Salehabadi A., Ahmad M. I., Preparation and characterization of mycelium as a bio-matrix in fabrication of biocomposite. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 2020., vol. 65, no. 2, pp. 253–263.

Smith M.J., Goldman J., Boulet-Audet M., Tom S.J., Li H., Hurlburt T.J. Composite material, and methods for production thereof. US16/943,581. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US11015059B2/en>

Subramani N., Murali J.G., Suresh P., Sankar V.V.A. Review on hybrid composite materials and its applications. *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2017, 4, 19-21.

Sun W., Tajvidi M., Hunt C.G., McIntyre G., Gardner D.J. Fully bio-based hybrid composites made of wood, fungal mycelium and cellulose nanofibrils. *Sci Rep.* 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40442-8>.

Syduzzaman Md., Abdullah Al Faruque Md., Bilisik K., Naebe M. Plant-Based Natural Fibre Reinforced Composites: A Review on Fabrication, Properties and Applications. *Coatings*, 2020, 10(10), 973; <https://doi.org/10.3390/coatings10100973>

Sydor M., Bonenberg A., Doczekalska B. Mycelium-based composites in art, architecture, and interior design: A Review. *Polymers* 14, 2021, 145, <https://doi.org/10.3390/polym14010145>.

Sydor M., Cofta G., Doczekalska B., Bonenberg A. Fungi in mycelium-based composites: Usage and recommendations. *Materials* 2022, 15, 6283. DOI: 10.3390/ma15186283

Suwannarach N., Kumla J., Zhao Y., Kakumyan P. Impact of Cultivation Substrate and Microbial Community on Improving Mushroom Productivity: A Review. *Biology (Basel)* . 2022 Apr 8;11(4):569. doi: 10.3390/biology11040569.

Stewart B.A., Alegria L.A., Totman R.J., Avniel Y.C. Fungal textile materials and leather analogs. US17/030,322 [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US11118305B2/en>

Tacer-Caba Z., Varis J.J., Lankinen P., Mikkonen K.S. Comparison of novel fungal mycelia strains and sustainable growth substrates to produce humidity-resistant biocomposites. *Mater. Des.* 2020, 192, 108728.

Tajeddin, B., & Arabkhedri, M. (2020). Polymers and food packaging. In *Polymer science and innovative applications* (pp. 525-543). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816808-0.00016-0>

Teixeira J. L., Matos M. P., Nascimento B. L., Griza S., Holanda F. S. R., Marino R. H. Production and mechanical evaluation of biodegradable composites by white rot fungi. *Ciencia E Agrotecnologia*, 2018 vol. 42, no. 6, pp. 676–684.

Ullah M. W., Manan S., Kiprono S. J., Ul-Islam M. Guang Yang Synthesis, Structure, and Properties of Bacterial Cellulose. *Nanocellulose*, 2019, p:81-113 <https://doi.org/10.1002/9783527807437.ch4>

United Nations Industrial Development Organization. Future Trends in the World Leather and Leather Products Industry and Trade. [Электронный ресурс] – режим доступа: [https:// leatherpanel.org/sites/default/files/publications-attachments/future_trends_in_the_world_leather_and_leather_products_industry_and_trade.pdf](https://leatherpanel.org/sites/default/files/publications-attachments/future_trends_in_the_world_leather_and_leather_products_industry_and_trade.pdf). Accessed 29 Nov 2021.

Väisänen T., Das O., Tomppo L. A review on new bio-based constituents for natural fibre-polymer composites. *J. Clean. Prod.* 2017, 149, 582–596.

Vandelook S., Elsacker E., Wylick A.V., De Laet L., Peeters E. Current state and future prospects of pure mycelium materials, *Fungal Biol. Biotechnol.* 8 (20), 2021 1–10, <https://doi.org/10.1186/s40694-021-00128-1>.

Vidal-Diez de Ulzurrun G., Baetens J.M., Van den Bulcke J., De Baets B. Modelling three-dimensional fungal growth in response to environmental stimuli. *J. Theor. Biol.* 2017;414: 35–49. doi:10/f9xw32

Vidholdova Z., Kormuthova D., Izdinsky J., Lagana R. Compressive resistance of the mycelium composite. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW, Forestry and Wood Technology*, 2018, vol. 107, pp. 31–36.

Wang X., Zhang Z., Zhao M. Carboxymethylation of polysaccharides from *Tremella fuciformis* for antioxidant and moisture-preserving activities. *International Journal of Biological Macromolecules* 2015, Volume 72, Pages 526-530. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.08.045>

Willicombe, K. G. (2023). *Development of Novel Transportation Shells for Use in High Volume Composite Part Manufacture: The Clamshell Concept* (Doctoral dissertation, University of Bristol).

Witayakran S., Smitthipong W., Wangpradid R., Chollakup R., Clouston P.L. *Natural Fibre Composites: Review of Recent Automotive Trends*; Elsevier: London, UK, 2017; pp. 166–174.

Wu C.-S., Liao H.-T., Cai Y.-X. Characterisation, biodegradability and application of palm fibre-reinforced polyhydroxyalkanoate composites. *Polym. Degrad. Stab.* 2017, *140*, 55–63.

Xing Y., Brewer M., Gharabawy H.E., Griffith G., Jones P. Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials. *Environ. Earth Sci.* 2017, *121*, 022032. DOI 10.1088/1755-1315/121/2/022032

Yang Z., Zhang F., Still B., White M., Amstislavski P. Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam. *J. Mater. Civ. Eng.* 2017;29: 04017030. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001866](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866).

Yang K. Investigations of Mycelium as a Low-Carbon Building Material, Dissertation, Thayer School of Engineering Dartmouth College Hanover, New Hampshire, 2020.

Yang L., Park D., Qin Z. Material function of mycelium-based bio-composite: A Review. *Front. Mater.* 8 (1–15) (2021), 737377, <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.737377>.

Zabel R., Morrell J. (2020) Wood Microbiology. Decay and Its Prevention; Academic Press: Cambridge, MA, USA,; p. 576.

Zimele Z., Irbe I., Grinins J., Bikovens O., Verovkins A., Bajare D., Novel mycelium-based biocomposites (MBB) as building materials, *J. Renewable Mater.* 8 (9), 2020 1068–1075, <https://doi.org/10.32604/jrm.2020.09646>.