

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності
Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»
Модифікування епоксикомпозитних покриттів
будівельного призначення /
Modification of epoxy composite coatings for
construction purposes

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМЗ-41
Рашкевич Віолетта Володимирівна

(підпис)

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

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., професор
Кашицький Віталій Павлович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“03 ” січня _____ 2026 року

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

Рашкевич Віолетті Володимирівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модифікування епоксикомпозитних покриттів будівельного
мпризначення / Modification of epoxy composite coatings for construction purposes

керівник роботи Кашицький Віталій Павлович, к.т.н., професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 21.12.25 року № 540/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
« 19 » травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи літературні джерела, властивості вихідних
матеріалів, методики досліджень фізико-механічних властивостей

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) вступ; розділ 1 Огляд технічної літератури;
розділ 2 Матеріали та методики досліджень; розділ 3 Властивості
модифікованих епоксикомозитів; висновки; список використаних джерел;
додатки

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

1. Мета та завдання роботи - 1л ф.А4, 2. Формування та дослідження зразків - 1 л ф.А4,

3. Дослідження адгезійної міцності -1л ф.А4, 4. Дослідження твердості за Брінеллем -1л ф.А4,

5. Дослідження вмісту гель-фракції -1л ф.А4, 6. Аналіз поверхні зразків після дослідження -

2л ф.А4, 7. Висновки - 1 л ф. А4.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Н. контоль</i>	<i>Мисковець С.В., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	<i>Вступ, розділ 1 Огляд технічної літератури</i>	<i>05.05.26</i>	
2	<i>Розділ 2 Матеріали та методики досліджень</i>	<i>12.05.26</i>	
3	<i>Розділ 3 Властивості модифікованих епоксикомпозитів</i>	<i>19.05.26</i>	

Здобувач вищої освіти _____ *Рашикевич В.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ *Кашицький В.П.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Рашкевич В.В. Модифікування епоксикомпозитних покриттів будівельного призначення. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

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

В роботі подано критичний аналіз літературних джерел, подано характеристику взаємопроникаючих структур на основі реактопластів та особливості формування полімеркомпозитів.

В роботі представлено характеристику компонентів у вихідному стані, подано опис методик визначення фізико-механічних характеристик епоксикомпозитних матеріалів. Визначено оптимальний вміст та вплив мінеральних наповнювачів на фізико-механічні характеристики епоксикомпозитних покриттів.

Бакалаврська робота складається з графічної частини та пояснювальної записки.

Пояснювальна записка містить 37 сторінок формату А4, 1 таблицю, 9 рисунків та 30 літературних джерел. Графічна частина містить 8 листів формату А4 у додатку А.

Ключові слова: цемент, гіпс, крейда, хімічні зв'язки, адгезійна міцність, твердість, ступінь структурування.

					БР 5426.00.00.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Модифікування епоксикомпозитних покриттів будівельного призначення			Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	Рашкевич									
Перевірив	Кашицький								3	37
								ЛНТУ, кафедра матеріалознавства, гр. ПМЗ-41		
Н.контр	Мисковець									
Затв.	Імбінович									

ANNOTATION

Rashkevych V.V. Modification of epoxy composite coatings for construction purposes. Manuscript.

Bachelor's qualification work EP "Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

Bachelor's qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources, and appendix.

The work presents a critical analysis of literary sources, a characteristic of interpenetrating structures based on thermosets and the features of the formation of polymer composites.

The work presents a characteristic of the components in the initial state, a description of the methods for determining the physical and mechanical characteristics of epoxy composite materials. The optimal content and influence of mineral fillers on the physical and mechanical characteristics of epoxy composite coatings are determined.

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

The explanatory note contains 37 A4 pages, 1 table, 9 figures and 30 references. The graphic part contains 8 A4 sheets in Appendix A.

Keywords: cement, gypsum, chalk, chemical bonds, adhesive strength, hardness, degree of structuring.

