МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)
бакалавра
(ступінь вищої освіти)

на тему Обґрунтування та розробка технології отримання полімерного композиту на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіха

Виконав:
студент __4__ курсу, групи БАД-213сп
спеціальності 132 «Матеріалознавство»,
ОПП «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
(код і назва напряму підготовки, спеціальності)
Войта В.В.
(прізвище та ініціали студента)
Керівник Воскобойнік О.Ю.
(прізвище та ініціали)
Рецензент Ткач Д.В.
(прізвище та ініціали)

2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет: Факультет будівництва, архітектури та дизайну
Кафедра: «Композиційні матеріали, хімія та технології»
Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)
Спеціальність: 132 «Матеріалознавство», ОПП «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
(код і назва)
Галузь знань: 13 механічна інженерія
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри, к.т.н., доцент
_____ Акімов І.В.
“ ____”_____травня__2026_року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

ВОЙТА Владислава Володимировича
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи Обґрунтування та розробка технології отримання полімерного композиту на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіха.

керівник роботи Воскобойнік Олексій Юрійович, доктор фармацевтичних наук професор
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від «17» 04 2026 року №173
2. Строк подання студентом роботи 20.05.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи Епоксидна смола ЕД-20, властивості подрібненої шкаралупи грецького горіха, науково-технічна та патентна література з тематики роботи, результати експериментальних досліджень композиційного матеріалу.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Використання подрібненої шкаралупи грецького горіха як наповнювача для створення композиційних матеріалів. Полімерні композиційні матеріали та їх типи. Технологія виготовлення композиційного матеріалу на основі епоксидної смоли ЕД-20 та подрібненої шкаралупи грецького горіха. Дослідження властивостей компонентів композиційного матеріалу та одержаних зразків. Аналіз результатів досліджень та формування висновків.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень) Технологічна схема виготовлення композиційного матеріалу на основі епоксидної смоли ЕД-20 та подрібненої шкаралупи грецького горіха. Результати визначення насипної густини та вологості подрібненої шкаралупи грецького горіха. Результати дослідження густини та механічних властивостей композиційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	**ВОСКОБОЙНІК О.Ю. проф.**		
2	**ВОСКОБОЙНІК О.Ю. проф.**		
Нормоконтроль	**ПЕТРУША Ю.Ю. доцент**		

7. Дата видачі завдання 8 квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Проведення огляду актуальних літературно-патентних даних, присвячених використанню можливості створення композиційних матеріалів з використанням в якості наповнювача подрібненої шкаралупи грецького горіху.	1-15 квітня 2026 р.	
2.	Обгрунтування доцільності застосування епоксидних смол та подрібненої шкаралупи грецького горіху для створення композиційних матеріалів. Вивчення властивостей подрібненої шкаралупи грецького горіху.	16-30 квітня 2026 р.	
3	Розробка складу та технології виготовлення композиційних матеріалів на основі епоксидних смол та подрібнено шкаралупи грецького горіху. Виготовлення зразків композиційного матеріалу.	1-8 травня 2026 р.	
4	Дослідження експлуатаційних властивостей зразків композиційного матеріалу на основі епоксидних смол та подрібнено шкаралупи грецького горіху.	9-15 травня 2026 р.	
5	Аналіз одержаних результатів та формування висновків. Написання роботи та оформлення документів.	15-22 травня 2026 р.	

Студент _____ (підпис) Войта В.В. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ (підпис) Воскобойнік О.Ю. (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи бакалавра: 48 с., 3 табл., 3 рис., 26 джерел.

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, ЕПОКСИДНІ СМОЛИ, ШКАРАЛУПА ГРЕЦЬКОГО ГОРІХУ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ.

У роботі обґрунтовано доцільність створення полімерного композиційного матеріалу на основі епоксидної смоли ЕД-20 та подрібненої шкаралупи грецького горіха для ремонтно-відновлювальних і декоративно-оздоблювальних застосувань. Актуальність дослідження зумовлена потребою у доступних, технологічно простих та екологічно орієнтованих матеріалах для відновлення пошкоджених дерев'яних елементів, зокрема вікон, дверей, меблевих і декоративних виробів. У літературному огляді показано, що шкаралупа грецького горіха є перспективним лігноцелюлозним наповнювачем, який дає змогу зменшити витрати полімерної матриці, надати композиту природної текстури та регулювати його експлуатаційні властивості. Експериментально визначено насипну густину подрібненої шкаралупи, що становила 0,345 г/см³, а також вміст вологи та летких речовин – (8,91±0,05) %. Запропоновано технологічну схему виготовлення композитів, яка передбачає сушіння наповнювача, змішування епоксидної смоли з твердником ПЕПА у співвідношенні 9:1, введення наповнювача у кількості 10%, 30% і 50%, формування зразків у силіконових формах і тверднення протягом 48 годин. Встановлено, що густина отриманих матеріалів перебуває в межах 1,09–1,20 г/см³, а зразок із 30% наповнювача має найвище значення густини. Показано, що надмірне наповнення ускладнює лиття через підвищення в'язкості суміші. Результати підтверджують перспективність розробленого композиту як доступного матеріалу з ремонтним і декоративним потенціалом.

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Використання подрібненої шкаралупи грецького горіху як наповнювача для створення композиційних матеріалів. (огляд літератури)	9
2 Технологія виготовлення та властивості композиційного матеріалу на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіху.	21
2.1 Полімерні композиційні матеріали та їх типи.	21
2.2 Технологія виготовлення полімерних композиційних матеріалів.	26
2.3 Дослідження властивостей компонентів полімерного композиційного матеріалу.	32
2.3.1. Визначення насипної густини подрібненої шкаралупи грецького горіху.	33
2.3.2 Визначення вмісту вологи в подрібненій шкаралупі грецького горіху	34
2.3.3 Виготовлення зразків ПКМ з різною наповненістю та їх властивості.	36
2.3.3.1 Технологічна схема виготовлення ПКМ.	36
2.3.3.2 Визначення густини матеріалу.	38
2.3.3.3 Визначення механічних властивостей матеріалу.	39
Висновки	43
Перелік джерел посилань	44

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах воєнного стану в Україні особливої актуальності набуває проблема відновлення пошкоджених будівельних конструкцій, елементів житлових і громадських споруд, а також окремих виробів побутового та інтер'єрного призначення. Масштабні руйнування, спричинені бойовими діями, призводять не лише до пошкодження несучих конструкцій, а й до значного руйнування елементів з деревини, зокрема віконних рам, дверних полотен, коробок, декоративних накладок, меблевих деталей та інших виробів. У багатьох випадках такі елементи не потребують повної заміни, але вимагають локального ремонту: заповнення тріщин, сколів, заглиблень, дефектів поверхні, відновлення форми та забезпечення достатньої механічної міцності пошкодженої ділянки. Тому розробка доступних, технологічно простих і функціональних ремонтних композиційних матеріалів є важливим практичним завданням для сучасного матеріалознавства. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є використання полімерних композицій на основі епоксидних смол. Епоксидні смоли характеризуються високою адгезією до різних матеріалів, зокрема деревини, достатньою механічною міцністю, хімічною стійкістю, низькою усадкою під час тверднення та здатністю формувати міцні просторово зшиті полімерні структури. Завдяки цим властивостям епоксидні матеріали широко застосовуються як клеї, герметики, ремонтні склади, захисні покриття та матриці для композиційних матеріалів. Однак використання чистої епоксидної смоли для ремонту дерев'яних виробів не завжди є економічно доцільним, а також може не забезпечувати бажаних декоративних властивостей і текстурної подібності до природної деревини. Тому введення до складу епоксидної матриці природного дисперсного наповнювача є доцільним як з технологічної, так і з економічної та екологічної точок зору.

Як такий наповнювач перспективною сировиною є подрібнена шкаралупа грецького горіха. Вона є відходом агропромислового та харчового виробництва, доступна в Україні, має природне походження й може розглядатися як відновлювана або частково відновлювана сировина для створення полімерних композиційних матеріалів. Використання шкаралупи грецького горіха як наповнювача дозволяє зменшити витрати епоксидної смоли, надати матеріалу більш природного зовнішнього вигляду, а також сприяти раціональному використанню рослинних відходів. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям матеріалознавства, спрямованим на створення екологічно орієнтованих композитів із використанням біосировини та вторинних ресурсів.

Подрібнена шкаралупа грецького горіха має низку властивостей, що роблять її придатною для застосування в полімерних композитах. Вона характеризується достатньою твердістю, високим вмістом лігноцелюлозних компонентів, природним коричневим забарвленням і зернистою текстурою. Завдяки цьому такий наповнювач може виконувати не лише функцію здешевлення композиції, а й формувати певні експлуатаційні та декоративні характеристики матеріалу. Залежно від ступеня подрібнення, вмісту наповнювача та способу введення до епоксидної матриці можна регулювати консистенцію суміші, її придатність до нанесення, шліфування, полірування, а також кінцевий зовнішній вигляд виробу. Особливо важливим є те, що композиційний матеріал на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіха може бути використаний для відновлення дерев’яних поверхонь. За рахунок високої адгезії епоксидної смоли до деревини та наявності природного дисперсного наповнювача такий матеріал може застосовуватися для заповнення дефектів, вирівнювання пошкоджених ділянок, відновлення геометрії елементів вікон і дверей, а також для створення захисно-декоративного шару. Після тверднення композиція здатна утворювати міцний матеріал, який може піддаватися механічній обробці, зокрема шліфуванню, свердлінню або додатковому оздобленню. Це є важливою перевагою для ремонтно-відновлювальних робіт, особливо в умовах обмеженого доступу до

дорогих або спеціалізованих матеріалів. Крім ремонтного призначення, такі композиційні матеріали можуть мати й альтернативні сфери застосування. Завдяки природній текстурі та декоративному ефекту, який створює подрібнена шкаралупа грецького горіха в прозорій або напівпрозорій епоксидній матриці, композит може бути використаний для виготовлення декоративних панелей, меблевих вставок, сувенірної продукції, елементів інтер'єру, оздоблювальних плиток, ручок, накладок та інших виробів. Таким чином, розроблюваний матеріал може поєднувати конструкційні, ремонтні та декоративні функції, що підвищує його практичну цінність. Отже, розробка технології отримання полімерного композиту на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіха є актуальною з кількох причин. По-перше, вона спрямована на вирішення практичної проблеми відновлення пошкоджених дерев'яних елементів будівель і виробів. По-друге, використання доступного природного наповнювача дозволяє знизити матеріальні витрати та підвищити екологічну доцільність композиції. По-третє, отриманий матеріал може мати не лише ремонтне, а й декоративне призначення, що розширює можливі напрями його використання. У зв'язку з цим дослідження складу, властивостей і технологічних параметрів отримання такого композиту є доцільним і має як наукове, так і прикладне значення для галузі матеріалознавства.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної бакалаврської роботи є обґрунтування складу та технології одержання композиційного матеріалу на основі епоксидних смол та подрібненої шкаралупи грецького горіху, а також вивчення ряду властивостей даного матеріалу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

– провести літературний огляд сучасних даних присвячених створенню композиційних матеріалів на основі подрібненої шкаралупи грецького горіху;

– обґрунтувати вибір компонентів композиційного матеріалу та вивчити їх властивості;

– обґрунтувати технологію виготовлення композиційного матеріалу;

– дослідити ряд властивостей одержаних композиційних матеріалів.

