

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

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

**Розробка епоксикомпозитного покриття
будівельного призначення з підвищеною
зносостійкістю / Development of an epoxy composite
coating for construction purpose with higher
wear resistance**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Індустріальний інжиніринг та менеджмент»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ПМ)сз-31

Пастушок Олеся Леонідівна

ис)

Керівник:

к.т.н., професор

Кашицький Віталій Павлович

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«12» серпня 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства
Ступінь вищої освіти: бакалавр
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Мельничук М.Д.

«11»/02 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Григорук Олеси Леонідівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розробка споксидспеченого покриття*
сферичного призначення з підвищеною
флюороскопічністю

керівник роботи *Ковшиковий В.П., к.т.ч., професор*

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «07» 02 2025 року № 7/01-02

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

3. Вихідні дані до роботи *мінеральні джерела власни-*
вості вихідних матеріалів, методи досліджень
фізико-механічних властивостей

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) *1. Опис механічної мінеральності з метою*
підготовки до досліджень 3. Розробка
складу та механічної формування споксид-
спечених покриттів. Висновки. Список
використаних джерел. Додатки

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

- 1. Метод та завдання роботи (1 ар. А4)*
- 2. Характеристика композицій (1 ар. А4)*
- 3. Методи досліджень (1 ар. А4)*
- 4. Адаптивна мікроскопія (1 ар. А4)*
- 5. Умова в. з'ясування (2 ар. А4)*
- 6. Флюороскопія (1 ар. А4)*
- 7. Схема технологічного процесу формування біокерамі-*
чних вугільних (1 ар. А4)
- 8. Висновки (1 ар. А4)*

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Н. контроль	Мисисович Є. В. доцент.	11.05.25	12.05.25

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів, кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Оцінка технічної літератури	06.05.25	виконано
2	Матеріали на меморандум довідки	20.05.25	виконано
3	Розробка екіпажу на технічній фашикуванні емоційно-позитивних покриттів	03.06.25	виконано

Здобувач вищої освіти

Гаспашук О.П.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

Калишук В.П.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пастушок О.Л. Розробка епоксикомпозитного покриття будівельного призначення з підвищеною зносостійкістю. Рукопис.

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

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

В роботі здійснено аналіз літературних джерел, вивчено особливості формування полімеркомпозитних матеріалів будівельного призначення, а також вказано особливості використання відходів в якості наповнювачів для виготовлення підлогових покриттів.

В роботі подано характеристику компонентів у вихідному стані, описано методики визначення механічних та експлуатаційних характеристик, а також представлено технологію виготовлення епоксикомпозитних зразків. Досліджено вплив мінеральних наповнювачів на механічні властивості та зносостійкість епоксикомпозитних матеріалів, які здатні структуруватися за нормальних умов. Розроблено технологічний процес формування епоксикомпозитних покриттів.

Бакалаврська робота складається з графічної частини та пояснювальної записки.

Пояснювальна записка містить 47 сторінки формату А4, 13 рисунків та 33 літературних джерела. Графічна частина містить 10 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: річковий пісок, будівельний гіпс, адгезійна міцність, твердість, ударна в'язкість, підлогове покриття, хімічні зв'язки.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка епоксикомпозитного покриття будівельного призначення з підвищеною зносостійкістю	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив		Пастушок		10.06.25			3	47
Перевірив		Кашицький						
Н.контр		Мисковець		12.06.25				
Затв.		Мельничук						
						ЛНТУ, кафедра матеріалознавства, гр. ПМ(ІМ)сз-31		

ANNOTATION

Pastushok O.L. Development of an epoxy composite coating for construction purpose with higher wear resistance. Manuscript.

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

The bachelor's qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used, and appendices. The work analyzes literary sources, studies the features of the formation of polymer composite materials for construction purposes, and also indicates the features of using waste as fillers for the manufacture of floor coverings. The work provides a characteristic of the components in the initial state, describes the methods for determining mechanical and operational characteristics, and also presents the technology for manufacturing epoxy composite samples. The influence of mineral fillers on the mechanical properties and wear resistance of epoxy composite materials that are capable of structuring under normal conditions was studied. A technological process for forming epoxy composite coatings was developed. The bachelor's work consists of a graphic part and an explanatory note. The explanatory note contains 47 pages of A4 format, 13 figures and 33 literary sources. The graphic part contains 10 sheets of A4 format presented in Appendix A.

Keywords: river sand, building gypsum, adhesive strength, hardness, impact toughness, floor covering, chemical bonds.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Характеристика полімеркомпозитних матеріалів будівельного призначення.....	7
1.2. Характеристика епоксикомпозитних підлогових покриттів.....	14
1.3. Висновки і постановка задач досліджень.....	21
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	23
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	23
2.2. Методи дослідження механічних характеристик та зносостійкості....	29
2.3. Технологія формування епоксикомпозитних зразків.....	32
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СКЛАДУ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ.....	33
3.1. Вплив мінеральних наповнювачів на механічних характеристики та зносостійкість.....	33
3.2. Розробка технологічного процесу формування епоксикомпозитних покриттів.....	40
ВИСНОВКИ.....	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44
Додатки	

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Дослідження полімерних композитів у матеріалознавстві та інженерії значно зростають завдяки їхнім функціональним характеристикам. Композитні матеріали демонструють значно покращені властивості, ніж їхні вихідні та чисті компоненти. Полімерні композити витісняють традиційні матеріали в аерокосмічній та авіаційній промисловості, автомобільній та будівельній промисловості, а також електроніці. В галузі будівельних матеріалів полімеркомпозити використовують через високу корозійну стійкість та питому міцність.

Підлогові покриття на основі полімеркомпозитних матеріалів з використанням синтетичних полімерів та мінеральних наповнювачів вирізняються можливістю формувати широкий спектр покриттів різного декоративного вигляду з високими триботехнічними та механічними характеристиками. Порівняно з термопластами, термореактивні пластмаси є більш популярними в передових інженерних застосуваннях завдяки їх високому модулю пружності та міцності, а також низькій в'язкості за нормальних умов. Здатність реакційноздатних полімерів тверднути в умовах кімнатної температури забезпечує високу технологічність підлогових покриттів, однак потребує дослідження процесів структурування, визначення оптимального складу та розробки технологічного процесу формування зносостійких полімеркомпозитних підлогових покриттів.

Серед переліку термореактивних матеріалів епоксидні смоли мають задовільні характеристики і тому найбільш широко використовуються в наш час, оскільки проявляють високу механічну міцність і твердість завдяки утворенню полімерної сітки із зшитими сегментами. Епоксидні полімери також формують низькі залишкові напруження через низький рівень усадки під час затвердіння, водночас маючи високу стійкість до тепла та хімічних речовин.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Характеристика полімеркомпозитних матеріалів будівельного призначення

Підлоги утворюють горизонтальні елементи будівельних конструкцій і несуть усі вертикальні навантаження, будучи, по суті, платформами для локації обладнання, меблів та людей. Існує багато типів підлог, наприклад, такі як залізобетонні перекриття, сталеві, збірні, попередньо напружені або пост-напружені бетонні перекриття, пустотілі, ребристі, трапецієподібні або суцільні перекриття. Також існують підвісні або безперервні перекриття [1].

Деякі типи підлог можна будувати на місці, а інші можна збирати задалегідь. Ці системи досі використовуються, оскільки їх не можна повністю замінити нещодавно впровадженими полімерними композитами. Тому стало очевидним, що інженери стикаються з великим вибором типів підлог, який тепер збільшився з додаванням полімерних композитних підлог як альтернативних рішень [2].

Існує багато параметрів, які необхідно враховувати під час проектування підлоги:

- підлоги повинні бути достатньо міцними та стійкими, щоб безпечно витримувати навантаження, не спричиняючи деформацій, які можуть погіршити стійкість конструкції;
- важливо, щоб підлоги зберігали розмірну стабільність проти рухів та вібрацій, включаючи землетруси;
- висока звуко-, електроізоляція та зносостійкість;
- підлоги повинні служити бар'єрами, що запобігають вертикальному поширенню вогню через будівлю;

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

- конструкція не повинна допускати викиду токсичних випарів у разі пожежі;
- необхідно враховувати стійкість до пошкоджень та агресивний вплив хімічних речовин, які можуть погіршити довговічність системи;
- усадку та старіння необхідно враховувати під час проектування;
- екологічні аспекти, декоративний вигляд та відбивна здатність;
- вартість виробництва та монтажу, включаючи вартість інструментів та обслуговування, повинна бути мінімальною.

Полімерні композити стали рішенням щодо вибору матеріалів, необхідних для проектування легкої структурно ефективної підлоги [3]. Окрім підлог, одним із перших застосувань цих матеріалів було проектування дахів. Очікувалося, що вони розширять межі високих будівель. Вони також можуть бути застосовані для проектування мостів, що призведе до створення дуже міцних, довговічних та креативних конструкцій. Сьогодні неметалеві матеріали потрібні, перш за все, через проблему корозії сталевих конструкцій, тому конструкційні пластмаси та композити все частіше замінюють метал.

Інженерна важливість композиту полягає в тому, що два різні матеріали поєднуються в один, що має кращі властивості, ніж властивості кожного окремого компонента. Тобто, волокна забезпечують високу міцність і жорсткість, а матриця забезпечує зв'язування та підтримку для волокон. Іншим ефектом додавання волокна є зниження загального вмісту полімеру та кінцевої вартості продукту. Жорсткість і міцність композиту залежить від жорсткості та міцності сполук, орієнтації волокон, способу виробництва композиту та об'ємної частки волокна/полімеру [4].

Композитні полімери користуються таким великим попитом завдяки своєму унікальному поєднанню властивостей, однією з найважливіших з яких є їхнє високе співвідношення міцності до ваги. Це дозволяє скоротити час та витрати на їх транспортування та встановлення. Крім того, полімерні композити все частіше набирають обертів у цивільному будівництві, оскільки

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

такі матеріали демонструють стійкість до впливу навколишнього середовища та інтеграцію компонентів, що призводить до скорочення терміну служби та продовження терміну служби конструкції. Гідроізоляція не потрібна, оскільки композити мають стійкість до вологостійкої корозії. Більше того, вони витримують механічні навантаження в умовах напруження та деформації порівняно зі звичайними будівельними матеріалами. Їхні механічні властивості (в'язкопружна поведінка, повзучість та розрив, міцність на розтяг, модуль пружності тощо) задовільні. Конструкційні композити демонструють стійкість до пошкоджень та стійкість до хімічної корозії.