Об'єкт дослідження. Властивості подрібненої шкаралупи грецького горіху, метод формування композиційного матеріалу, властивості композиційного матеріалу.

Предмет дослідження. Епоксидні смоли, подрібнена шкаралупа грецького горіху, композиційний матеріал на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіху.

Методи дослідження. Аналіз та узагальнення наукової літератури, теоретичні методи дослідження, технологічні методи дослідження, експериментальні методи дослідження.

Одержані результати. Проведено науково-обґрунтований дизайн композиційного матеріалу на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіху, одержано дані про властивості композиційного матеріалу на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіху.

На захист виноситься:

– обґрунтування доцільності використання епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіху для створення композиційного матеріалу;

– склад та технологію виготовлення композиційного матеріалу на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіху.

– результати досліджень властивостей композиційного матеріалу та вихідних компонентів.

Структура та обсяг наукової роботи. Робота складається зі вступу, огляду літературних джерел, матеріалів та методів дослідження, експериментального розділу, загального висновку та списку використаних літературних джерел. Робота викладена на 46 сторінках, ілюстрована 3 таблицями та 3 рисунками. Список літературних джерел містить 26 найменувань.

1 ВИКОРИСТАННЯ ПОДРІБНЕНОЇ ШКАРАЛУПИ ГРЕЦЬКОГО ГОРІХУ ЯК НАПОВНЮВАЧА ДЛЯ СТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Зростання потреби в екологічно безпечних, доступних і функціональних полімерних матеріалах зумовлює актуальність використання природних наповнювачів рослинного походження. Особливий інтерес становить подрібнена шкаралупа грецького горіха, яка є поширеним агропромисловим відходом із лігноцелюлозною структурою. Її введення до полімерних матриць дає змогу одержувати композити з покращеними окремими механічними, теплофізичними, декоративними та експлуатаційними властивостями.

İdris Karagöz [1] дослідив вплив подрібненої шкаралупи грецького горіха як природного наповнювача на властивості полімерних композитів з використанням полілактату як полімерної матриці. Встановлено, що зі збільшенням вмісту наповнювача знижуються механічні характеристики матеріалу, зокрема міцність на розтяг і згин, а також ударна в’язкість. Показано, що введення наповнювача призводить до підвищення водопоглинання та зниження термічної стабільності композитів, при цьому суттєвих змін температури склування та кристалічності не спостерігається. Мікроструктурний аналіз підтверджує рівномірний розподіл частинок наповнювача, однак при збільшенні його вмісту зростає крихкість матеріалу та кількість структурних дефектів.

В публікації Przemysław Pączkowski [2] описано властивості екологічних полімерних композитів на основі ненасиченої поліефірної смоли, модифікованої подрібненою шкаралупою грецького горіха. Встановлено, що введення природного наповнювача призводить до погіршення механічних характеристик, зокрема зниження міцності при згині та деформації руйнування, що обумовлено пористістю матеріалу та недостатньою адгезією між матрицею і наповнювачем. Показано, що зі збільшенням вмісту наповнювача знижується термічна

стабільність композитів, що пов’язано з термодеструкцією лігноцелюлозних компонентів. Водночас встановлено, що наповнювач частково поглинає ультрафіолетове випромінювання, що сприяє підвищенню стійкості матеріалу до фотодеградації. Виявлено, що композити характеризуються підвищеним водопоглинанням та зміною маси при дії агресивних середовищ, що обумовлено структурою природного наповнювача.

Natalia Sienkiewicz зі співавторами [3] представила можливості використання природних наповнювачів рослинного походження як модифікуючих агентів для епоксидних композицій. Встановлено, що епоксидні смоли характеризуються високими механічними та термічними властивостями, однак їх крихкість і чутливість до вологи обмежують застосування, що зумовлює необхідність модифікації. Показано, що введення природних наповнювачів, зокрема відходів рослинного походження, дозволяє знизити вартість матеріалів, підвищити екологічність та покращити окремі експлуатаційні характеристики композитів. Водночас встановлено, що такі наповнювачі можуть знижувати механічні властивості через слабку адгезію з матрицею та гігроскопічність. Виявлено, що фізична та хімічна обробка наповнювачів сприяє покращенню міжфазної взаємодії та підвищенню термомеханічних властивостей композитів.

Науковий колектив у складі Sapronova [4] та інших дослідили вплив біогенного лігноцелюлозного наповнювача, отриманого з агропромислових відходів, зокрема шкаралупи грецького горіха, на властивості епоксидних композитів. Встановлено, що наповнювач має складну мінерально-органічну структуру, яка включає катіони Ca^{2+}, K^{+}, Mg^{2+}, Fe^{3+} та органічні компоненти ліпідної природи (жирні кислоти та їх естери), здатні до міжмолекулярної взаємодії з епоксидною матрицею. Показано, що введення наповнювача в кількості 1,0–1,5 мас.% забезпечує суттєве підвищення механічних і теплофізичних характеристик композитів, зокрема міцності при згинанні, модуля пружності та ударної в’язкості. Це обумовлено поєднанням ефектів

фізичного армування, формування структурно впорядкованої полімерної сітки та релаксації внутрішніх напружень.

Встановлено, що модифікація епоксидної матриці біогенним наповнювачем сприяє зниженню коефіцієнта термічного розширення та підвищенню температури склування, що свідчить про зростання щільності зшивання і обмеження рухливості полімерних ланцюгів. Отримані результати підтверджують, що біогенний лігноцелюлозний наповнювач виконує не лише армувальну, а й структуроутворюючу функцію, забезпечуючи цілеспрямоване керування властивостями епоксидних композитів.

Ruya Isam Bakr Albaker та співавтори [5] дослідили вплив хімічної модифікації подрібненої шкаралупи грецького горіха органічними кислотами на властивості епоксидних композитів. Встановлено, що попередня обробка наповнювача лужними розчинами та модифікація карбоновими кислотами сприяє покращенню міжфазної взаємодії між наповнювачем і полімерною матрицею.

Показано, що тип модифікуючої кислоти та вміст наповнювача суттєво впливають на механічні та термічні характеристики композитів. Зокрема, максимальні значення міцності на розтяг досягаються при використанні лимонної кислоти як модифікатора, що забезпечує ефективніше зчеплення компонентів матеріалу. Встановлено, що модифікація поверхні наповнювача сприяє підвищенню модуля пружності та покращенню структурної однорідності композиту, а також впливає на водопоглинання та термічну стабільність матеріалу. Отримані результати підтверджують доцільність використання хімічно модифікованої шкаралупи грецького горіха як ефективного наповнювача для епоксидних композитів.

Priyabrat Pradhan та Alok Satapathy представили результати дослідження [6] впливу подрібненої шкаралупи грецького горіха як наповнювача на фізико-механічні та теплофізичні властивості поліефірних композитів. Встановлено, що введення наповнювача змінює структуру матеріалу, зокрема знижує густину та підвищує пористість композиту. Показано, що зі збільшенням вмісту

наповнювача спостерігається зростання твердості, модуля пружності та міцності при стиску, тоді як міцність на розтяг, згин та ударна в’язкість знижуються, що пов’язано з погіршенням міжфазної адгезії та утворенням дефектів структури. Встановлено, що введення наповнювача покращує теплоізоляційні властивості композиту, знижує коефіцієнт теплопровідності та коефіцієнт термічного розширення, а також підвищує температуру склування, що свідчить про підвищення термічної стабільності матеріалу.

В своїй роботі Mehmet Nuri Kolak [7] проаналізував можливість використання відходів шкаралупи грецького горіха як наповнювача в полімерних композитах на основі поліефірної матриці. Встановлено, що застосування такого наповнювача сприяє підвищенню екологічності матеріалів та зниженню їх вартості за рахунок використання вторинної сировини. Показано, що збільшення вмісту шкаралупи горіха призводить до зниження густини композиту, а також до зростання водопоглинання і пористості, що пов’язано з природною пористою структурою наповнювача. Водночас встановлено зниження швидкості ультразвукового імпульсу та міцності при стиску, що пояснюється зменшенням щільності структури матеріалу. Виявлено, що незважаючи на зниження механічних характеристик, отримані композити зберігають достатній рівень міцності для використання в конструкційних елементах. Додатково встановлено покращення вогнестійких властивостей матеріалу завдяки використанню поліефірної матриці з антипіренами.

Nagaraj Nagaprasad та співавторами досліджено [8] вплив вмісту целюлозного наповнювача з відходів насіння фінікової пальми на механічні та теплові властивості композитів на основі вінілестерної смоли. Встановлено, що введення природного наповнювача істотно впливає на структуру та експлуатаційні характеристики матеріалу. Показано, що оптимальний вміст наповнювача становить близько 30 мас. %, при якому досягаються максимальні значення міцності на розтяг, згин, ударної в’язкості та твердості. Це пов’язано з рівномірним розподілом частинок наповнювача та ефективною міжфазною взаємодією з полімерною матрицею. Встановлено, що перевищення

оптимального вмісту наповнювача призводить до погіршення механічних характеристик унаслідок агломерації частинок і утворення пор у структурі композиту. Разом з тим, введення наповнювача сприяє підвищенню термічної стабільності матеріалу та температури теплового прогину.

Bekir Cihad Bal опублікував результати [9] дослідження впливу вмісту подрібненої шкаралупи грецького горіха та деревного борошна на механічні властивості деревинно-полімерних композитів на основі поліетилену високої щільності. Встановлено, що збільшення вмісту наповнювачів призводить до зростання густини матеріалу та зміни його структурних характеристик. Показано, що зі збільшенням частки наповнювача знижуються міцність при згині, міцність на розтяг, деформація при руйнуванні та відносне подовження, що пов’язано з погіршенням міжфазної адгезії між полімерною матрицею та лігноцелюлозними частинками. Водночас спостерігається зростання модуля пружності, що свідчить про підвищення жорсткості композиту. Встановлено, що використання шкаралупи грецького горіха як наповнювача призводить до більш вираженого зниження механічних характеристик порівняно з деревним борошном, що обумовлено відмінностями у хімічному складі та структурі матеріалів. Зокрема, вищий вміст лігніну в шкаралупі сприяє підвищенню крихкості композиту.

У роботі Mohammed A. Al-Sarraf досліджено [10] розробку екологічно безпечних поліпропіленових композитів, армованих порошком шкаралупи грецького горіха, з метою їх використання в автомобільній промисловості. Встановлено, що оптимальні механічні властивості досягаються при використанні частинок розміром 212 мкм та вмісті наповнювача 20 мас.%, що забезпечує ефективну передачу навантаження між матрицею та наповнювачем. Показано, що застосування комбінованої обробки (лужної та мікрохвильової) суттєво покращує адгезію між поліпропіленом і частинками шкаралупи за рахунок очищення поверхні, зменшення вмісту лігніну та підвищення кристалічності структури. Це призводить до зростання міцності на розтяг, модуля пружності та ударної в’язкості композитів. Найкращі результати

отримано при обробці 7% розчином NaOH, що забезпечує максимальне підвищення механічних характеристик.

У роботі Menderes Koyunucu та Göksel Ulay досліджено [11] вплив подрібненої шкаралупи грецького горіха як армувального наповнювача та пемзового порошку як додаткового наповнювача на властивості епоксидних композитів. Встановлено, що використання пемзового порошку сприяє покращенню міжфазної адгезії між наповнювачем і полімерною матрицею, що підтверджується мікроструктурними дослідженнями. Показано, що збільшення вмісту пемзового порошку до 40–50 мас.% забезпечує підвищення вогнестійкості композитів та зниження швидкості горіння, що дозволяє досягти класифікації V-2 за стандартом UL-94. Одночасно встановлено зростання міцності на розтяг, що обумовлено покращенням зв’язку між компонентами композиту та рівномірнішим розподілом наповнювача в матриці.

İdris Karagöz [12] та співавтори описали вплив малих концентрацій (1–3 мас.%) шкаралупи грецького горіха та тальку на фізико-механічні, теплові та морфологічні властивості епоксидних композитів. Встановлено, що навіть незначне введення природного наповнювача суттєво змінює характеристики матеріалу, зокрема температуру склування, щільність, твердість і водопоглинання. Показано, що введення шкаралупи грецького горіха сприяє підвищенню жорсткості та температури склування композиту за рахунок обмеження рухливості полімерних ланцюгів, тоді як тальк, навпаки, знижує ці показники, підвищуючи гнучкість матеріалу. При цьому встановлено синергетичний ефект при сумісному використанні обох наповнювачів, що забезпечує баланс між жорсткістю та пластичністю композиту.

Наукова група у складі Tummala Srinag [13] та інших дослідила механічні та теплові властивості біорозкладного композиту на основі природної матриці та порошку шкаралупи грецького горіха. Встановлено, що збільшення вмісту наповнювача суттєво покращує механічні характеристики матеріалу, зокрема міцність на розтяг і згин, що пояснюється ефективною передачею навантаження між матрицею та частинками наповнювача. Показано, що при

оптимальному вмісті наповнювача (близько 25 мас.%) спостерігається максимальне підвищення міцності, після чого відбувається її зниження внаслідок агломерації частинок та погіршення міжфазної адгезії. Водночас встановлено значне зростання ударної в’язкості композиту, що пов’язано зі здатністю частинок шкаралупи поглинати енергію та перешкоджати поширенню тріщин у матеріалі.

Menderes Koyuncu та Baran Erkek вивчали [14] вплив розміру частинок шкаралупи грецького горіха та введення пемзового порошку на водопоглинання та деформаційні характеристики епоксидних композитів. Встановлено, що використання шкаралупи горіха як армувального наповнювача дозволяє створювати екологічно безпечні композиційні матеріали на основі епоксидної смоли. Показано, що введення пемзового порошку (20 мас.%) сприяє зниженню водопоглинання композитів за рахунок зменшення гігроскопічності матеріалу та покращення міжфазної взаємодії. Це підтверджується експериментальними даними, згідно з якими композити з наповнювачем демонструють більш стабільну поведінку у вологому середовищі. Встановлено, що зі збільшенням вмісту жорсткого наповнювача відбувається зниження відносного подовження при розриві, що пов’язано з обмеженням рухливості полімерних ланцюгів та підвищенням жорсткості композиту. Крім того, визначено, що менший розмір частинок шкаралупи забезпечує кращі деформаційні властивості матеріалу.

K. Sunil Kumar та співавтори присвятили своє дослідження [15] вивченню механічних властивості епоксидних композитів, армованих сизалевим волокном та порошком шкаралупи горіха. Показано, що використання природних наповнювачів дозволяє отримувати екологічно безпечні матеріали з достатньо високими експлуатаційними характеристиками, що є актуальним для інженерних застосувань. Встановлено, що співвідношення компонентів суттєво впливає на механічні властивості композиту. Зокрема, за даними таблиці механічних випробувань максимальна міцність на розтяг досягається при вмісті 80% порошку шкаралупи та 20% волокна, що свідчить про значну армувальну роль дисперсного наповнювача. Дослідження також показало, що введення

порошку шкаралупи сприяє підвищенню жорсткості та міцності при згині, однак може знижувати ударну в’язкість матеріалу.

У роботі Satish Kumar Shejkar та співавторів досліджено [16] вплив розміру частинок шкаралупи грецького горіха (50, 75 та 100 мкм) і їх вмісту (5–20 мас.%) на механічні властивості епоксидних композитів. Встановлено, що введення наповнювача суттєво змінює характеристики матеріалу, зокрема підвищує твердість і міцність при стиску, що пов’язано з армувальним ефектом частинок.

Показано, що міцність при розтягуванні та згині зростає при введенні наповнювача до 10 мас.%, після чого спостерігається її зниження внаслідок агломерації частинок і погіршення міжфазної взаємодії. Максимальна міцність на розтяг (32,3 МПа) досягається при 10 мас.% наповнювача з розміром частинок 50 мкм, що на 21,88% більше порівняно з чистою епоксидною смолою. Встановлено, що розмір частинок є визначальним фактором: менші частинки забезпечують кращу дисперсію та більшу площу контакту з матрицею, що покращує адгезію і підвищує механічні характеристики. Зі збільшенням розміру частинок спостерігається зниження міцності та модуля пружності.

У роботі Raj Laxmikath та співавторів досліджено [17] вплив складу та технологічних параметрів (температура обробки волокна, вміст і розмір частинок шкаралупи грецького горіха) на механічні та фізичні властивості епоксидних композитів, армованих джутовим волокном і наповнених гіпсом та порошком шкаралупи горіха. Встановлено, що співвідношення компонентів суттєво впливає на експлуатаційні характеристики матеріалу, зокрема міцність, водопоглинання та набухання. Показано, що зі збільшенням вмісту порошку шкаралупи грецького горіха відбувається зниження міцності при розтягуванні, тоді як міцність при згині може зростати при оптимальному вмісті наповнювача (близько 5 мас.%). Максимальна міцність при згині (57,12 МПа) досягається

при підвищеній температурі обробки та відповідному складі композиту. Встановлено, що ударна в’язкість композитів практично не змінюється при варіюванні складу, що свідчить про низьку чутливість цієї характеристики до вмісту наповнювача.

İdris Karagöz та співавтори опублікували [18] результати досліджень механічних, термічних та морфологічних властивостей полімерних композитів на основі суміші полікарбонату (PC) та акрилонітрил-стирол-акрилату (ASA), наповнених порошком шкаралупи грецького горіха. Встановлено, що введення біологічного наповнювача у кількості 5–15 мас.% суттєво впливає на експлуатаційні характеристики матеріалу. Показано, що додавання порошку шкаралупи призводить до зростання жорсткості композиту, зокрема модуль пружності при згині збільшується майже на 20%. Водночас спостерігається зниження міцності при розтягуванні та ударної в’язкості (до 20–30%), що пояснюється слабкою адгезією між гідрофільним наповнювачем і полімерною матрицею.

Abothur Almohana та інші дослідили [19] вплив додавання нанорозмірного порошку шкаралупи грецького горіха на теплоізоляційні властивості епоксидних композитів. Встановлено, що введення природного наповнювача призводить до зниження теплопровідності матеріалу, що пов’язано з формуванням більш пористої структури та збільшенням кількості меж розділу фаз, які перешкоджають теплопереносу. Показано, що зі збільшенням вмісту наповнювача теплопровідність композиту зменшується, що свідчить про підвищення його теплоізоляційних характеристик. Це пояснюється наявністю повітряних пор у структурі та низькою теплопровідністю лігноцелюлозного наповнювача. Встановлено, що введення нанорозмірних частинок шкаралупи також впливає на щільність і структуру матеріалу, забезпечуючи більш ефективне розсіювання теплового потоку. При цьому зберігається достатній рівень механічних властивостей композиту, що дозволяє розглядати його як перспективний матеріал для теплоізоляційних застосувань.

Rasool R. K. Al-Arkawazi та співавтори дослідили [20] можливість використання композиційного матеріалу на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіха для армування 3D-друкованих виробів з полілактиду (PLA). Встановлено, що застосування аграрних відходів як наповнювачів дозволяє підвищити екологічність виробництва та знизити витрати матеріалів без суттєвої втрати експлуатаційних характеристик. Показано, що введення 35 мас.% шкаралупи горіха в епоксидну матрицю призводить до підвищення міцності композиту приблизно на 17% порівняно з чистою смолою, а також до зростання модуля пружності до 48%. Водночас відзначено зменшення відносного подовження та ударної в'язкості, що пов'язано з підвищенням крихкості матеріалу. Встановлено, що при використанні композиту в 3D-друкованих структурах максимальна міцність на розтяг досягає 30,94 МПа, що, хоча і нижче за чистий PLA, проте на 37% перевищує показники композиту без використання адитивних технологій. Дослідження показало, що механічні властивості значною мірою залежать від технологічних параметрів друку, зокрема товщини стінок, кута друку та щільності заповнення. Встановлено, що оптимальні властивості досягаються при куті друку 50°, щільності заповнення 15% та трьох шарах стінок. Отримані результати підтверджують доцільність використання композицій на основі епоксидної смоли та шкаралупи горіха в сучасних технологіях виробництва, зокрема в адитивному виробництві, що відкриває перспективи створення екологічно безпечних та економічно ефективних матеріалів.

Bekir Çevik та Yücel Avşar розробили підходи до отримання біокомпозитів на основі біосмоли, армованих порошком шкаралупи грецького горіха як агропромислового відходу та вивчили їх властивості [21]. Показано, що використання таких відходів дозволяє вирішувати екологічні проблеми утилізації та сприяє розвитку циркулярної економіки. Встановлено, що шкаралупа грецького горіха має лігноцелюлозну структуру (приблизно 50% лігніну, 25% целюлози та 23% геміцелюлози), що робить її придатною як наповнювач для полімерних композитів. Експериментально встановлено, що

оптимальний вміст наповнювача становить близько 2 мас.%, при якому досягається максимальна міцність на розтяг (60,2 МПа), що перевищує показники базового матеріалу. При подальшому збільшенні вмісту наповнювача (4–8%) спостерігається зниження міцності через агломерацію частинок та утворення дефектів у структурі матеріалу. Показано, що модуль пружності біокомпозитів зростає більш ніж на 100% порівняно з чистою матрицею, однак при цьому значно зменшується відносне подовження (до 50–68%), що свідчить про підвищення крихкості матеріалу. Результати випробувань ударної в'язкості показали суттєве зниження (на 80–85%) при введенні наповнювача, що пояснюється наявністю пор та концентраторами напружень у структурі композиту. Також встановлено, що збільшення вмісту шкаралупи горіха підвищує водопоглинання матеріалу (до 1,02%), що пов'язано з гігроскопічною природою лігноцелюлозних компонентів.