Полімерний композит складається з суміші волокнистого армування високої міцності та модуля, яке більш-менш рівномірно розподілене по всій матриці (зазвичай поліестеровій або епоксидній) [5].

Полімери – це синтетичні матеріали з високою молекулярною масою, побудовані з простіших повторюваних хімічних структур (мономерів) за відповідних умов температури та каталітичної дії. Коли мономер об'єднуються в процесі полімеризації, утворюються довголанцюгові молекули, що призводить до утворення полімеру. У першому випадку утворюється матеріал з довголанцюгових полімеризованих та розділених молекул. Цей матеріал відомий як термопластичний полімер. У другому типі ланцюги зшиваються, і утворюється твердий матеріал, який не деформується під час нагрівання. Такі тверді речовини також відомі як термореактивні полімери [6].

Молекули в термопластичному полімері утримуються разом силами Ван-дер-Ваальса, що є відносно слабким зв'язком. Хімічний валентний зв'язок надзвичайно міцний, тому їхня міцність та жорсткість обумовлені властивостями мономерів та високою молекулярною масою. Вони можуть мати випадкову структуру (аморфні) або високий ступінь розташування молекул (кристалічні). Завдяки своїй молекулярній структурі, аморфні

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

термопласти, зокрема, можуть розм'якшуватися та тверднути багаторазово як під дією тепла, так і без нього.

Пластик – це неорганічна тверда речовина та полімер, які за своєю природою є вуглеводневими. Існує безліч різних видів пластмас, які зазвичай використовуються: термопласти та термореактивні. Ці категорії полімерів можна розрізнити залежно від їхньої дії в присутності тепла. Серед них термопласти легко формуються та переформовуються в різні придатні для використання форми. Вони мають низьку вартість обробки, низьку температуру плавлення, довговічність, міцність та хімічну стійкість. Термопласти складають близько 80% усіх видів пластмас, які зазвичай використовуються, тоді як термореактивні складають близько 20% [7].

Пластики мають канцерогенний характер, оскільки містять хлор та інші канцерогени. Спалювання цих відходів виробляє токсичні гази, такі як хлор, фосген, чадний газ, оксид азоту, оксид сірки (IV) та інші шкідливі діоксини, що є небезпечними для навколишнього середовища. У найближчому майбутньому світ буде в достатку виробляти високоякісний пластик, обсяг та вага якого перевищують сталь. Упаковка з використанням пластикових матеріалів становить майже половину пластикових відходів у світі. Більшість цих відходів утворюється в Азії, тоді як Америка, Японія та Європейський Союз є найбільшими у світі виробниками відходів пластикової упаковки на душу населення [8].

Пластик широко використовується в побуті, промисловості, будівництві, автомобілях тощо, замінюючи багато традиційних матеріалів та виробів. Незважаючи на численні зусилля щодо виправлення ситуації, використання пластику не може бути зупинено через його широке застосування та корисні властивості. Світове виробництво пластику значно зросло, і значна його частина використовується для упаковки. Пластикові відходи становлять 8...12% потоку побутових відходів, і приблизно 190 мільйонів тонн утворюється щорічно [9].

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Таким чином, пластикові відходи вважаються однією з значних екологічних проблем через їх небезпечний вплив та складність утилізації. Такі фактори, як зростання населення, низькі виробничі витрати, широкий вибір та застосування призводять до збільшення виробництва пластику. В результаті, велика кількість пластику викидається, і лише незначна його частина переробляється. Будівельна галузь все частіше шукає можливості для переробки пластикових відходів як альтернативного ресурсу. Полімерний композит застосовується для виготовлення будівельних матеріалів, таких як плитка для підлоги та тротуари. Дослідження є досить важливими з соціально-екологічної точки зору. Успішна переробка пластикових відходів для розробки нових матеріалів значно покращить екологічні умови та зменшить попит на первинні кар'єрні матеріали. Це зберігає та підтримує природні ресурси, які не можуть бути поповнені, зменшує забруднення навколишнього середовища, економить енергію та зменшує потребу в свіжій сировині для будівельних матеріалів [10, 11].

Підлогові покриття на основі ПВХ сьогодні мають низькі експлуатаційні витрати, довгий термін служби, враховуючи широкий спектр кольорів та асортиментів, які зазвичай використовуються в різних сферах підлогових покриттів. Ці покриття, виготовлені з полівінілхлориду, можна побачити в діловому світі під різними назвами, такими як вініл, плитка та гнучкі підлогові покриття. ПВХ, безумовно, не є природною речовиною, а є штучним видом пластику, який має низьку теплопровідність, водопоглинання, поглинання жиру, а електро- та звукоізоляцію високу. З наявності азбесту в його складі, він стійкий до подряпин та певною мірою до горіння [12].

Поліуретанові підлогові покриття використовуються у випадку із середнім та високим механічним навантаженням. Поліуретанові підлогові покриття, які є напівадаптивним матеріалом можуть бути матовими або блискучими. Різниця з іншими захисними покриттями полягає в тому, що вони є високитехнологічними. Завдяки стійкості до води та синтетичних речовин,

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

поліуретанові підлогові покриття наносять на підлоги переробних заводів, фармацевтичних та кондитерських виробництв. Еластичні підлогові покриття є вдалим матеріалом для використання на відкритому повітрі (спортивні майданчики) порівняно з іншими покриттями, оскільки стійкий до будь-яких кліматичних умов [13].

Вибір наповнювачів для будівельних матеріалів є поширеною практикою серед виробників і науковців. В більшості випадків це визначено необхідністю зменшити витрати на матеріали та утилізацію відходів. Цивільне будівництво відкриває широкі можливості для переробки та пошуку застосування матеріалам, які раніше вважалися відходами [14, 15]. Прикладом є відходи попелу, яка зараз широко використовується у виробництві бетону. Епоксидні покриття для підлоги – це матеріал, який потребує використання мінеральних наповнювачів. Епоксидні покриття широко використовуються в промисловому будівництві, оскільки вони створюють поверхню з високою хімічною стійкістю та стійкі до забруднень [16].

Однак епоксидна смола є відносно дорогим матеріалом, а її компоненти шкідливі для навколишнього середовища. Як показав аналіз токсичності, епоксидна смола містить шкідливі для організмів інгредієнти, які подразнюють шкіру, очі та дихальні шляхи. Додавання 30% мінерального порошку може зменшити вміст шкідливих інгредієнтів в епоксидному покритті на 20 %. Тому виникає висока доцільність пошуку наповнювачів для епоксидних покриттів, особливо тих, які наразі є відходами.

В останні роки було проведено багато досліджень щодо модифікації епоксидних смол біовідходами [17]. Серед протестованих біодобавок до епоксидних смол можна назвати такі: кокосові волокна, біокремнезем, вуглецеві волокна, отримані з відходів конопель, відходи ячної шкаралупи та відходи конопель.

Реконструкція та повторне використання громадських будівель на цементній основі, зокрема бетонних підлог, є двома найпоширенішими

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

застосуваннями для полімеркомпозитних матеріалів. Результати досліджень показують, що додавання від 0,5 % до 1,0 % натуральних кокосових волокон до епоксидної матриці призвело до покращення міцності покриття на відрив. Виявлено, що використання більшої об'ємної частки волокон призвело до частішого виникнення руйнування через поширення тріщин між полімерною матрицею та основою. В результаті міцність покриття з епоксидної смоли на відрив знижується, що пов'язано з великою кількістю пучків волокон у матриці епоксидної смоли.

Деякі добавки до відходів [18] впливають на властивості епоксидних покриттів, наприклад, наночастинки алюмоксану з відходів лігніну покращують міцність на розтяг та твердість, шкаралупа волоських горіхів покращує твердість та знижує міцність на розтяг. Інші протестовані добавки до епоксидної смоли включають: поліпропіленові пластикові відходи, які покращили твердість, відходи полікарбонату, які покращили твердість, ударну в'язкість та зносостійкість, та золу, яка покращила твердість, міцність на розтяг, міцність на згин та зносостійкість. Додавання золи може покращити міцність зчеплення епоксидної смоли. Для покращення теплопровідності епоксидної смоли додають порошок відходів мармуру, а використання порошку відходів граніту покращує твердість, ударну в'язкість та зносостійкість.

Проведено дослідження можливості використання порошоків відходів кварцу та вапняку як наповнювачів для епоксидних покриттів. Ці випробування показали, що всі відходи кварцового порошку в кількості до 29% від маси покриття не погіршують міцність на відрив, знижують токсичність та витрати на епоксидне покриття [19].

У роботі [20] досліджувався вплив порошку вапняку відходів на епоксидне покриття, де 85% частинок порошку мали розмір від 0,1 до 1,2 мм. Додавання порошку вапняку з відходів дещо покращує твердість епоксидного покриття (приблизно на 1...2). У дослідженнях, в яких використовувався

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

вапняковий порошок з більшими частинками, покращення було більшим (приблизно на 1...8), але лише для нижньої сторони зразків. Використання порошку з меншим розміром частинок зменшило різницю між результатами для верхньої та нижньої сторін.

Міцність на розтяг порошку з меншими частинками становила 18...24 МПа, а порошку з попередніх випробувань – 13...14 МПа. Міцність на вигин для порошку з меншими частинками становила 36...38 МПа, а для порошку з більшими частинками – 25...54 МПа. Додавання порошку вапняку спричинило зниження міцності покриття на розрив на 60...62%, міцності на вигин на 10...59% та зниження міцності покриття на відрив на 1...7% за умови, що вміст порошку перевищує 29%. Однак, порошок з меншими частинками показав вищі результати порівняно з раніше використаним порошком з більшими частинками.

1.2. Характеристика епоксикомпозитних підлогових покриттів

Зносостійкі та антифрикційні покриття мають вирішальне значення в різних галузях. Вони здебільшого використовуються в місцях, де потрібні антифрикційні властивості, таких як палубні зони, включаючи ті, що знаходяться на морських судах та літаках. Крім того, вони добре підходять для важких транспортних засобів, що працюють на палубних поверхнях. Цивільне застосування зносостійких та антифрикційних покриттів в основному стосується поверхонь великого обладнання у вологому середовищі, такому як судна в морському середовищі. Вони також використовуються у пішохідних доріжках, спортивних майданчиках, на парковках, у ванних кімнатах, басейнах та інших місцях, де потрібні антифрикційні властивості. Безпека персоналу та обладнання безпосередньо залежить від ефективності антифрикційних та високозносостійких покриттів [21].

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Зношування матеріалів охоплює кілька механізмів зношування, включаючи стирання, фреттинг, адгезію, втому, окислення та інші трибохімічні реакції. Процес зношування можна розділити на три різні стани: мінімальне, помірне та катастрофічне. У випадку низького зношування рівень напруження нижче межі пружності та зазвичай характеризується локалізованою деформацією. У стані помірного зношування рівень напруження нижче межі пластичності, що призводить до появи мікротріщин, локальних розломів та дрібних частинок зношування. Рівень напруження в умовах сильного зношування приблизно дорівнює або перевищує критичне напруження руйнування, що призводить до появи підповерхневих макротріщин [22].

Зношування – це процес поступової втрати матеріалу на твердій поверхні, спричинений рухом іншої речовини, що контактує з нею. Зносостійкі покриття мають здатність знижувати знос, який спричинений зовнішніми силами. Це досягається завдяки більшій твердості та адгезії. Зносостійкість покриття можна значно покращити, додавши наповнювачі, які мають високу міцність, високу твердість та високу зносостійкість. Зносостійкі наповнювачі в покриттях можна класифікувати на дві основні категорії: органічні та неорганічні. Органічні наповнювачі складаються переважно з інертних полімерних матеріалів, таких як молекули полівінілхлориду та частинки полііміду. З іншого боку, неорганічні наповнювачі здебільшого містять SiC та металеві частинки [23].

У деяких випадках потрібен нижчий рівень опору ковзанню, водночас більший наголос робиться на здатності до очищення. Чим вищий рівень опору ковзанню підлоги, тим складніше її буде очистити. Це пояснюється тим, що наповнювач є крупніший і має більшу кількість гострих кутів.

Загалом, бажано підвищувати опір ковзанню поверхонь підлоги, однак надмірно високий коефіцієнт тертя може перешкоджати безпечній та комфортній ходьбі. Крім того, суттєве збільшення шорсткості створює

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

проблеми з очищенням та обслуговуванням тротуарів, оскільки сприяє затримці сміття на нерівній поверхні, що вимагає дорогого обслуговування.

Антифрикційний механізм покриттів визначається коефіцієнтом тертя шару покриття, який утворюється після затвердіння. Загалом, покриття можна класифікувати як антифрикційне, коли коефіцієнт тертя затверділої поверхні перевищує 0,45.

Антифрикційне покриття – це тип покриття, яке наноситься на матеріали, щоб підвищити рівень тертя на їхніх поверхнях. Для підвищення коефіцієнта тертя поверхні покриття прийнято додавати до покриття антифрикційні частинки неправильної форми. Після завершення процесу затвердіння частина антифрикційних частинок виступатиме назовні з поверхні покриття, утворюючи рельєфну структуру.

Це надає поверхні покриття певного рівня шорсткості, ефективно запобігаючи будь-якому потенційному ковзанню між об'єктом та поверхнею основи.

Розробка матеріалів з покращеною зносостійкістю полягає у визначенні різних комбінацій наповнювачів у певній полімерній матриці [24]. У критичних сферах застосування, таких як аерокосмічна, автомобільна, морська та будівельна промисловість, використання епоксидних смол з нанонаповнювачами швидко зростає. Однак в інших випадках, таких як панелі підлоги, це призведе до непотрібного збільшення вартості, що мотивує дослідження дешевших матеріалів, які дозволяють покращити механічні властивості армованого полімерного композиту. Наприклад, автори роботи використовували як армуючий матеріал промислові тверді відходи ферохромового шлаку, що містять оксиди, такі як Al_2O_3 , SiO_2 та MgO . Кремнезем (SiO_2) часто використовується або в чистому стані, або в різних комбінаціях з оксидами металів для покращення різних властивостей композиту, серед яких механічні властивості, а також стійкість до зношування. Серед комерційно доступних наповнювачів на основі діоксиду кремнію для

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

полімерних композитів можна виділити наступні: скляні кульки, отримані шляхом плавлення та формування дрібного скляного порошку для отримання сферичних частинок; пісок зі сферичними частинками, виготовлений з бокситу шляхом плавлення в електродуговій печі з подальшим розпиленням та охолодженням; кристалічний кремнезем отриманий за допомогою хімічного очищення та механічного фрагментації природного кварцу; аморфний плавлений кремнезем, отриманий шляхом плавлення кристалічного кремнезему, його повторного затвердіння та подальшого подрібнення. Термін «кварц» часто використовується замість «кристалічний кремнезем». У деяких випадках корисно застосовувати кремнеземні наповнювачі двох типів, наприклад, нанокремнеземні кульки та мікророзмірні скляні кульки [25].

Підлогове покриття виконує важливу роль у забезпеченні візуальних, фізіологічних, акустичних, фізичних та механічних характеристик, необхідних у просторі. Матеріали для терас можна здебільшого розділити на три класи: тверді підлогові матеріали, гнучкі підлогові матеріали та легкі підлогові матеріали [26].

Підлоги з часом поступово зношуються та руйнуються. Особливо в таких зонах, як переробні заводи та складські приміщення, відбувається значне навантаження, і підлоги можуть швидко старіти.

Випробування та застосування епоксидних підлогових покриттів є одними з найвідоміших та найчастіше використовуваних матеріалів. Епоксидне покриття для підлоги є найменш вимогливим матеріалом для використання на промислових об'єктах та в розподільчих центрах. Воно стійке до зносу протягом тривалого часу в зонах з високим механічним навантаженням. Епоксидні підлогові матеріали, які також можна використовувати для вологих підлог, популярні в басейнах та резервуарах для води в готелях.

Різнманітні промислові покриття в багатьох випадках використовують в якості матриці епоксидну смолу для збереження поверхонь, армування

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

матеріалів та запобігання корозії та біоруйнуванню. Епоксидні покриття мають багато переваг порівняно з іншими полімерними матрицями, оскільки забезпечують тривалий захист від корозії, мають високу адгезію та адаптивність до широкого спектру основ [27]. Захисні покриття, виготовлені з епоксиолімерів, мають високі механічні характеристики, когезію, а також хімічну та термічну стійкість. Бісфенол А, бісфенол F та фенольний новолак є найпоширенішими епоксидними смолами. Зазвичай використовують затверджувачі або коректори до епоксидних смол, такі як поліамід та амідоамін.

Придатність комбінації смоли та затверджувача для певного застосування визначається технологічними властивостями композиції та механічними характеристиками покриття. Можна використовувати поліамід як затверджувач з фенольною новолачною смолою для формування надзвичайно хімічно- та корозійностійкого покриття.

Епоксидні покриття вимагають певних кліматичних умов та підготовки поверхні для якісного нанесення. Перед нанесенням епоксидного покриття на поверхню необхідно видалити тонкий шар корозії, який там вже утворився. Хімікати та засоби механічної обробки – це два поширених способи очищення поверхонь. Після очищення та підготовки поверхні вона знову піддається впливу забруднення ззовні. Наприклад, миттева іржа може утворюватися всього за 30 хв під час роботи зі сталлю. Тривалість експлуатації в польових умовах зменшується зі затримкою нанесення епоксидного поверхневого покриття. Тому, виробники надають детальні інструкції щодо того, як швидко слід наносити перше покриття та оптимальні умови навколишнього середовища [28].

Професіонали використовують тимчасові системи клімат-контролю, щоб забезпечити ідеальні умови навколишнього середовища для кожного етапу процесу нанесення епоксидного покриття на поверхню, коли недоступна захисна атмосфера як у виробничих умовах. Унікальні технології тимчасового

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

контролю навколишнього середовища ідеально підходять для верфей, електростанцій та будівельних майданчиків, оскільки вони забезпечують повний контроль над температурою навколишнього середовища.

Епоксидні покриття відомі своїми чудовими механічними властивостями, такими як міцність та витривалість, а також стійкість до стирання, ударів та хімічних речовин. Епоксиполімери є чудовим матеріалом для захисту поверхні деталей у складних промислових умовах завдяки цим характеристикам. Епоксидні герметики для підлоги часто використовуються для покращення характеристик бетонних підлог у виробничих цехах, на заводах, у логістичних центрах та інших місцях з досить інтенсивним пішохідним рухом. Епоксидні покриття ефективно використовують в автомобільному секторі завдяки їхній стійкості до хімічних речовин, що містяться в мастилах, паливі та засобах для чищення [29].

Епоксидні полімери використовують в якості клеїв та лакофарбових матеріалів, а також їх можна використовувати як покриття для підлоги та металу. Епоксидна смола та поліамінний затверджувач використовуються для індуктування електрохімічної реакції, що формує епоксидні покриття. Затвердіння відбувається у випадку змішування цих двох речовин. Для цього потрібно від кількох хвилин до кількох годин, що перетворює в'язкий епоксидний шар на міцну та довговічну тверду речовину.

Епоксидні покриття широко використовують, оскільки вони швидко тверднуть, стійкі до подряпин та забезпечують захист за умови правильного нанесення. Оскільки епоксидні покриття швидко та легко наносяться, їх можна використовувати в широкому діапазоні застосувань, на відміну від типових порошкових покриттів, що затвердівають за допомогою тепла. Деякі з найпоширеніших застосувань епоксидних покриттів є наступними [30]:

- покриття для побутової техніки (пральні та миючі машини);
- клеї та герметики для транспортних засобів (автомобілі, човни);

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

- антикорозійні покриття для сталі (фітинги у нафтогазових транспортних лініях, у водопроводах та бетонних транспортних лініях);
- підлогові покриття (житлові та виробничі приміщення).

Епоксидні покриття для підлоги використовуються у виробничих приміщеннях, комерційних та роздрібних магазинах, промислових об'єктах, складських приміщеннях, закладах охорони здоров'я, виставках, гаражах, авіаційних ангарах та інших комерційних та промислових приміщеннях. Епоксидні смоли забезпечують красиву, глянсову поверхню, яка доступна в широкому діапазоні кольорів та дизайнів. Мармурові підлоги, килимове покриття, стружка та різнокольорові агрегатні підлоги – це деякі декоративні можливості, доступні в результаті використання епоксидного лаку на підлогах. Епоксидні покриття для підлоги – це хімічно стійке та просте в обслуговуванні рішення для підлоги, яке можна наносити безпосередньо на нові або покращені бетонні підлоги [31].