У роботі Rasool R. K. Al-Arkawazi та співавторів досліджено [22] вплив порошку шкаралупи грецького горіха на механічні властивості деревно-полімерних композитів на основі поліетилену високої щільності з додаванням полікарбонату, отриманих методом лиття під тиском. Показано, що використання шкаралупи горіха як наповнювача є перспективним з точки зору утилізації агровідходів та створення екологічно безпечних матеріалів, які можуть застосовуватися у будівництві, автомобільній та електротехнічній промисловості. Експериментальні результати показали, що при вмісті 20 мас.% шкаралупи грецького горіха та відсутності полікарбонату досягається максимальна міцність на розтяг (34,34 МПа), що приблизно на 8% перевищує показники базового полімеру (HDPE). Встановлено, що введення полікарбонату не покращує механічні властивості композиту, а при його високому вмісті (15%) навіть призводить до їх погіршення через несумісність з поліетиленовою матрицею. Міцність при згині зростає приблизно на 30% порівняно з чистим полімером і досягає 33,1 МПа при оптимальному складі матеріалу. Разом з тим встановлено, що ударна в'язкість зменшується (приблизно на 34%) із

збільшенням вмісту наповнювача, що пояснюється появою концентрації напружень у структурі композиту.

Узагальнення наведених літературних даних свідчить, що подрібнена шкаралупа грецького горіха є перспективним лігноцелюлозним наповнювачем для створення екологічно орієнтованих полімерних композитів на основі епоксидних, поліефірних, полілактидних, поліпропіленових, вінілестерних та інших матриць. Її використання дає змогу частково замінити синтетичні компоненти, знизити собівартість матеріалів, залучити агропромислові відходи до повторного використання та підвищити ресурсоефективність виробництва. Встановлено, що вплив такого наповнювача на властивості композитів є неоднозначним і значною мірою залежить від природи полімерної матриці, розміру частинок, концентрації, способу попередньої обробки та якості міжфазної взаємодії. За оптимального вмісту шкаралупа горіха може підвищувати жорсткість, модуль пружності, твердість, міцність при стиску або згині, температуру склування, теплоізоляційні та вогнестійкі характеристики. Водночас надмірне введення наповнювача часто спричиняє агломерацію частинок, зростання пористості й водопоглинання, зниження ударної в’язкості, відносного подовження та міцності при розтягуванні. Особливе значення має фізична або хімічна модифікація поверхні наповнювача, зокрема лужна обробка, дія карбонових кислот чи комбіновані методи, які покращують адгезію з матрицею та стабілізують структуру матеріалу. Отже, подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію складу, дисперсності й модифікації шкаралупи грецького горіха для отримання епоксидних композитів із прогнозованими механічними, декоративними, теплофізичними та експлуатаційними властивостями, придатних для ремонтно-відновлювальних і конструкційних застосувань.

2 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ ЕПОКСИДНОЇ СМОЛИ ТА ПОДРІБНЕНОЇ ШКАРАЛУПИ ГРЕЦЬКОГО ГОРІХУ.

2.1 Полімерні композиційні матеріали та їх типи

Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) – це багатокомпонентні системи, у яких полімерна матриця поєднується з наповнювачем або армуючим компонентом, що відрізняється від неї за природою, структурою та функціональним призначенням. Матриця забезпечує монолітність матеріалу, зв’язує компоненти, передає навантаження між частинками або волокнами та захищає їх від дії зовнішнього середовища. Наповнювачі надають композиту потрібних механічних, теплофізичних, електричних, бар’єрних, декоративних або спеціальних експлуатаційних властивостей [22].

Головна перевага ПКМ полягає у можливості цілеспрямовано регулювати властивості шляхом добору полімерної матриці, типу наповнювача, його кількості, форми, розміру частинок, орієнтації та характеру міжфазної взаємодії. Такі матеріали можуть поєднувати малу густину з достатньою міцністю, хімічну стійкість із технологічністю переробки, а також забезпечувати підвищену зносостійкість, теплостійкість, електроізоляційні або електропровідні властивості. Водночас ефективність ПКМ залежить від сумісності компонентів, рівномірності розподілу наповнювача, змочуваності полімером і міцності адгезії на межі поділу фаз [22].

ПКМ класифікують за кількома ознаками. За кількістю компонентів вони можуть бути двокомпонентними або полікомпонентними, зокрема трикомпонентними, гібридними поліволокнистими чи поліматричними системами. За природою матриці розрізняють композити на основі термореактивних, термопластичних і гібридних полімерів. За природою наповнювача виділяють органічні, неорганічні та комбіновані ПКМ, а за формою армуючих компонентів – дисперснонаповнені, волокнисті,

пластинчасті та комбіновані матеріали. За структурою композити поділяють на матричні та шаруваті; останні складаються з послідовних шарів полімеру й іншого матеріалу, наприклад металу, кераміки, паперу, тканини або шпону. Залежно від орієнтації наповнювача ПКМ можуть бути ізотропними, квазіізотропними або анізотропними, з одно-, дво- чи тривимірною схемою армування [22]. За технологією виготовлення розрізняють просичені, пресовані, литі, формовані, намотані, екструдовані та комбіновані матеріали. За вмістом наповнювача виділяють низькоармовані, армовані, високоармовані та граничноармовані системи, а за призначенням – конструкційні, антикорозійні, антифрикційні, електротехнічні, ізоляційні та функціональні матеріали [22].

ПКМ із дисперсним наповнювачем у вигляді порошків, лусочок або коротких волокон називають дисперсно наповненими. Матеріали, що містять довгомірні армувальні елементи – волокна, сітки, тканини або стрічки, – відносять до армованих [22]. Назва таких матеріалів часто відображає природу армувального компонента: склопластики містять скляні волокна, вуглепластики – вуглецеві, органопластики – органічні, базальтопластики – базальтові, боропластики – борні; у повнішому варіанті назва може одночасно характеризувати і матрицю, і наповнювач, наприклад епоксисклопластик або поліамідний органопластик [22].

Як полімерні матриці використовують термореактивні, термопластичні та модифіковані або гібридні в’яжучі [22]. Термореактивні полімери після затвердіння формують просторово-сітчасту структуру, що забезпечує високу теплостійкість, хімічну стійкість і стабільність форми; їх перевагою є низька в’язкість вихідних олігомерів і добра здатність просочувати наповнювачі [22]. До недоліків належать обмежений час зберігання напівфабрикатів, можливе використання токсичних розчинників, пористість і триваліший цикл формування, а також вкрай обмежені можливості переробки [22].

Фенолформальдегідні полімери є класичними термореактивними матрицями для фенопластів, текстолітів і шаруватих пластиків. Їх переваги пов’язані з доступністю сировини, низькою вартістю, теплостійкістю,

механічною міцністю, кислотостійкістю та добрими електроізоляційними властивостями. Недоліками є крихкість, темне забарвлення і технологічні обмеження процесу затвердіння [22].

Фуранові полімери утворюються з фурфуролу, фурфурилового спирту та споріднених фуранових сполук. Вони цінні завдяки високій хімічній і термічній стійкості, великому коксовому залишку та можливості одержання щільного карбонізованого продукту. Основні недоліки пов’язані з потребою у кислотному каталізі, контролі умов тверднення та обмеженою універсальністю застосування [22].

Кремнійорганічні полімери, насамперед поліорганосилоксани, містять у ланцюзі зв’язки Si–O, що зумовлюють їх високу термо-, морозо-, світло- й атмосферостійкість. Вони також мають добрі діелектричні властивості та стійкість до слабких кислот і лугів. Їх обмеженням є нижчі механічні характеристики порівняно з високоміцними конструкційними матрицями та відносно висока вартість окремих марок [22].

Епоксидні смоли є одними з найпоширеніших матриць для конструкційних ПКМ. Їх переваги полягають у високій адгезії до скла, металів, деревини, кераміки та багатьох наповнювачів, малій усадці, відсутності летких побічних продуктів під час тверднення, хімічній стійкості й добрих електроізоляційних властивостях. Недоліками можуть бути крихкість немодифікованої матриці, залежність властивостей від типу твердника і потреба в точному дотриманні режиму затвердіння [22].

Поліміди належать до високотермостійких полімерів, які зберігають механічні й фізико-хімічні властивості в широкому температурному інтервалі. Їх перевагами є теплостійкість, радіаційна стійкість, негорючість і стійкість до органічних розчинників та мастил [22]. Основні недоліки – складність переробки, висока температура формування і вища вартість порівняно з епоксидними або фенольними матрицями [22].

Термопластичні полімери не утворюють незворотної сітчастої структури, тому можуть розм’якшуватися під час нагрівання і перероблятися повторно. Їх

використання дає змогу зменшити пористість, підвищити ударну в’язкість, продуктивність формування та в окремих випадках розширити температурний інтервал експлуатації. Недоліками є висока в’язкість розплавів, складніше просочення армувальних матеріалів і потреба у вищих температурах переробки [22].

Поліолефіни, зокрема поліетилен і поліпропілен, є доступними великотоннажними термопластами. Вони мають низьку густину, добру хімічну стійкість, діелектричні властивості й технологічність; поліпропілен додатково характеризується більшою жорсткістю і теплостійкістю. Недоліками є обмежена теплостійкість, низька поверхнева енергія та складність забезпечення високої адгезії до полярних наповнювачів [22].

Полівінілхлорид використовується у жорсткому та пластифікованому стані. Жорсткий ПВХ має механічну міцність, водо- і хімічну стійкість та добрі діелектричні властивості, тоді як пластифікований ПВХ відзначається гнучкістю і морозостійкістю. Недоліками є обмежена теплостійкість, невисока ударна міцність жорстких композицій і потреба у стабілізаторах [22].

Поліаміди, поліформальдегід, полікарбонат, поліетилентерефталат, полісульфони, фторполімери та поліфеніленсульфід належать до конструкційних або спеціальних термопластів [22]. Їх переваги пов’язані з підвищеною міцністю, зносостійкістю, теплостійкістю, хімічною стійкістю або особливими електричними властивостями. Недоліки залежать від природи полімеру: поліаміди поглинають вологу, фторполімери схильні до повзучості, а високотермостійкі термопласти потребують складних режимів формування [22].

Наповнювачі ПКМ поділяють на дисперсні, волокнисті, пластинчасті, листові, стрічкові та комбіновані. Дисперсні наповнювачі є порошкоподібними речовинами органічної або неорганічної природи. Вони можуть знижувати вартість матеріалу, підвищувати жорсткість, твердість, теплопровідність, електропровідність, бар’єрні або антифрикційні властивості, але за надмірного вмісту часто збільшують в’язкість композиції та крихкість виробів [22].

Карбонат кальцію, каолін, тальк і діоксид кремнію є поширеними мінеральними наповнювачами. Крейда дешева, біла, технологічна й широко використовується у ПВХ, поліпропілені та поліефірних композиціях, але має переважно помірний зміцнювальний ефект [22]. Каолін і тальк завдяки пластинчастій формі підвищують жорсткість і електричні характеристики, проте можуть погіршувати диспергування або збільшувати в'язкість; кварцові наповнювачі поліпшують теплостійкість і стабільність розмірів, але спричиняють абразивне зношування обладнання [22].

Металеві порошки, сажа, графіт і дисульфід молібдену застосовуються для надання спеціальних властивостей. Металеві порошки підвищують тепло- й електропровідність, магнітні характеристики та екранувальну здатність, але збільшують густину композиту. Сажа може виконувати роль пігменту, УФ-стабілізатора й електропровідної добавки; графіт і MoS_2 знижують коефіцієнт тертя та підвищують зносостійкість, проте змінюють колір і механічну поведінку матеріалу [22].

Органічні дисперсні наповнювачі охоплюють деревне борошно, порошки шкаралупи горіхів, крохмаль, хітин, хітозан, гумову крихту та порошкоподібні полімери. Їх перевагами є доступність, низька густина, можливість використання відновлюваної сировини та надання декоративних або біодеструктивних властивостей. Недоліками є вологопоглинання, нижча термо- і хімічна стійкість та залежність властивостей від походження і дисперсності сировини [22].

Мікросфери й порожнисті мікросфери використовують для зниження густини, регулювання в'язкості та підвищення стійкості до стискання. Скляні, вуглецеві або полімерні мікросфери дозволяють вводити значну кількість наповнювача без різкого зростання в'язкості. Їх недоліками є чутливість до руйнування під час інтенсивного змішування та обмеження за допустимим тиском і температурою.

Волокнисті наповнювачі забезпечують найефективніше армування ПКМ. Скляні волокна є найбільш поширеними завдяки доступності, міцності,

хімічній стійкості та добрим електроізоляційним властивостям, однак вони крихкі й чутливі до поверхневої вологи [22]. Базальтові волокна мають природне мінеральне походження, добру адгезію до епоксидних і фенольних матриць та високі механічні показники, але характеризуються темним забарвленням [22]. Вуглецеві волокна забезпечують високу міцність, жорсткість, електро- і теплопровідність та низький коефіцієнт термічного розширення, проте потребують поверхневої обробки для поліпшення адгезії й мають відносно низькі ударні характеристики композитів [22].

Арамідні та інші високоміцні органічні волокна поєднують малу густину, високу міцність і теплостійкість. Їх ефективність зумовлена орієнтованою будовою макромолекул і високою кристалічністю, що забезпечує значну міцність у напрямку волокна. Недоліками є анізотропія властивостей, нижча міцність у поперечному напрямку, чутливість до стиску і зсуву [22].

Природні рослинні волокна, зокрема льон, конопля і бавовна, є легкими, доступними та відновлюваними армувальними компонентами. Вони можуть застосовуватися у декоративних, будівельних і малонавантажених конструкціях. Їх обмежують підвищене вологопоглинання, нижча біо- та хімічна стійкість і менша міцність порівняно зі скляними, базальтовими або вуглецевими волокнами [22].

Пластинчасті, листові та стрічкові наповнювачі, зокрема слюда, скляні лусочки, тканини, папір, шпон, скломати й стрічки, формують шарувату або орієнтовану структуру композиту. Вони підвищують жорсткість, бар’єрні властивості та стабільність форми, але є чутливими до дефектів, міжшарового руйнування й якості просочення матрицею [22].

2.2 Технологія виготовлення полімерних композиційних матеріалів

Технологія формування полімерних композиційних матеріалів є сукупністю послідовних операцій, спрямованих на створення структури матеріалу з необхідними технологічними та експлуатаційними властивостями. Основу такого процесу становить поєднання полімерного зв'язуючого з наповнювачем, рівномірний розподіл компонентів у системі, формування виробу та закріплення його структури внаслідок охолодження, твердnення або інших фізико-хімічних перетворень [22].

Полімерна матриця може містити власне полімер або олігомер, стабілізатори, пластифікатори, пігменти та інші функціональні добавки. Основа полімерної композиції після завершення процесу формування переходить у матрицю, яка об'єднує всі компоненти в єдиний матеріал. Залежно від природи полімеру й наповнювача застосовують різні технологічні схеми, однак у загальному вигляді процес отримання ПКМ включає підготовку вихідних компонентів, змішування або просочення, формування заготовки чи виробу, ущільнення, твердnення або охолодження, а також подальшу технологічну обробку [22].

Важливою особливістю ПКМ є те, що їхні властивості значною мірою визначаються не лише хімічною природою компонентів, а й характером їх розподілу в об'ємі матеріалу. Тому однією з ключових стадій є формування дисперсної або армованої структури. У процесі змішування наповнювач має бути рівномірно розподілений у полімерній фазі без надмірної агломерації частинок, руйнування волокон або утворення локальних дефектів. У випадку наповнених пластмас особливого значення набувають розмір, форма, питома поверхня, пористість і стан поверхні частинок наповнювача, оскільки ці параметри визначають змочування, адгезію, реологічні властивості композиції та кінцеві характеристики матеріалу [22].

Одним із найпоширеніших варіантів є отримання дисперснонаповнених ПКМ. Такі матеріали формують шляхом введення в полімерну масу порошкоподібних, зернистих або коротковолокнистих наповнювачів. Дисперсні наповнювачі використовують для надання матеріалам спеціальних

властивостей, покращення технологічних характеристик, здешевлення виробництва, збільшення довговічності та розширення асортименту пластмас. Їхній вміст може змінюватися в широких межах і в окремих випадках досягати значної частки від маси композиції [22].

Формування дисперснонаповнених ПКМ супроводжується одночасним перебігом кількох процесів: розподілом вихідних компонентів, змочуванням поверхні наповнювача полімером або олігомером, руйнуванням агломератів, утворенням міжфазного контакту, а також зміною структури системи під дією механічних, теплових і фізико-хімічних чинників. Якість матеріалу залежить від того, наскільки повно частинки наповнювача змочуються зв’язуючим і наскільки стабільно вони розподілені в об’ємі композиції. Недостатнє змочування або збереження агломератів призводить до неоднорідності, зниження міцності та погіршення експлуатаційних властивостей [22].

Підготовка наповнювача є необхідною стадією технології. Вона передбачає подрібнення, класифікацію за розміром, сушіння, видалення домішок, а за потреби – модифікацію поверхні. Для порошкоподібних наповнювачів важливими є гранулометричний склад, питома поверхня, насипна густина, форма частинок, пористість і вологість. Частинки можуть мати сферичну, пластинчасту, волокнисту або неправильну форму, що впливає на сипучість, здатність до ущільнення, в’язкість суміші та механічні властивості готового ПКМ [22].

Зменшення розміру частинок збільшує їхню сумарну поверхню, а отже, підвищує потребу в полімерному зв’язуючому для змочування. Якщо кількість полімеру недостатня, частина поверхні залишається незмоченою, що ускладнює формування однорідної системи. Пористі наповнювачі додатково поглинають полімер, тому під час рецептурного розрахунку необхідно враховувати як зовнішню поверхню частинок, так і об’єм внутрішніх пор. Максимальний вміст наповнювача обмежується можливістю збереження суцільної полімерної фази та достатньої технологічної рухливості композиції [22].

Вологість наповнювача є одним із критичних параметрів. Наявність води ускладнює змочування, може викликати пороутворення, знижувати адгезію на межі поділу фаз і погіршувати властивості виробів. Тому наповнювачі перед змішуванням зазвичай висушують у поличних, шахтних, барабанних, камерних, стрічкових або бункерних сушарках. Температура сушіння залежить від природи матеріалу і може змінюватися у широких межах. Для гігроскопічних порошків застосовують бункер-сушарки, які забезпечують подачу вже висушеного матеріалу безпосередньо до зони переробки [22].

Поверхнева обробка наповнювачів використовується для покращення їх взаємодії з полімерною матрицею. Модифікація може полягати в очищенні поверхні, зниженні вологості, зміні кислотно-основних характеристик або введенні функціональних груп, здатних взаємодіяти зі зв’язуючим. У процесі обробки можуть застосовуватися поверхнево-активні речовини, апрети, пластифікатори, каталізатори або інші добавки. Така підготовка сприяє кращому змочуванню, зменшенню агломерації частинок, підвищенню міцності міжфазного контакту та стабілізації властивостей ПКМ [22].

Підготовка полімерного зв’язуючого залежить від його природи. До складу полімерної композиції можуть входити стабілізатори, пластифікатори, модифікатори, барвники та інші добавки, які забезпечують необхідні реологічні, технологічні або експлуатаційні характеристики. Якщо полімер під час змішування не переходить у пластичний чи в’язкотекучий стан, він повинен бути подрібнений до порошку та мати достатню здатність до рівномірного розподілу в системі. У разі використання розплавів або розчинів полімерів важливими параметрами є в’язкість, температура, концентрація та стабільність системи.

Змішування є центральною технологічною стадією отримання дисперснонаповнених ПКМ. Його метою є рівномірне розміщення наповнювача у полімерній фазі та утворення однорідної композиції. Процес включає переміщення компонентів у змішувальному об’ємі, руйнування агломератів, контакт частинок із полімером, змочування поверхні та поступове формування

стабільної структури. Залежно від агрегатного стану компонентів розрізняють змішування сипких матеріалів, рідин із твердими частинками, розплавів, пастоподібних систем і високов'язких композицій [22].

Для сипких компонентів змішування може відбуватися шляхом дифузійного, конвективного або зсувного переміщення частинок. Дифузійне змішування пов'язане з випадковим переміщенням окремих частинок, конвективне – з переміщенням значних об'ємів матеріалу, а зсувне – з переміщенням шарів один відносно одного. Ефективність процесу залежить від форми й розміру частинок, насипної густини, здатності до сегрегації, коефіцієнта внутрішнього тертя та конструкції змішувального обладнання. Надмірно тривале перемішування може бути недоцільним, оскільки після досягнення оптимальної однорідності можливе повторне розшарування суміші [22].

Для змішування порошкоподібних і гранульованих полімерів із наповнювачами застосовують барабанні змішувачі. У таких апаратах матеріал пересипається під час обертання барабана, а інтенсивність перемішування залежить від частоти обертання, ступеня заповнення та форми апарата. При надто повільному русі відбувається лише незначне переміщення шарів, тоді як надто висока швидкість може призвести до притискання матеріалу до стінок барабана без ефективного перемішування. Найкраща якість суміші досягається за оптимального режиму руху матеріалу і відповідного заповнення робочого об'єму [22].