Як наповнювач для епоксидного покриття використовувався порошок відходів мінералів (вапняковий порошок). Композиції на основі епоксидних смол були виготовлені з порошком відходів вапняку в кількостях від 0% до 29% від маси суміші. Використання порошку відходів вапняку як наповнювача для епоксидних покриттів призвело до підвищення твердості на 5%, водночас не змінилась суттєво міцність на відрив, але знизилась міцність на розтяг на 6...27% та міцність на вигин на 18...38%. Однак модифіковане епоксидне покриття все ще відповідає стандартним вимогам до епоксидних підлог. Отже, порошок відходів вапняку може бути використаний на практиці як наповнювач для епоксидних покриттів для підлоги. Це рішення дозволяє переробляти мінеральні порошки, зменшує споживання шкідливої епоксидної смоли та знижує вартість покриття [32].

Нанесення покриття може бути здійснено методом наливу, напилення, нанесення пензлем або валиком. Розпилення, занурення та нанесення пензлем – це методи, що використовуються для створення практичних покриттів.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Антифрикційні властивості пояснюється ступенем диспергуванням частинок у матриці та сумарним вмістом на поверхні. Під час зношування непокріті краї та кути частинок створюють підвищений опір, що призводить до збільшення коефіцієнта тертя.

Механічні властивості епоксидної смоли можна вважати вищими порівняно з іншими термореактивними смолами, що забезпечує її домінування у виробництві композитів як матриці [33]. Полімерні композитні матеріали містять наповнювачі або модифікатори, які мають різні функціональні можливості, завдяки яким вони вирізняються унікальними корисними, технологічними та технологічними властивостями.

1.3. Висновки і постановка задач досліджень

Згідно з останніми даними статистики відходів, опублікованими Євростатом, понад 23% усіх відходів у Європейському Союзі – це відходи гірничодобувної промисловості, більшість з яких є основними мінеральними відходами. Щоб сприяти зменшенню кількості мінеральних відходів, що зберігаються в відвалах, слід шукати можливість їх переробки.

На початкових етапах для розробки виробництва антифрикційних та високоміцних покриттів як основні компоненти часто використовувалися цемент і пісок. Вони мають такі недоліки, як недостатня довговічність, обмежена зносостійкість та низькі властивості усадки при холоді та теплі. Одночасно вони схильні до замерзання та розтріскування в умовах низьких температур. Подальші вдосконалення були розроблені шляхом використання поліуретану, епоксидного поліаміду та інших смол або металів як основних матеріалів, а також наждачного паперу, карбїду кремнію та інших речовин для створення покриттів, що призвело до помітного покращення ефективності.

Епоксидні смоли можуть досягати заданих механічних властивостей залежно від затверджувачів, але вони можуть бути додатково армовані

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

скляними або вуглецевими волокнами. Крім того, покращення може бути досягнуто шляхом створення гібридних епоксидних композитів з кількома типами порошків або порошкових та волокнистих наповнювачів.

В результаті аналізу літературних джерел визначено основні завдання, які необхідно виконати для оптимізації складу та розробки технологічного процесу формування біокомпозитних матеріалів конструкційного призначення, що містять комплекс наповнювачів природного походження:

- визначити оптимальний вміст мінеральних наповнювачів;
- визначити вплив мінеральних наповнювачів на механічні характеристики та зносостійкість епоксикомпозитів;
- дослідити характер руйнування епоксикомпозитів під впливом динамічних навантажень;
- розробити технологічний процес формування епоксикомпозитних виробів.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

Епоксидні смоли (ТУ 20.5-2558309112.010-2018) відомі своєю високою технологічністю та продуктивністю (рисунок 2.1). Вони є матрицями для клеїв, покриттів, армованих пластмас та композитних матеріалів, таких як скловолокно та вуглецеве волокно, які залишаються неушкодженими в інтенсивних умовах. В результаті затвердіння епоксидні смоли забезпечують ряд характеристик:

- стійкість до хімічних речовин, особливо лужних середовищ;
- термостійкість;
- адгезія до різних матеріалів;
- висока міцність на розтяг, стиск та згин;
- низька усадка під час затвердіння;
- високі електроізоляційні властивості;
- стійкість до корозії;
- затвердіння в широкому діапазоні температур;
- стійкість до втоми.

Епоксидні смоли мають адгезію до дерева, бетону, металу, скла, каменю та більшості пластмас, що робить їх придатними до використання у якості клеїв. Епоксидні смоли використовують як фарби для зовнішніх покриттів, герметики, надміцні захисні покриття, промислові та автомобільні фарби, ґрунтовки. Електричні системи та електроніка: двигуни, генератори, трансформатори, перемикачі, передачі, втулки, ізолятори, друковані плати (РWB), заливки та напівпровідникові герметики.

В аерокосмічній промисловості епоксидна смола використовується як конструкційний клей, армований скло, кевларом, бором або вуглецевим

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

волоконном. Цей варіант особливо використовується в аерокосмічній промисловості завдяки високим механічним властивостям епоксидної смоли та стійкості до впливу навколишнього середовища.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд тари з епоксидною смолою

Основне застосування поліетиленполіаміну (ПЕПА) – затверджувач епоксидних смол (ТУ 2413-357-00203447-99). Крім того, ПЕПА використовується у виробництві іонообмінних смол, добавок, як беззольні диспергатори та модифікатори масляних мастил. ПЕПА є сировиною для виробництва активної основи для інгібіторів корозії, епоксидних сполук, аміносмол, лаків та фарб, мийних та дезінфікуючих засобів (рисунок 2.2).

Поліетиленполіаміни особливо рекомендуються для сумішей на основі натурального та синтетичного каучуку в поєднанні з іншими добавками та забезпечують повну вулканізацію.

Для затвердіння епоксидних смол потрібно від 5% до 30% ПЕПА від ваги смоли, залежно від типу робіт, середнє рекомендоване співвідношення

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

становить 1:10. З'єднання смоли та затверджувача слід проводити за температури не менше +20°C. Час гелеутворення становить близько 1,5 год, а час повного затвердіння – 24 год. Забороняється змішувати велику кількість смоли з затверджувачем одразу, без використання спеціальних змішувальних машин, щоб уникнути спінення.



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд тари з затверджувачем

У випадку нестачі затверджувача смола залишається незатверділою та не набуває необхідних механічних властивостей; за надлишку затверджувача затвердіння відбувається дуже швидко, а полімер, що утворюється, стає крихким. Нагрівання значно прискорює процес затвердіння. Оскільки твердіння відбувається з виділенням тепла, тому у випадку приготування великої дози смоли з затверджувачем можливе самонагрівання суміші, що супроводжується спіненням та швидким затвердінням.

Точна кількість затверджувача та життєздатність складу визначаються користувачем експериментально, залежно від сфери застосування, ваги заливки, режиму затвердіння, наявності та типу наповнювача тощо.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Пісок – осадова гірська порода, що складається з зерен гірських порід розміром від 0,05 до 2 мм. Дуже часто складається з силікатного (речовина – діоксид кремнію) або алюмосилікатного матеріалу. Природний пісок є пухкою сумішшю зерен, що утворилися в результаті руйнування твердих гірських порід, маса однієї піщинки може варіюватися від десятих часток міліграма до декількох мікрограмів.

Будівельний пісок класифікується за місцем походження та обробки:

– кар’єрний пісок – неорганічний сипкий матеріал з крупністю до 5 мм, що утворився в результаті природного руйнування скельних гірських порід. Отримують в результаті розробки піщано-гравійних родовищ без використання або з використанням спеціального збагачувального обладнання;

– річковий пісок – видобувається з русла річок, відрізняється високим ступенем очищення та відсутністю більших уламків та глинистих домішок;

– кар’єрний митий пісок – видобувається в кар’єрі шляхом промивання великої кількості води, внаслідок чого з нього вимивається глина та дрібні частинки.

– кар’єрний сіяний пісок – просіяний пісок, що видобувається в кар’єрі, очищений від великих великих фракцій. Застосовується у виробництві розчину для кладки, штукатурних та фундаментних робіт у приготуванні асфальтобетонних сумішей;

– тяжкий штучний пісок – пухка суміш зерен, що одержується механічним дробленням гірських порід (гранітів, мармурів, вапняків, туфів, пемзи), а також шлаків різної щільності та походження. Форма зерен штучних пісків, на відміну від натуральних, виходить гострокутною, а поверхня – шорсткою. Штучні піски застосовують для будь-якого шару штукатурки, крупність зерен при цьому може бути різною, залежить від виду розчину та встановлюється проектом. Зазвичай вона приймається рівною крупністю природних пісків. При виготовленні штучного піску з кам’яновугільного

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

шлаку в переробку береться добре вугілля без домішок, незгорілих частинок і кам'яних порід з низьким вмістом сірки. При виконанні декоративної штукатурки зі штучного піску, який отриманий з певної гірської породи або шлаку, разом з ним для економії може використовуватися щебінь, крихта і навіть пудра цієї породи.

В роботі використано річковий пісок (ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт), який після просушування розділено на фракції розміром 0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм та 0,5 мм (рисунок 2.3) методом просіювання за допомогою набору сит.



а



б



в



г

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд гранул зерен річкового піску з фракцією:
а – 0,1 мм; б – 0,2 мм; в – 0,3 мм; г – 0,5 мм

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Густина річкового піску становить біля 1,5 кг/м³, вологість приблизно 4%, питома вага 2,65 г/см³, модуль крупності від 1,36 до 2,2. Хімічний склад: основний компонент кварц (SiO₂).

Гіпс - мінерал із класу сульфатів, за складом дигідрат сульфату кальцію з хімічною формулою CaSO₄·2H₂O. Волокнисті різновиди гіпсу називаються селенітом чи атласним шпатом, а зерниста – алебастром. Гіпс - типовий осадовий мінерал. Зустрічається в пластах осадових порід у формі лускатих, волокнистих або щільних дрібнозернистих мас, безбарвних або білих кристалів, іноді забарвлених у бурі, блакитні, жовті або червоні тони включеннями і домішками. Утворює прошарки паралельно-волокнистої структури (селеніт) у глинистих осадових породах, а також суцільні дрібнозернисті агрегати, що нагадують мармур (алебастр).

В роботі використано будівельний гіпс ТУ 23963362.001-98 з розміром частинок 100 мкм (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд порошку будівельного гіпсу

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

2.3. Методи дослідження механічних характеристик та зносостійкості

Дослідження механічних характеристик епоксикомпозитних матеріалів проведено згідно стандартних методик визначення адгезійної міцності, твердості та ударної в'язкості.

Адгезійну міцність визначали методом нормального відриву з використанням стержнів з конічним виступом для самоцентрування. Руйнування клейового шва проводили на розривній машині УММ-5 з швидкістю переміщення нижньої траверси 2 мм/хв.

Адгезійну міцність визначали за формулою:

$$\sigma_a = \frac{P}{S}, \quad (2.1)$$

де P – максимальне навантаження, що витримує досліджуваний матеріал до руйнування, Н;

S – площа поперечного перерізу клейового з'єднання, м².

Твердість епоксикомпозитних матеріалів визначали методом Брінелля (ISO 6506) з використанням сталевий кульки діаметром 10 мм, яку втискували в поверхню досліджуваного епоксикомпозитного матеріалу з навантаженням 1875 Н протягом 20 с. Дослідження проводили на кубічних зразках з паралельними поверхнями. Твердість матеріалу визначали за формулою:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2.2)$$

де P – навантаження, прикладене до індентора, Н;

D – діаметр кульки, мм;

d – діаметр відбитку, мм.

З метою виявлення лунки на поверхні епоксикомпозитного матеріалу використано аерозольну фарбу, яку наносили на поверхню паперу, після чого

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

шляхом притиснення досліджуваної поверхні зразку до фарбованої поверхні забезпечували перенесення фарби на плоску поверхню (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Метод виявлення лунки на поверхні епоксикомпозитного зразка

Ударну в'язкість епоксикомпозитних матеріалів досліджували за методикою згідно ГОСТ 9454-78. Зразки у вигляді стержнів з квадратним перерізом (10x10 мм) та довжиною 60 мм піддавали дії динамічного навантаження за допомогою молота маятникового копра.

Ударну в'язкість визначали за формулою:

$$KС = \frac{Q \cdot l \left[(\cos \beta - \cos \alpha) - (\cos \gamma - \cos \alpha) \frac{\alpha + \beta}{\alpha + \gamma} \right]}{S}, \quad (2.3)$$

де Q – маса молота маятникового копра, Н;

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

α – кут зарядки молота маятника, град;

β – кут відхилення маятника після руйнування зразка, град;

						БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			30

Визначення інтенсивності вагового зношування епоксикомпозитних матеріалів в трибосхемі «контртіло-зразок» проводили в умовах тертя без мастильного матеріалу згідно методики ISO 7148-2 на лабораторній установці. Епоксикомпозитний зразок розміщували на бічній поверхні контртіла у формі диска, яке обертається із визначеною швидкістю. Контртіло (рисунок 2.6) діаметром 50 мм виготовлено із загартованої сталі із шорсткістю трибоповерхні Ra=3,2.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд сталевих контртіл та епоксикомпозитних зразків

Зносостійкість визначали ваговим методом. Інтенсивність вагового зношування розраховували за формулою:

$$I_g = \frac{m_1 - m_2}{L}, \quad (2.4)$$

де m_1 , m_2 – маса епоксикомпозитних зразків до і після випробувань відповідно, г.

L – шлях тертя, м.

2.3. Технологія формування епоксикомпозитних зразків

Епоксикомпозитні зразки отримують в результаті формування композиції на основі компонентів: епоксидна смола, затверджувач та наповнювач. Епоксидну смолу та затверджувач використовують у стехіометричному співвідношенні 12 мас.ч. затверджувача на 100 мас.ч. епоксидної смоли. Компоненти змішують механічно за допомогою лабораторного змішувача протягом 5 хв за невеликої швидкості обертання лопастей з метою уникнення появи бульбашок повітря. До отриманої суміші додають порошок наповнювача, дозування якого проводять ваговим методом з врахуванням визначеного складу композиції. Отриману композицію поміщають у силіконові форми або наносять на металелву поверхню стержнів. Зразки для трибодосліджень виготовляли з епоксикомпозитного матеріалу висотою 15 мм та прямокутним перерізом 10×10 мм з використанням прес-форми під питомим навантаженням 20 МПа Структурування епоксикомпозитних матеріалів тривало 24 год за кімнатної температури 18...20 °С.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СКЛАДУ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ

ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ

3.1. Вплив мінеральних наповнювачів на механічних характеристики та зносостійкість

Адгезійна міцність епоксикомпозитних матеріалів з вмістом річкового піску 50 мас.ч. фракції 0,1 мм становить 22,8 МПа (рисунок 3.1). Введення річкового піску в кількості 60 мас.ч. призводить до незначного підвищення адгезійної міцності до 25,2 МПа, що становить 10% підвищення характеристики порівняно з вмістом наповнювача 50 мас.ч. У випадку введення наповнювача в кількості 80 мас.ч. та 100 мас.ч. відбувається підвищення адгезійної міцності до 26,4 МПа та 25,6 МПа відповідно. Поступове підвищення характеристики обумовлене утворення більшої кількості хімічних зв'язків між поверхнею частинок наповнювача та активними групами епоксидного в'язучого, що визначається збільшенням питомої поверхні частинок наповнювача. Максимальне значення адгезійної міцності (27,3 МПа) отримано у випадку введення мінерального наповнювача в кількості 120 мас.ч., що пов'язано з оптимальним вмістом річкового піску, за якого відбувається формування максимальної кількості хімічних зв'язків. З підвищенням вмісту наповнювача до 140 мас.ч. адгезійна міцність знижується до 24,4 МПа, що пов'язано з надлишковим вмістом наповнювача, який погано змочується епоксиполімерним в'язучим.

Використання річкового піску більшої фракції (0,2 мм) призводить до зниження адгезійної міцності на 30...32% порівняно з адгезійною міцністю епоксикомпозитів з розміром фракції 0,1 мм. Це обумовлено наявністю в об'ємі композиту частинок кубічної форми, які мають гострі грані та вершини, що виконують роль концентраторів напружень.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

В межах наповнення 50...120 мас.ч. адгезійна міцність не змінюється, що визначається утворенням оптимальної кількості хімічних зв'язків. У випадку введення наповнювача в кількості 140 мас.ч. адгезійна міцність різко знижується до 14 МПа.

Аналогічна ситуація прослідковується у випадку введення річкового піску з фракцією 0,3 мм та 0,5 мм. Стабільні значення адгезійної міцності епоксикомпозитний матеріал зберігає за менших ступеней наповнення, оскільки у випадку підвищення вмісту наповнювача зростає кількість концентраторів напружень.

Адгезійна міцність епоксикомпозитних матеріалів наповнених будівельним гіпсом в кількості 20 мас.ч. становить 20,3 МПа. З підвищенням вмісту наповнювача адгезійна міцність зростає до 28,7 МПа у випадку введення гіпсу в кількості 80 мас.ч. Частинки гіпсу мають малі розміри та велику питому поверхню, що забезпечує формування більшої кількості хімічних зв'язків. З підвищенням вмісту наповнювача до 100 мас.ч. адгезійна міцність різко знижується до 18,7 МПа, через порігшення змочування.

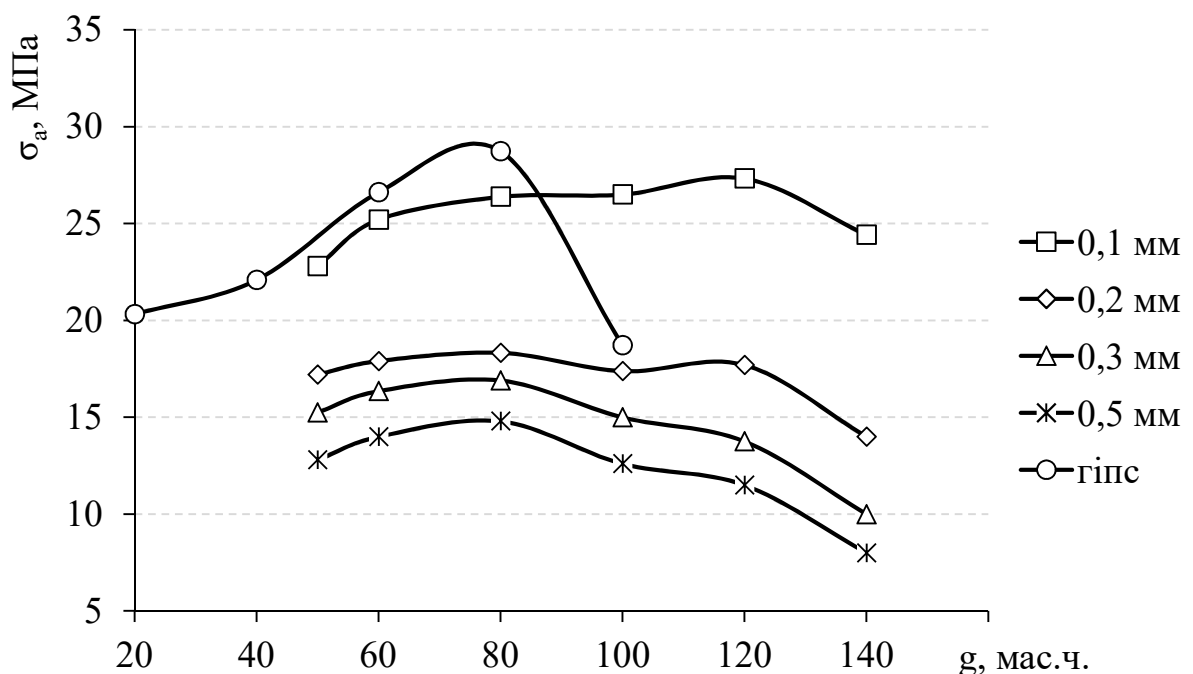


Рисунок 3.1 – Вплив вмісту мінерального наповнювача на адгезійну міцність залежно від розміру фракції частинок порошку

Найвищу твердість мають епоксикомпозитні матеріали з вмістом річкового піску 100 мас.ч. фракції 0,1 мм (рисунок 3.2). Такі результати отримано через компактне розташування частинок наповнювача в епоксиполімерній матриці. З підвищенням вмісту наповнювача до 120 мас.ч. твердість різко знижується у 3 рази порівняно з твердістю епоксикомпозитів, які мають оптимальний вміст наповнювача в кількості 100 мас.ч. Це пов'язано з розшаруванням частинок в епоксиполімерній матриці.

Використання більших фракцій річкового піску призводить до зниження твердості епоксикомпозитів, оскільки частинки річкового піску через наявність гострих кутів призводять до появи концентраторів напружень.