Для підвищення інтенсивності процесу барабанні змішувачі можуть оснащуватися внутрішніми елементами: ребрами, лопатями, перегородками або іншими пристроями, які порушують рівномірне пересипання матеріалу та посилюють переміщення частинок. Швидкісні барабанні змішувачі з пропелерними або лопатевими пристроями забезпечують активніше перемішування сипких композицій, особливо тоді, коли суміш містить значну кількість дрібних або різнорозмірних частинок [22].

Високов’язкі полімерні композиції з твердими наповнювачами змішують у спеціальному обладнанні, здатному створювати значні зсувні напруження. До таких апаратів належать вальці, роторні та шнекові змішувачі, змішувачі закритого типу, а також екструзійні пристрої. Для таких систем характерним є не лише перемішування, а й деформація, ущільнення, нагрівання та часткове диспергування компонентів. У процесі змішування високов’язких композицій важливо уникати перегрівання, руйнування наповнювача та нерівномірного розподілу фаз [22].

Вальці застосовують для отримання композицій на основі полімерів і наповнювачів, коли необхідне інтенсивне механічне перемішування. Компоненти багаторазово проходять через зазор між валками, унаслідок чого відбуваються зсувні деформації, розподіл наповнювача, руйнування агломератів і формування однорідної маси. На якість змішування впливають величина зазору між валками, швидкість їх обертання, температура, об’єм завантаження та тривалість процесу.

Роторні змішувачі закритого типу використовують для змішування високов’язких мас, паст і композицій із значним вмістом наповнювачів. У таких апаратах матеріал переміщується між роторами та стінками камери, зазнаючи інтенсивного зсуву, стискання й деформації. Завдяки закритій конструкції зменшуються втрати матеріалу, покращується контроль температури та забезпечується більш рівномірне оброблення суміші. Двороторні змішувачі дають змогу отримувати композиції з високою однорідністю, проте потребують точного регулювання режиму [22].

Безперервне змішування має переваги у великотоннажному виробництві, оскільки забезпечує стабільну подачу компонентів, продуктивність і рівномірність складу. Для цього використовують одно- та двошнекові екструдери, дискові, роторно-черв’ячні та інші апарати. У процесі безперервного змішування компоненти подаються дозаторами, переміщуються робочими органами, нагріваються, ущільнюються, змішуються та

вивантажуються у вигляді гранул, стрічок, прутків або іншої форми напівфабрикату [22].

Після змішування композицію часто піддають гранулюванню. Гранули повинні мати достатню сипучість, міцність, стабільні розміри та здатність рівномірно подаватися в переробне обладнання. Гранулювання може здійснюватися через формувальні отвори з подальшим охолодженням і різанням, а також у процесі екструзійної переробки. Для різних типів полімерів і наповнювачів форма та розміри гранул можуть відрізнятися; зокрема, для термопластів застосовують гранули меншого розміру, тоді як для композицій із короткими волокнами довжина гранул може бути більшою [22].

Формування виробів із ПКМ полягає у наданні композиції заданої геометричної форми та фіксації структури. Для термопластичних систем основними стадіями є нагрівання до в’язкотекучого стану, заповнення форми, ущільнення, охолодження та вилучення виробу. Для термореактивних систем важливими є просочення наповнювача, формування заготовки, видалення надлишку зв’язуючого або повітря, тверднення та завершення реакцій структурування. У випадку армованих матеріалів додатково враховують орієнтацію волокон, ступінь просочення, щільність укладання шарів і вміст зв’язуючого [22].

2.3 Дослідження властивостей компонентів полімерного композиційного матеріалу

Доцільність використання подрібненої шкаралупи грецького горіху як дисперсного наповнювача для полімерних композиційних матеріалів обґрунтовується сукупністю екологічних, технологічних і функціональних чинників, узагальнених у літературному огляді. Додаткове значення має природне забарвлення та текстура частинок шкаралупи, завдяки чому

композити на її основі можуть мати привабливий зовнішній вигляд і використовуватися не лише як конструкційно-ремонтні, а й як декоративно-оздоблювальні матеріали. Враховуючи зазначене нами було вирішено розробити технологію виготовлення композиційного матеріалу на основі названого наповнювача та епоксидної смоли. Це дозволить поєднати утилізацію доступної біосировини та можливість одержання матеріалів із комплексом корисних фізико-механічних і декоративних властивостей, що є особливо актуальним для створення ремонтних композицій на основі епоксидних смол.

На першому етапі досліджень нами було вивчено властивості наповнювача а саме подрібненої шкаралупи грецького горіху.

2.3.1. Визначення насипної густини подрібненої шкаралупи грецького горіху

Визначення насипної густини подрібненої шкаралупи грецького горіху є необхідним для оцінки її технологічних властивостей як дисперсного наповнювача та прогнозування поведінки під час дозування, змішування й формування полімерної композиції. Цей показник також дає змогу раціонально розрахувати співвідношення між масою та об’ємом наповнювача, що важливо для забезпечення відтворюваності складу композиту.

Насипна густина – це маса сипкого матеріалу, що припадає на одиницю займаного ним об’єму з урахуванням проміжків між частинками.

Методика визначення насипної густини полягала у заповненні мірного циліндра певним об’ємом подрібненої шкаралупи без додаткового ущільнення, після чого зразок зважували на лабораторних терезах. Насипну густину розраховували як відношення маси внесеного матеріалу до об’єму, який він займав у мірному циліндрі, за формулою 2.1:

$$\rho н = m / V \quad (2.1)$$

де ρн – насипна густина, г/см³;

m – маса зразка, г;

V – об’єм матеріалу, см³.

Вибір робочого об’єму 250 мл для визначення насипної густини подрібненої шкаралупи грецького горіху узгоджується з технічними підходами, наведеними в ASTM D7481-18, де для порошків і гранульованих матеріалів із розміром частинок до 3,5 мм передбачено використання мірних циліндрів об’ємом 100 мл або 250 мл [23].

Маса зразку становила 50.0000 г (точна наважка зважена на вагах Radwag AS220.R2). Визначений об’єм склав 145 мл. Таким чином насипна густина порошку подрібненої шкаралупи горіху склала 0,345 г/см^3. Одержані дані узгоджуються з результатами, що одержані з літературних джерел [24].

2.3.2 Визначення вмісту вологи в подрібненій шкаралупі грецького горіху

Наповнювачі, зокрема гігроскопічні матеріали з розвиненою питомою поверхнею, здатні адсорбувати вологу з повітря на поверхні або в об’ємі частинок, а в окремих випадках – зв’язувати воду внаслідок хімічної взаємодії. Масову частку вологи та летких речовин у наповнювачах, полімерних порошках або гранулах визначають методом висушування до сталої маси за заданих умов із подальшим розрахунком за формулою:

$$X = \left(\frac{m1-m2}{m1}\right) * 100 \quad (2.2)$$

де X – вміст вологи та летких речовин, %;

m□ – маса наважки до сушіння;

m□ – маса наважки після сушіння.

Присутність вологи в дисперсних матеріалах негативно впливає на їхні технологічні властивості, оскільки спричиняє агломерацію частинок, зниження сипучості, ускладнення дозування та погіршення рівномірності змішування компонентів. Крім того, залишкова волога може зумовлювати формування пор, внутрішніх дефектів і погіршення якості готового полімерного композиту.

Визначення вмісту вологи та летких речовин у подрібненій шкаралупі грецького горіху проводили за гравіметричним принципом, який відповідає підходам описаним в [25]. Сутність методу полягає у висушуванні наважки матеріалу вагою близько 10 г (точна наважка) за температури 105 °С протягом 2 годин з подальшим визначенням втрати маси, яку виражають у відсотках від початкової маси зразка. Зважування проводили на аналітичних вагах Radwag AS220.R2. Одержані дані представлені в табл. 1.

Встановлено, що вміст вологи та летких речовин в наповнювачі складає (8,91±0,05) %. Зазначений факт підтверджує доцільність типової для технології полімерних композиційних матеріалів стадії підготовки наповнювача, а саме сушіння дисперсного наповнювача. Необхідність цього етапу пов’язана з тим, що адсорбована дисперсним наповнювачем вода зменшує спорідненість поверхні до полімеру, що негативно позначається на механічних властивостей полімеру.

Таблиця 2.1 – Результати дослідження вмісту вологи та летких речовин в подрібненій шкаралупі грецького горіху

Маса зразка до висушування, г	Маса зразка до висушування, г	Вміст вологи та летких речовин, %
10,1435	9,2346	8,96
10,0876	9,1898	8,90
10,0424	9,1587	8,83

10,1097	9,2059	8,94
9,8794	8,9981	8,92
Середній вміст вологи та летких речовин, %		8,91±0,05

2.3.3 Виготовлення зразків ПКМ з різною наповненістю та їх властивості

2.3.3.1 Технологічна схема виготовлення ПКМ

Одним з важливих показників ПКМ є ступінь його наповненості, тобто відсотковий вміст наповнювача. Зазначений показник впливає як на механічні властивості, так і на вартість та здатність виконувати декоративні функції. Ступінь наповнення ПКМ може варіювати в широких межах [22], а визначення оптимального вмісту наповнювача визначається експериментально. Враховуючи зазначене було вирішено виготовити експериментальні зразки ПКМ з різним вмістом наповнювача та дослідити його механічні властивості. Було вирішено виготовити зразки з вмістом наповнювача 10%, 30% та 50%. Також були виготовлені зразки на основі чистого полімеру. В якості полімеру – матриці була використана епоксидна смола ЕД-20 з отверджувачем поліетиленполіаміном (ПЕПА). Експериментальні зразки були виготовлені за технологічною схемою, що представлена на рис. 2.1.