У випадку використання часток розміром 0,5 мм відбувається підвищення твердості епоксикомпозитів порівняно з твердістю епоксикомпозитів з розмірами частинок 0,2 мм та 0,3 мм. Частинки більшого розміру здатні чинити опір пластичній деформації епоксиполімерної матриці за рахунок ускладненого переміщення макромолекул полімеру.

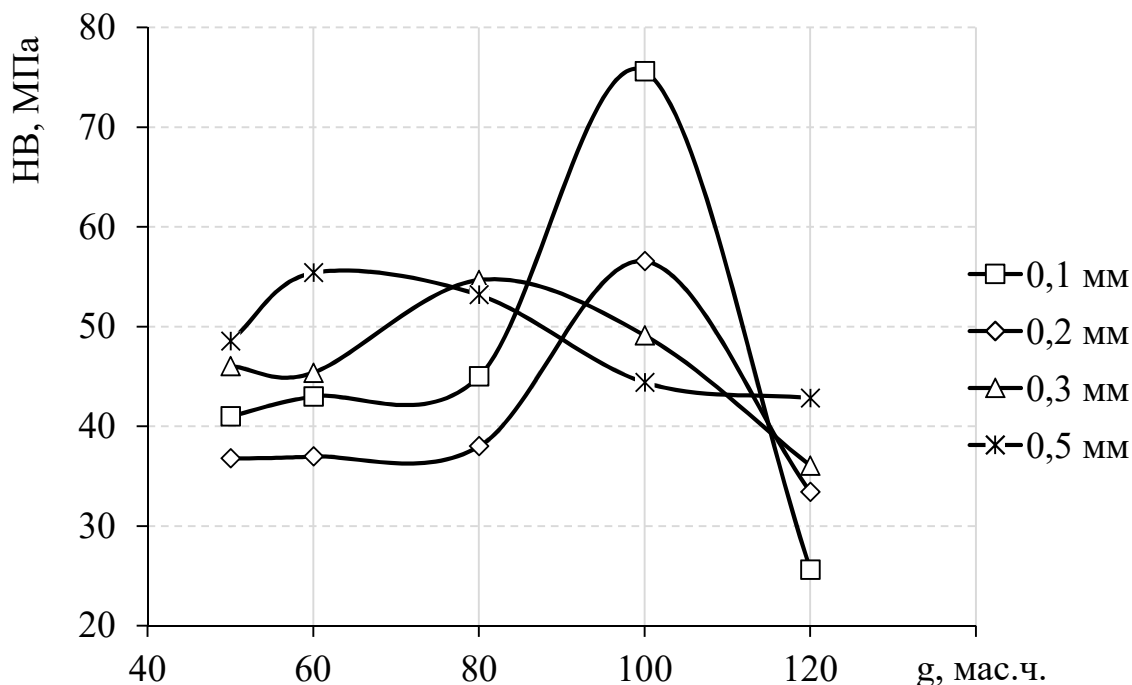


Рисунок 3.2 – Залежність твердості епоксикомпозитів від вмісту річкового піску та розміру фракції частинок

Найвищу твердість (40,3 МПа) мають епоксикомпозити з вмістом будівельного гіпсу в кількості 20 мас.ч. (рисунок 3.3). Це обумовлено здатністю системи формувати структуру з максимальною кількістю хімічних зв'язків. З підвищенням вмісту наповнювача до 40...60 мас.ч. твердість знижується на 46...50% через погіршення в'язучого змочувати поверхню дрібнодисперсних частинок будівельного гіпсу. У випадку використання гіпсу в кількості 80 мас.ч. та 100 мас.ч. твердість зростає, що визначається домінуючим впливом блокувальної дії частинок до переміщення у епоксиполімерній матриці з високим ступенем наповнення.

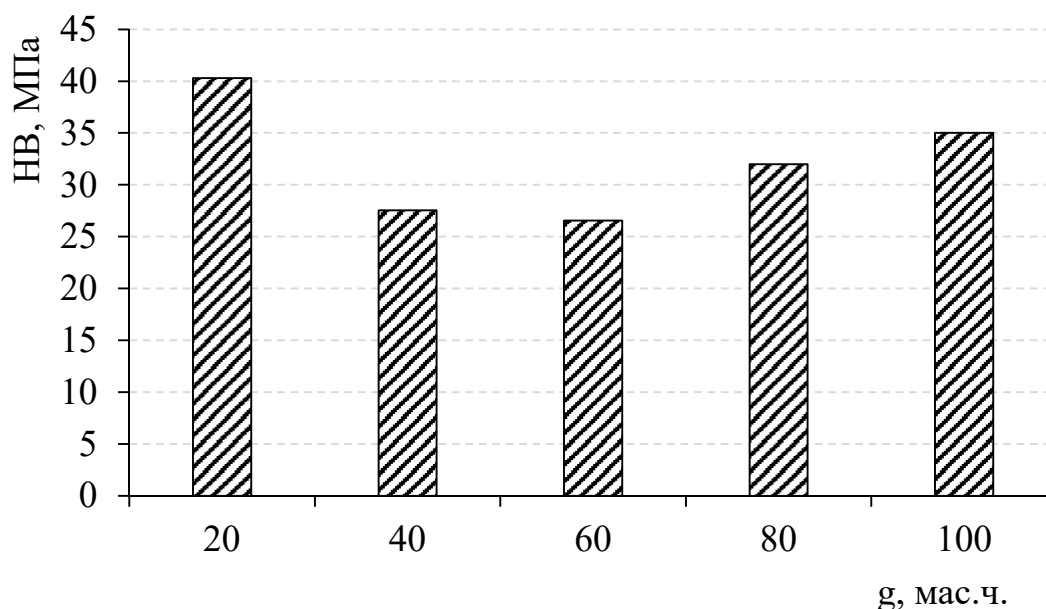


Рисунок 3.3 – Залежність твердості епоксикомпозитів від вмісту будівельного гіпсу

Значення ударної в'язкості епоксикомпозитних матеріалів, які містять частинки річкового піску розміром 0,1 мм, становить 2,1 кДж/м² (рисунок 3.4). З підвищенням розміру фракції ударна в'язкість знижується на 23...25%, що обумовлено наявністю частнок з гострими кутами, які стріяють поширенню тріщини в крихкій епоксиполімерній матриці. Частинки розміром 0,5 мм різко

знижують ударну в'язкість ($1,29 \text{ кДж/м}^2$) епоксикомполімерів через присутність крупних частинок кубічної форми.

У випадку введення частинок річкового піску в кількості 120 мас.ч. відбувається підвищення ударної в'язкості епоксикомполімерів з розміром частинок 0,1 мм, які здатні компактно розміщатися в епоксиполімерній матриці та чинити опір поширенню тріщини. З підвищенням розміру фракції ударна в'язкість знижується порівняно з ударною в'язкістю епоксикомполімерів, які містять частинки розміром 0,1 мм, однак ударна в'язкість епоксикомполімерів з вищим ступенем наповнення є вищою порівняно з досліджуваною характеристикою епоксикомполімерів, які мають ступінь наповнення 100 мас.ч. Наявність частинок наповнювача в більшій кількості забезпечує опір матеріалу до поширення тріщини.

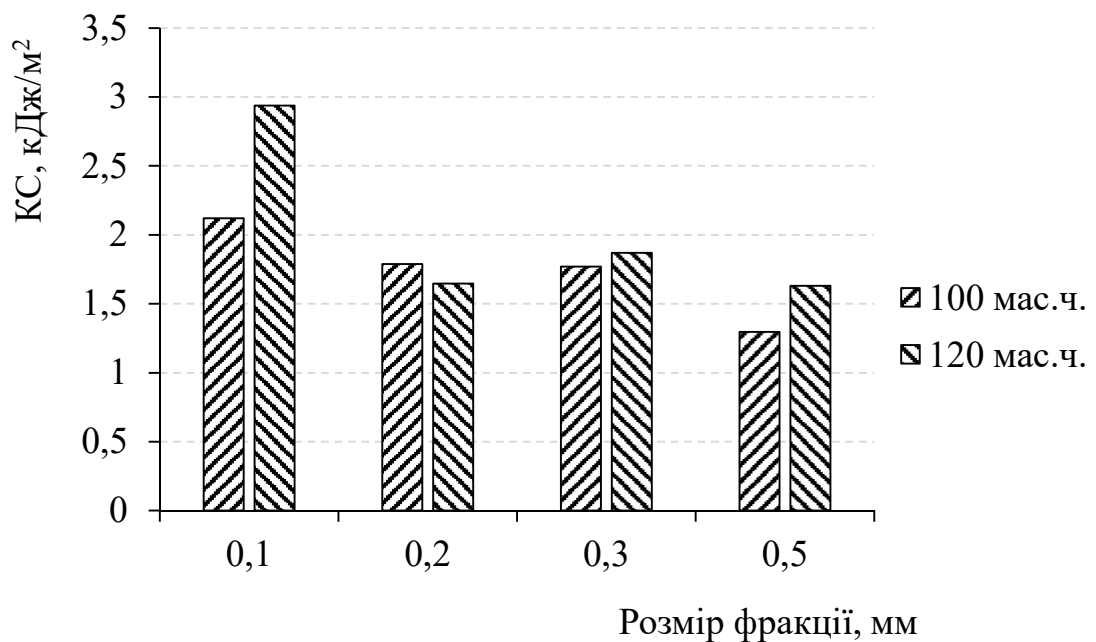


Рисунок 3.4 – Залежність ударної в'язкості епоксикомполімерів від вмісту річкового піску та розміру фракції частинок

Значення ударної в'язкості епоксикомполімерів, які наповнені частинками будівельного гіпсу, перебувають в кореляційній залежності з твердістю в заданому діапазоні досліджень механічних характеристик (рисунок 3.5). Це

обумовлено здатністю частнок будівельного гіпсу утворювати хімічні зв'язки за низького ступеня наповнення (20 мас.ч.) та підвищувати ударну в'язкість у високонаповненій системі (100 мас.ч.) через здатність наповнювача поглинати частину динамічної енергії.

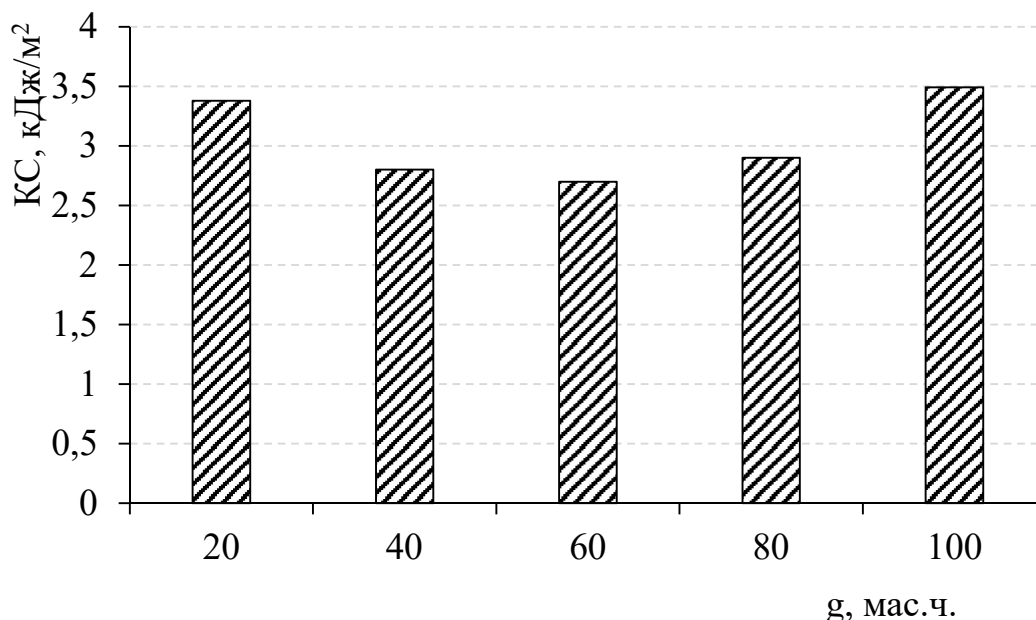
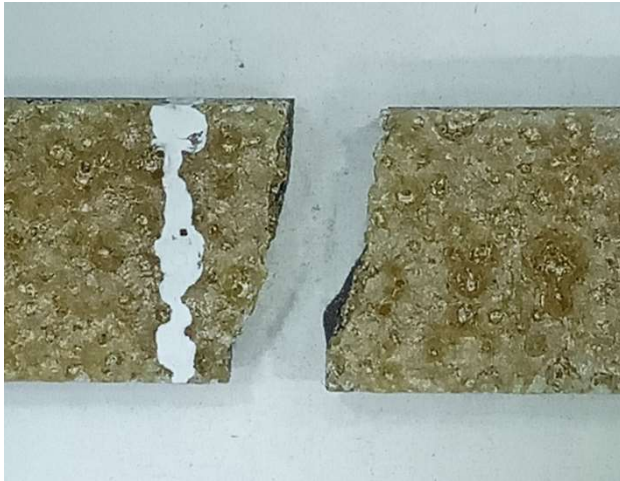


Рисунок 3.5 – Залежність ударної в'язкості епоксикомпозитів від вмісту будівельного гіпсу

Аналіз напрямку поширення тріщини в епоксикомпозитному матеріалі, який наповнений частинками річкового піску в кількості 120 мас.ч., дозволяє оцінити здатність матеріалу чинити опір динамічним навантаженням. Епоксикомпозити з частинками річкового піску розміром 0,1 мм мають вищу стійкість до руйнування під дією динамічного навантаження, оскільки напрям поширення тріщини має відхилення на 35° від напрямку дії навантаження (рисунок 3.6, а). З підвищенням розміру частинок відхилення зменшується до 20° (рисунок 3.6, б), що вказує на зниження опору матеріалу до дії динамічного навантаження. Епоксикомпозити з розміром частинок 0,3 мм руйнуються майже без відхилення (рисунок 3.6, в), що пов'язано з низькою динамічною стійкістю таких епоксикомпозитів. Введення частинок річкового піску з

розміром частинок 0,5 мм не забезпечує зростання ударної в'язкості, хоча відхилення поширення тріщини становить 15° , що пов'язано з наявністю в матриці значної кількості крупних частнок, які утворюють малу кількість хімічних зв'язків.



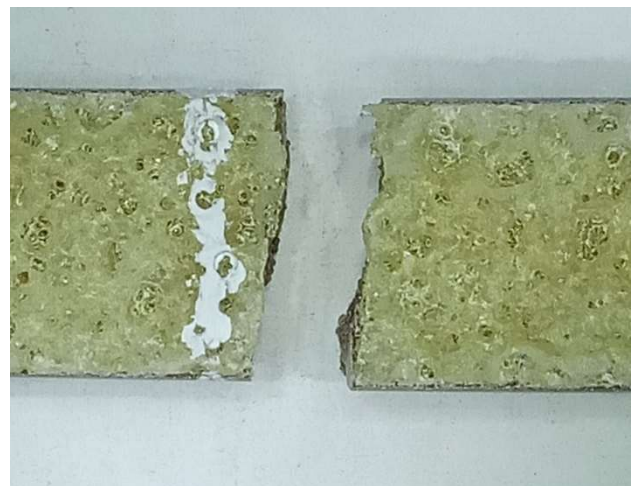
а



б



в



г

Рисунок 3.6 – Загальний вигляд епоксикомпозитних зразків з вмістом річкового піску 80 мас.ч. після дії динамічного навантаження:

а – 0,1 мм; б – 0,2 мм; в – 0,3 мм; г – 0,5 мм

Епоксикомпозити з наповнювачем меншої фракції (0,1 мм та 0,2 мм) мають низькі значення інтенсивності вагового зношування, що вказує на підвищену стійкість матеріалу до зношування (рисунок 3.7). З підвищенням

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

розміру частинок до 0,3 мм та 0,5 мм інтенсивність вагового зношування різко зростає, що обумовлено викришуванням частинок наповнювача.

Значне зростання інтенсивності зношування зафіксовано для епоксикомпозитів, що містять підвищений вміст наповнювача (120 мас.ч.). Це обумовлено руйнуванням крийких крупних частинок та видаленням їх із зони трибовзаємодії.

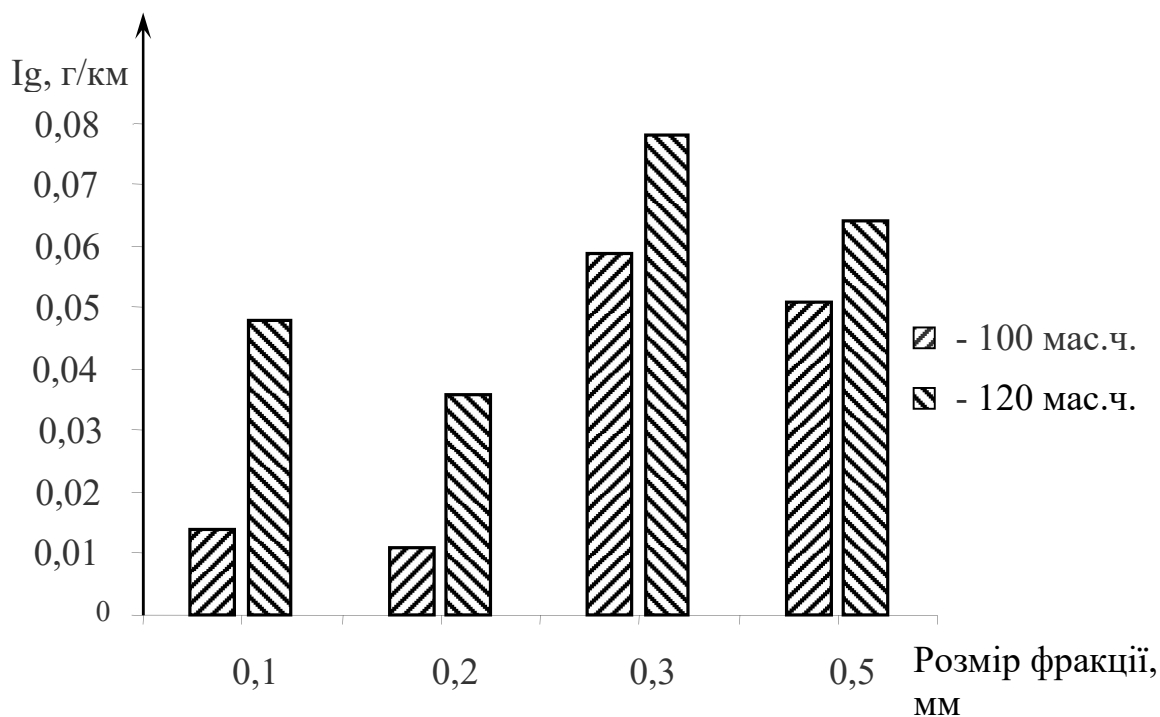


Рисунок 3.7 – Залежність інтенсивності вагового зношування від вмісту річкового піску та розміру фракції

3.2. Розробка технологічного процесу формування епоксикомпозитних покриттів

Процес підготовка компонентів епоксидної композиції (ЕД-20, ПЕПА та наповнювачі) до змішування містить наступні операції. Підігрівання ЕД-20 до температури 25...30 °С для підвищення рідкотекучості. Сушіння, механічне подрібнення річкового піску та просіювання.

Розрахунок кількісного вмісту компонентів у масових частинах на 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20. Композицію для формування адгезійного

шару покриття готують наступним чином: до епоксидної смоли вводять затверджувач (поліетиленполіамін) в кількості 12 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидної смоли. Після механічного змішування вводять порошок будівельного гіпсу в кількості 20 мас.ч. та знову змішують протягом 5...7 хв для отримання однорідної суміші. Для забезпечення необхідної в'язкості використовують розчинник марки «647».

Композицію зносостійкого шару готують наступним чином: після змішування епоксидної смоли та затверджувача вводять порошок річкового піску в кількості 100 мас.ч. з розміром фракції 0,1 мм з періодичним механічним змішуванням композиції для забезпечення високої однорідності системи протягом 5 хв. Температура матеріалів для приготування композиції повинна бути не нижче 18 °С.

З метою уникнення швидкого видалення розчинника тара з лакофарбовим матеріалом повинна бути щільно закритою. Перед відкриттям тари ретельно очистити зовнішню поверхню від пилу та забруднень, щоб запобігти попаданню сторонніх домішок. Тара для приготування композиції повинна бути сухою, чистою з щільною кришкою.

Композицію гунтівного шару наносять методом наливу за температури 20...25 °С і відносній вологості повітря не більше 65...70 % товщиною 0,5...1,0 мм. Зносостійкий шар наносять на поверхню гунтівного шару товщиною 1...2 мм.