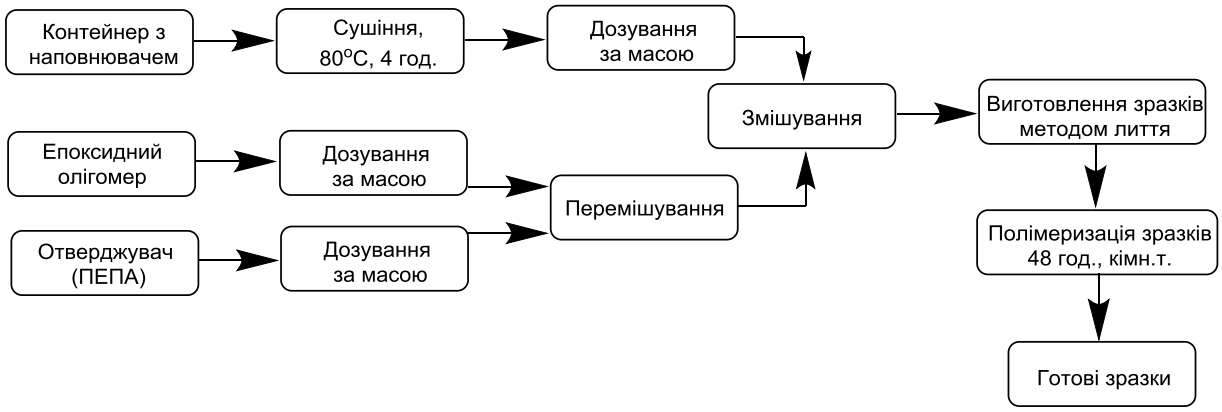
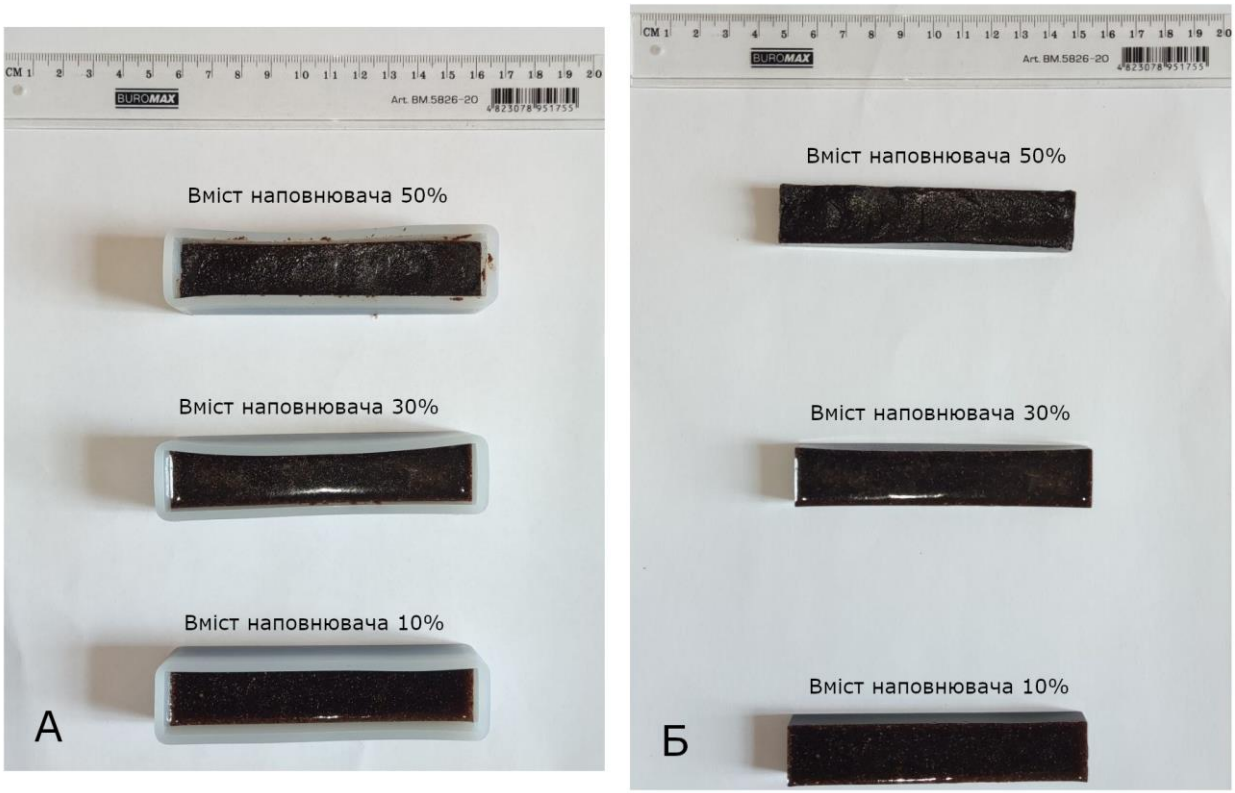


Рисунок 2.1 – Технологічна схема виготовлення зразків ПКМ



А – зразки в силіконовій формі до полімеризації; Б – зразки після полімеризації;

Рисунок 2.2 – Зразки ПКМ

Відповідно до запропонованої технологічної схеми подрібнену шкаралупу грецького горіху піддавали висушуванню в сушильній шафі з терморегулятором. Висушування проводили при температурі 80°С протягом 4 годин. Епоксидний олігомер ЕД-20 перемішували з отверджуючим реагентом ПЕПА у співвідношенні 9:1 та піддавали інтенсивному перемішуванню протягом хвилин. Далі полімер змішували з наповнювачем у відповідній пропорції та заливали в силіконові форм. В кожну форму заливали 20,00 г

суміші та залишали на 48 годин при кімнатній температурі для полімеризації. Одночасно було одержано зразок без наповнювача.

В процесі виготовлення зразків було зауважено, що при виготовленні зразку з вмістом наповнювача 50% неотверджена суміш мала високу в’язкість, що значно ускладнювало формування зразку методом лиття. Зображення зразків представлено на рис. 2.2.

Для подальших досліджень, а саме для визначення механічних властивостей та густини, одержані зразки були піддані шліфуванню (рис. 2.3).

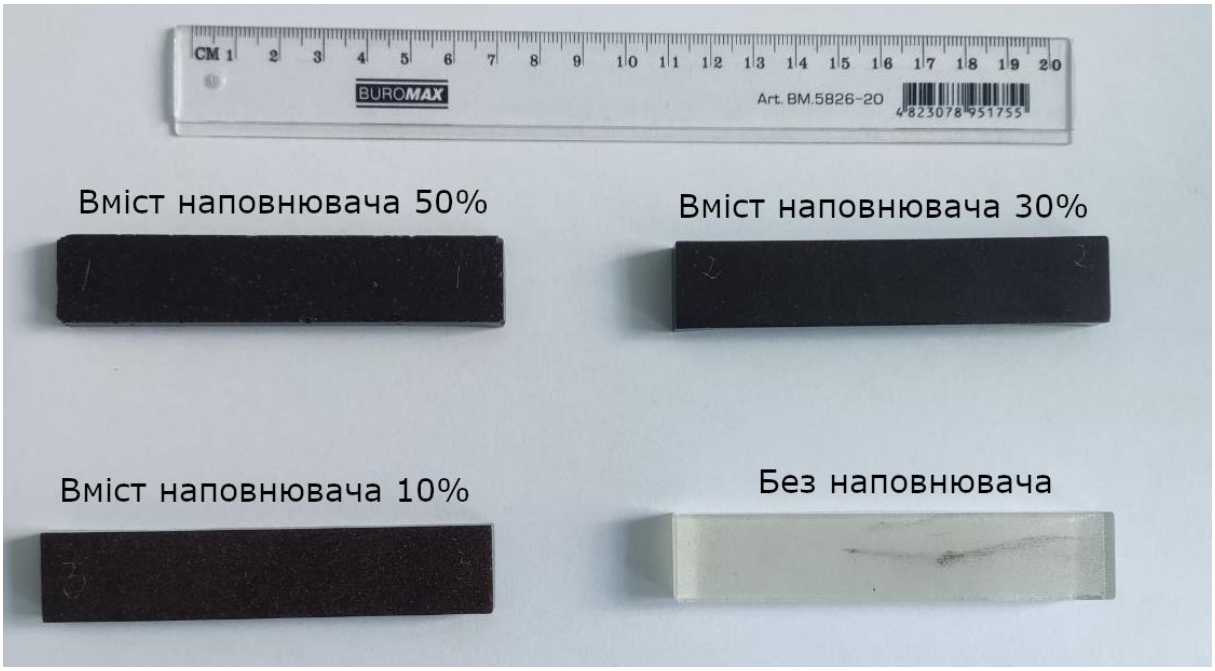


Рисунок 2.3 – Зразки ПКМ після шліфування

2.3.3.2 Визначення густини матеріалу

Враховуючи, що густина ПКМ відноситься до найбільш цінних його властивостей нами встановлено густину одержаних зразків з різною ступінню наповненості та ненаповненого полімерного матеріалу. Результати досліджень приведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати визначення густини зразків ПКМ

Зразок	Об’єм зразку, $см^3$	Маса зразку, г	Густина, $г/см^3$
ПКМ 50% наповнення	13,21	14,8161	1,12
ПКМ 30% наповнення	15,10	18,1570	1,20
ПКМ 10% наповнення	15,62	18,4283	1,18
Ненаповнений полімер	17,15	18,6994	1,09

Результати дослідження показали, що зразки мають близькі значення густини в межах 1,09-1,20 $г/см^3$. Зразок ПКМ з 30% вмістом наповнювача характеризувався найвищою густиною (1,20 $г/см^3$). Близьке значення густини було у ПКМ з вмістом наповнювача 10% (1,18 $г/см^3$). З наповнених матеріалів найнижча густина була характерна для зразку ПКМ з 50% наповненням, що ймовірно пов’язано з високою пористістю зразку. Зразок ненаповненого полімеру характеризувався найнижчою густиною.

2.3.3.3 Визначення механічних властивостей матеріалу

Для дослідження механічних властивостей матеріалів використовували розривну машину UIT STM 100 серії Smart Tension Series. Це двоколонна універсальна сервоприводна випробувальна установка, призначена для визначення механічних параметрів матеріалів, напівфабрикатів і готових виробів. Обладнання дає можливість проводити статичні випробування на розтяг, стиск, згин, зсув та інші види механічного навантаження [26].

До основних типів випробувань, які можуть виконуватися на цій машині, належать:

- випробування на розтяг;
- випробування на стиск;
- випробування на згин;

– випробування на зсув та інші механічні тести.

Розривна машина UIT STM 100 може використовуватися як для наукових досліджень, так і для контролю якості матеріалів у різних галузях промисловості, зокрема в металургії, машинобудуванні, будівництві, виробництві полімерних і композиційних матеріалів.

Для моделі STM 100S характерні такі технічні параметри:

– максимальне навантаження – 100 кН, що приблизно відповідає 10 тоннам сили;

– клас точності – 0,5;

– діапазон вимірювання навантаження – від 400 Н до 100 кН;

– діапазон швидкості переміщення траверси – від 0,0005 до 1000 мм/хв, що дає можливість проводити як повільні, так і більш швидкі випробування.

Керування установкою здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, зокрема SmartTension™.

Конструктивно машина складається з двох вертикальних колон, між якими розташовані нерухома та рухома траверси. Зразок закріплюють у відповідних захватах, після чого до нього прикладають навантаження до моменту руйнування. У процесі випробування установка забезпечує точне вимірювання прикладеної сили та деформації зразка.

Система керування з’єднана з комп’ютером, що забезпечує автоматичну реєстрацію, збереження та обробку експериментальних даних. Програмне забезпечення дозволяє будувати залежності типу «навантаження–деформація» та визначати основні механічні характеристики матеріалу, зокрема:

– границю міцності;

– модуль пружності E;

– відносне подовження при розриві;

– показники пластичності матеріалу.

Максимальне навантаження установки становить 100 кН, що дає змогу досліджувати широкий спектр полімерних, металевих і композиційних матеріалів.

Методика проведення випробувань.

Експериментальні дослідження механічних властивостей зразків проводили на розривній машині, встановленій у лабораторії механічних випробувань. Зазначена установка призначена для статичних випробувань матеріалів на розтяг і стиск та оснащена системою комп'ютерного керування і збору експериментальних даних.

Перед початком випробувань виконували калібрування датчика навантаження, а також перевіряли точність роботи вимірювальних систем. Підготовлені зразки закріплювали у верхньому та нижньому затискачах машини. Після цього до зразка прикладали осьове навантаження зі сталою швидкістю деформації.

Під час проведення експерименту в автоматичному режимі реєстрували такі параметри:

– поточну силу навантаження F, Н;

– тривалість випробування t, с.

На основі зареєстрованих експериментальних даних програмне забезпечення формувало графічну залежність «навантаження–подовження».

Випробування проводили за температури (20 ± 2) °С і відносної вологості повітря (60 ± 5) %.

Границю міцності, тобто максимальне напруження, яке витримує зразок до моменту руйнування, розраховували за формулою:

$$\sigma m = \frac{Fmax}{S0} \qquad (2.3)$$

де σm – границя міцності при розтязі, МПа;

Fmax – максимальне навантаження, яке витримав зразок, Н;

S0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, мм².

Визначення відносного подовження при розриві.

Таблиця 2.3 – Результати дослідження границі міцності при розтязі

Зразок	Границя міцності при розтязі σm, МПа
ПКМ 50% наповнення	3,19±0,7
ПКМ 30% наповнення	17,45±2,1
ПКМ 10% наповнення	21,39±2,3
Ненаповнений полімер	31,17±2,7

Як видно з результатів дослідження найбільшим значенням границі міцності на розтяг (табл. 2.3) характеризувався зразок ненаповненого полімеру (31,17 МПа). Введення наповнювача в кількості 10% значно знижує зазначений показник (до 21,39 МПа). Подальше наповнення композиційного матеріалу до 30% також призводить до зниження границі міцності, однак не настільки вираженого як при переході від ненаповненого полімеру до ПКМ з вмістом 10% подрібненої шкаралупи грецького горіху. Так, границі міцності при розтязі ПКМ з вмістом наповнювача 30% склала 17,45 МПа. Введення 50% наповнювача критично знижує показники міцності (3,19 МПа), що узгоджуються з результатами визначення густини матеріалу, які свідчили про його значну пористість. Таким чином оптимальна ступінь наповненості складає 30%.

У розділі 2 обґрунтовано технологічні підходи до одержання полімерного композиційного матеріалу на основі епоксидної смоли та подрібненої шкаралупи грецького горіха. Показано необхідність попередньої підготовки наповнювача, зокрема сушіння, а також виготовлено зразки з різним ступенем наповнення. Встановлено, що надмірний вміст наповнювача ускладнює формування матеріалу методом лиття. Також зразок з вмістом наповнювача 50% характеризується значною пористістю. Найбільшим значенням границі міцності на розтяг характеризувався зразок ненаповненого полімеру. Введення наповнювача знижує зазначений показник. Ступінь наповненості 30% є найбільш оптимальною з досліджених.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу літературних джерел обґрунтовано доцільність використання подрібненої шкаралупи грецького горіха як природного лігноцелюлозного наповнювача для епоксидних композицій. Такий наповнювач є доступною агросировиною, зменшує витрати смоли, надає матеріалу природної текстури та може забезпечувати ремонтно-декоративне призначення композиту.

2. Досліджено технологічні властивості подрібненої шкаралупи грецького горіха. Встановлено, що її насипна густина становить 0,345 г/см³, а вміст вологи та летких речовин – (8,91±0,05) %. Отримані результати підтверджують необхідність попереднього сушіння наповнювача, оскільки залишкова волога може погіршувати змочування, адгезію та структуру епоксидного композиту.

3. Розроблено технологічну схему одержання композитів на основі смоли ЕД-20, твердника ПЕПА та 10, 30 і 50% подрібненої шкаралупи. Густина зразків становила 1,09–1,20 г/см³, найвище значення виявлено для складу з 30% наповнювача. Встановлено, що 50% наповнення різко підвищує в’язкість суміші та ускладнює формування виробів методом лиття.

4. Найбільшим значенням границі міцності на розтяг характеризувався зразок ненаповненого полімеру, введення наповнювача знижує зазначений показник. Ступінь наповненості 30% є найбільш оптимальною з досліджених.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Karagöz İ. Production and characterization of sustainable biocompatible PLA/walnut shell composite materials. *Polymer Bulletin*. 2024. Vol. 81. P. 11517–11537. DOI: https://doi.org/10.1007/s00289-024-05247-4.

2. Pączkowski P. Properties of eco-friendly composites based on post-consumer recycled resin filled with walnut shell powder. *Polymers*. 2023. Vol. 15. Article 4389. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15224389.

3. Sienkiewicz N., Dominic M., Parameswaranpillai J. Natural fillers as potential modifying agents for epoxy composition: a review. *Polymers*. 2022. Vol. 14. Article 265. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14020265.

4. Sapronova A. V., Dyadyura K., Sapronova L. O., Kyrychenko K. V., Yatsyuk V. M., Fostik P. P., Banga M. M. Structural and chemical features of epoxy composites filled with biogenic lignocellulosic filler obtained from agro-industrial waste. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2026. Vol. 18, No. 1. 01012. 7 p. DOI: https://doi.org/10.21272/jnep.18(1).01012.

5. Albaker R. I. B., Kocaman S., Marti M. E., Ahmetli G. Application of various carboxylic acids modified walnut shell waste as natural filler for epoxy-based composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. Vol. 138. Article 50770. DOI: https://doi.org/10.1002/app.50770.

6. Pradhan P., Satapathy A. Physico-mechanical characterization and thermal property evaluation of polyester composites filled with walnut shell powder. *Polymers and Polymer Composites*. 2022. Vol. 30. P. 1–12. DOI: https://doi.org/10.1177/09673911221077808.

7. Kolak M. N. Investigation of physical and mechanical properties of polyester matrix polymer composites containing walnut shell waste and CEN sand. *Erzincan University Journal of Science and Technology*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 171–188. DOI: https://doi.org/10.18185/erzifbed.1564095.

8. Nagaprasad N., Stalin B., Vignesh V., Ravichandran M., Rajini N., Ismail S. O. Effect of cellulosic filler loading on mechanical and thermal properties of date palm seed/vinyl ester composites. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 147. P. 53-66. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.247.

9. Bal B. C. Some mechanical properties of WPCs with wood flour and walnut shell flour. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. 2023. Vol. 33, No. 2. e20230020. DOI: https://doi.org/10.1590/0104-1428.20230005.

10. Al-Sarraf M. A. Sustainable and environmentally friendly composites: development of walnut shell powder-reinforced polypropylene composites for potential automotive applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2024. Vol. 33. Article 20240017. DOI: https://doi.org/10.1515/jmbm-2024-0017.

11. Koyunucu M., Ulay G. Thermal and flammability behavior of walnut shell reinforced epoxy composites. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. 2023. Vol. 33, No. 2. e20230018. DOI: https://doi.org/10.1590/0104-1428.20230018.

12. Karagöz İ., Mutlu D., Çavuşoğlu A., Çelebi M., Ceylan Ö. A comprehensive study on the effect of small rates of walnut shell and talc fillers on the thermal, mechanical, and morphological properties of epoxy hybrid composites. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. Vol. 15. P. 8439–8450. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-024-05660-9.

13. Srinag T., Srinivas C. L., Sandeep C. H., Prasanthi P. P. та ін. Mechanical characterization of walnut shell powder-reinforced neem shell liquid composite. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2025. Vol. 34. Article 20250078. DOI: https://doi.org/10.1515/jmbm-2025-0078.

14. Koyuncu M., Erkek B. Effects of particle size, pumice powder filling on the water absorption behavior, and elongation at break properties of walnut husk particles reinforced epoxy composite. *The European Journal of Research and Development*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 182–189. DOI: https://doi.org/10.56038/ejrnd.v2i2.51.

15. Kumar K. S., Srinivasan R. G., Palani S., Čep R., Salunkhe S., Nasr E. A. Mechanical characterization of sisal fiber-groundnut shell powder reinforced epoxy composites. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 33149. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-18645-z.

16. Shejkar S. K., Agrawal B., Agrawal A. Influence of the size of walnut shell particulates on mechanical properties of epoxy-based composites. *Journal of Engineering Research*. 2021. Special Issue. P. 1–12. DOI: https://doi.org/10.36909/jer.ICIPPSD.15541.

17. Bhakkad R. L., Sri Charan S., Buddi T., Obad S. Manufacturing and evaluation of jute fiber with gypsum and walnut shell powder composite with epoxy resin. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 552. Article 01086. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455201086.

18. Karagöz İ., Sepetcioglu H., Çavuşoğlu A., Tamer Y. B. Mechanical, thermal, and morphological behavior of sustainable PC/ASA composites reinforced with walnut shell powder. *Journal of Polymer Science*. 2026. DOI: https://doi.org/10.1002/pol.20251037.

19. Al-Arkawazi R. R. K., Khudhair A. Q., Khudadad A. R., Al-Obaidi M. A., Sadeq A. M. Sustainable manufacturing of 3D-printed polylactic acid parts reinforced with walnut shell/epoxy composites. *Advances in Mechanical Engineering*. 2026. Vol. 18, Issue 4. P. 1–14. DOI: https://doi.org/10.1177/16878132251401257.

20. Çevik B., Avşar Y. Manufacture and characterisation of sustainable biocomposites reinforced with waste walnut shell powder. *Sādhanā*. 2025. Vol. 50. Article 251. DOI: https://doi.org/10.1007/s12046-025-02949-x.

21. Al-Arkawazi R. R. K., Azdast T., Hasanzadeh R. Investigation of the effects of walnut shell wood particles on the mechanical properties of injection molded wood-polyethylene-polycarbonate composites. *SPE Polymers*. 2025. Vol. 6, No. 2. e10175. DOI: https://doi.org/10.1002/pls2.10175.

22. Композитні та порошкові матеріали : навч. посіб. / П. П. Савчук, В. П. Кашицький, М. Д. Мельничук, О. Л. Садова ; за заг. ред. П. П. Савчука. Луцьк : ФОП Теліцин О. В., 2017. 368 с. ISBN 978-617-7070-88-6.

23. ASTM D7481-18. Standard Test Methods for Determining Loose and Tapped Bulk Densities of Powders using a Graduated Cylinder. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2018. https://doi.org/10.1520/D7481-18.

24. Ogah A. O., Ezeani O. E., Nwobi S. C., Ikelle I. I. Physical and mechanical properties of agro-waste filled recycled high density polyethylene biocomposites. *South Asian Research Journal of Engineering and Technology*. 2022. Vol. 4, Issue 4. P. 55–62. DOI: https://doi.org/10.36346/sarjet.2022.v04i04.002.

25. ISO 787-2:2021. General methods of test for pigments and extenders — Part 2: Determination of matter volatile at 105 °C. Geneva : International Organization for Standardization, 2021. 6 p.

26. ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International.