Під час нанесення епоксиполімерної композиції необхідно забезпечити рівномірність товщини ґрунтового шару та зносостійкого покриття. У випадку нерівномірного нанесення епоксикомпозитної композиції відбувається формування напливів, що потребує регулювання кількості розчинника для високої рідкотекучості.

Послідовність проведення технологічних операцій представлено у таблиці 3.1.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Таблиця 3.1 – Схема технологічного процесу формування епоксикомпозитних покриттів

Номер операції	Назва операції	Структура операції	Обладнання, матеріали
005	Заготівельна	<ol style="list-style-type: none"> 1. Просушити наповнювачі у сушильній шафі за температури 120°C протягом 1,5...2 год. 2. Просіяти порошки через сита. 3. Провести дозування компонентів. 4. Провести змішування епоксидної смоли з затверджувачем. 5. Змішати композицію з наповнювачем. 	<p>Сушильна шафа.</p> <p>Набір сит. Ваги. Шнековий змішувач. Шнековий змішувач.</p>
010	Формувальна	<ol style="list-style-type: none"> 1. Підготувати поверхню підлоги для нанесення покриттів. 2. Очистити поверхню в місцях нанесення покриття. 3. Провести формування ґрунтового шару покриття. 	<p>Щітка.</p> <p>Компресор.</p> <p>Лопатка.</p>
015	Витримка	Провести витримку для структурування ґрунтового шару	
020	Формувальна	<ol style="list-style-type: none"> 1. Підготувати поверхню підлоги для нанесення зносостійкого покриття. 2. Очистити поверхню в місцях нанесення покриття. 3. Провести формування зносостійкого шару покриття. 	<p>Щітка.</p> <p>Компресор.</p> <p>Лопатка.</p>
025	Витримка	Провести витримку для структурування зносостійкого шару	
030	Контрольна	1. Перевірити покриття на рівномірність нанесення, відсутність дефектів (відшарування, тріщини).	

ВИСНОВКИ

Максимальну адгезійну міцність (27,3 МПа) мають епоксикомпозитні покриття з вмістом річкового піску в кількості 120 мас.ч., що пов'язано з оптимальним вмістом наповнювача, що забезпечує формування максимальної кількості хімічних зв'язків.

Найвищу твердість мають епоксикомпозитні матеріали з вмістом річкового піску 100 мас.ч. розміром фракції 0,1 мм, що визначається компактним розташування частинок наповнювача в епоксиполімерній матриці.

Ударна в'язкість епоксикомпозитів підвищується у випадку введення частинок річкового піску в кількості 120 мас.ч. з розміром частинок 0,1 мм, які компактно розміщені в епоксиполімерній матриці та здатні чинити опір поширенню тріщини. Наявність частинок наповнювача в більшій кількості забезпечує опір матеріалу до поширення тріщини.

Епоксикомпозити з наповнювачем меншої фракції (0,1 мм та 0,2 мм) мають низькі значення інтенсивності вагового зношування, що вказує на підвищену стійкість матеріалу до зношування, оскільки частинки наповнювача утворюють міцні хімічні зв'язки з епоксиполімерною матрицею.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Barreira E., Freitas V. P. (2007). Evaluation of building materials using infrared thermography. *Construction and building materials*, 21(1), 218-224.
2. Okuda M., Nikaido T., Maruoka R., Foxton R.M., Tagami J. (2007). Microtensile bond strengths to cavity floor dentin in indirect composite restorations using resin coating. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 19(1), 38-46.
3. Papatzani S. (2001). Polymer composites in flooring systems. BEng Dissertation, University of Wales, Cardiff School of Engineering.
4. Ghabezi P., Harrison N. (2020). Mechanical behavior and long-term life prediction of carbon/epoxy and glass/epoxy composite laminates under artificial seawater environment. *Mater. Lett.* 261, 127091.
5. Heriyanto, Pahlevani F., Sahajwalla V. (2019). Effect of glass aggregates and coupling agent on the mechanical behaviour of polymeric glass composite. *J. Clean. Prod.*, 227, 119-129.
6. Girge A., Goel V., Gupta G., Fuloria D., Pati P.R., Sharma A., Mishra V.K. (2021). Industrial waste filled polymer composites – A review. *Mater. Today Proc.*, 320. 128798.
7. Fayemi O.S., Giwa A.A., Gabriel O.A. (2023). Polymer Tiles from Polyethylene Wastes and Kaolin: Mechanical Properties and Durability. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 8(1), 5 pages.
8. Chen W., Zhang J., Qi X., Tian P., Feng Z., Qin W., Wu D., Liu L., Wang Y. (2024). Recent Progress on Anti-Slip and Highly Wear-Resistant Elastic Coatings: An Overview. *Coatings*, 14(1), 4.
9. Soni A., Das P.K., Yusuf M., Kamyab H., Chelliapan S. (2022). Development of sand-plastic composites as floor tiles using silica sand and recycled thermoplastics: A sustainable approach for cleaner production. *Scientific Reports*, 12, 19635.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

10. Alexander K., Danladi Y., Pierre K., Mike W., David C.W., Christopher C. (2018). Recycling Waste Plastic in Developing Countries: Use of Low-Density Polyethylene Water Sachets to form Plastic Bonded Sand Blocks. Waste Management, 80(8): 112-118.

11. Dinesh S., Dinesh A., Kirubhakaran K. (2016). Utilization of Waste Plastic in Manufacturing of Bricks and Paver Blocks. International Journal of Applied Engineering Research, 11(3): 364-368.

12. Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Барановський В.Б., Кочевих М.О., Гасан Ю.Г., Константинівський Б.Я., Ракша В.О. Будівельне матеріалознавство. – К.: «Видавни цтво Ліра-К», 2015. – 624 с.

13. Luigi, N.M. Composite Materials a Vision for the Future / N.M. Luigi, M.E. Milella. – London: Editors Springer-Verlag London / Limited, 2011. – 187 p.

14. Harini B.V. (2015). Use of Recycled Plastic Waste as a partial replacement for fine aggregate in Concrete. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering, and Technology; pp. 85-96.

15. Konin A (2011). Use of plastic wastes as a binding material in the manufacture of tiles: a case study of wastes with a basis of polypropylene. Material structures J RILEM; 1381–1387.

16. Nikje M., Khanmohammadi M., Garmarudi A., Haghshenas M. (2012). Nanosilica reinforced epoxy floor coating composites: preparation and thermophysical characterization. Current Chemistry Letters, 1(1), 13-20.

17. Velumani P., Karthik S.G. (2017). Development of Eco-Friendly Pressed Roof Tiles: A Prologue Study. Int J.SciEng Res., 8(12), 2030-2033.

18. Ramaraj A.P., Nagammal A.N. (2014). Exploring the Current Practices of Post-Consumer PET Bottles and The Innovative Applications as A Sustainable Building Material. 30th International Plea Conference. Ahmedabad: Cept University Press; pp. 16-18.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

19. Данченко Ю.М., Яковлева Р.А., Андронов В.А. (2010). Бактерицидні епоксидні олігомери олігомерні композиції для будівництва // Наук. вісник буд-ва. 60, 59-65.

20. Li G., He Y., Zhu P. (2018). Tailored surface chemistry of SiO₂ particles with improved rheological, thermal-mechanical and adhesive properties of epoxy based composites for underfill applications, Polymer, 156, 111-120.

21. Liu Y., Liu C.H., Yuan P.Y., Yin X.T., Feng L.M. (2019). Progress in Research and Application of Marine Anti-Skid Coatings. Mater. Prot., 52, 111-115.

22. Bian Y., Cao L., Zeng D., Cui J., Li W., Yu Z., Zhang P. (2023). The tribological properties of two-phase hard and soft composite wear-resistant coatings on titanium alloys. Surf. Coat. Technol., 456, 129256.

23. Zhai W., Bai, L., Zhou R., Fan X., Kang G., Li, Y., Zhou K. (2021). Recent Progress on Wear-Resistant Materials: Designs, Properties and Applications. Adv. Sci., 8, 2003739.

24. Fan J., Jiang Y., Yi Y., Tian T., Yuan K., Xue J. (2022). Effects of load and environment on the durability and anti-skid performance of road heat-reflective coating. Constr. Build Mater., 346, 128520.

25. Sui L. L. (2018). Preparation and corrosion resistance of nano SiO₂-graphene oxide/epoxy composite coating Acta Materiae Compositae Sinica, 35, 1716-24.

26. Ateya T., Balcı B., Bayraktar O. Y., Kaplan G. (2019). Floor Coating Materials. 5th International Congress on Engineering, Architecture and Design, İstanbul, Türkiye, 431-438.

27. Ramakrishnan T., Karthikeyan K.R., Tamilselvan V., Sivakumar S., Gangodkar D., Radha H. R., Singh A.N., Waji Y.A. (2022). Study of Various Epoxy-Based Surface Coating Techniques for Anticorrosion Properties. Advances in Materials Science and Engineering, 5285919.

28. Wu J.L., Liu J.L., Li P., Jia Y.Z., Liu P.C. (2019). Research progress of epoxy floor coatings. China Building Material Science Technology, 28, 28-30.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

29. Sadowski L., Kampa L., Chowaniec A. (2021). Enhanced adhesive performance of epoxy resin coating by a novel bonding agent, *Construction and Building Materials*, 301, 124078.

30. Tambe S.P., Jagtap S.D., Choudhari R.N., Mallik B.P. (2016). Influence of cross-linking agents and curing condition on the performance of epoxy coating, *Pigment & Resin Technology*, 45.

31. Wang C., Han Y., Wang W., Liu J., Wang N., Hou B., (2021). Polyvinyl chloride/epoxy double layer powder coating enhances coating adhesion and anticorrosion protection of substrate, *Progress in Organic Coatings*, 158, 106335,

32. Chowaniec-Michalak A., Czarnecki S., Sadowski L. (2024). Towards the Use of Waste Limestone Powder as a Filler for Epoxy Coatings in Floors: Research on Mechanical Properties. *Concrete-Polymer Composites in Circular Economy (ICPIC 2023)*, Springer Proceedings in Materials, 61, 423-436.

33. Zurowski W., Zepchło J., Krzyzak A., Gevorkyan E., Rucki M., Siek E., Białkowska A. (2021). Wear Resistance of the Glass-Fiber Reinforced Polymer Composite with the Addition of Quartz Filler. *Materials*, 14(14), 3825.

					БР 1625.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47