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Особливості застосування епоксидних смол в будівництві.....	7
1.2. Властивості модифікованих епоксидних полімерів.....	9
1.3. Висновки і постановка задач досліджень.....	18
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	20
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	20
2.2. Методи визначення фізико-механічних характеристик.....	23
РОЗДІЛ 3 ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ.....	26
3.1. Дослідження фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів.....	26
3.2. Аналіз стану зразків після впливу фізико-механічних факторів.....	30
ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	34
Додатки	

ВСТУП

Епоксидні смоли широко використовуються для різних комерційних застосувань, зокрема в аерокосмічній промисловості як матричні композити на основі вуглецевого волокна, армованих полімерами. Це пов'язано з їхніми чудовими властивостями, технологічністю, відносно низькою вартістю, а також високими механічними, тепловими та електричними характеристиками.

Однак чиста епоксидна система має певні недоліки, серед яких крихкість та низьке видовження після затвердіння, що обмежує експлуатаційні характеристики композиту. Для усунення цих недоліків застосовують різні методи модифікування та зміцнення епоксидних систем. Серед них особливу увагу привертає формування взаємопроникної полімерної структури, яка забезпечує синергетичне поєднання властивостей двох різних полімерів: підвищена в'язкість досягається завдяки армуванню термопластами, тоді як термореактивні смоли відповідають за високу статичну міцність.

Окрім взаємопроникних полімерних структур, сучасні дослідження спрямовані на використання нанонаповнювачів, каучукових модифікаторів та біополімерних добавок. Такі підходи дозволяють значно покращити міцність на розрив, ударну в'язкість, адгезію до бетонних поверхонь та довговічність покриттів. У будівельній галузі це має особливе значення, адже епоксикомпозитні покриття застосовуються для захисту цементних підлог та бетонних конструкцій від зношування, корозійного руйнування та для забезпечення декоративного вигляду.

Таким чином, актуальність теми визначається активними дослідженнями у напрямку створення нових полімеркомпозитних матеріалів, здатних забезпечити комплексний захист будівельних конструкцій та підвищити їх експлуатаційні характеристики.

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Особливості застосування епоксидних смол в будівництві

Епоксидна смола є важливою термореактивною смолою, яка використовується у виробництві покриттів [1], клеїв, електронних матеріалів тощо. Епоксидні термореактивні смоли були відкриті в минулому столітті і мають чудові характеристики, такі як низька вартість, легкість обробки, краща хімічна та термічна стійкість, чудові електричні та механічні властивості тощо. Ці характеристики дозволяють використовувати їх як потенційну матрицю для широкого спектру застосувань, таких як електричні та електронні пристрої, аерокосмічне та автомобільне виробництво тощо [2]. Однак крихкість та низьке видовження після затвердіння чистої епоксидної системи обмежують її потенціал. У літературі було прийнято кілька стратегій для вирішення цієї проблеми. Серед усіх цих методологій формування взаємопроникної полімерної структури шляхом включення термопластичного або термореактивного матеріалу в крихку епоксидну смолу є привабливим підходом до покращення міцності модифікованої системи. Ця методологія зазвичай призводить до покращення механічних властивостей модифікованої епоксидної системи. Вміст армуючої фази, рухливість ланцюгів, хімічна функціоналізація та морфологія, здається, є основними факторами, що впливають на міцність на розрив таких систем.

В епоксидних смолах утворення тріщин зазвичай відбувається на їх вільних поверхнях, які поширюються далі з поглинанням енергії, що призводить до руйнування [3]. Таким чином, особливий інтерес представляє покращення стійкості до тріщиноутворення епоксидних полімерів, щоб розкрити їх повний потенціал. Руйнівність матеріалу зазвичай визначається як його опір росту тріщини та зазвичай оцінюється через коефіцієнт

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інтенсивності напружень КС або критичну швидкість вивільнення енергії деформації. Це обмеження крихкого руйнування також спостерігається, коли епоксидні термореактивні системи використовуються як матриця в вуглецево-армованих полімерних композитах, як високоефективні легкі матеріали, зокрема в аерокосмічному секторі.

Волокнисто-армовані композитні матеріали зазвичай мають низьку стійкість до міжшарового руйнування, спричиненого ударним пошкодженням через нижчу міцність та тріщиностійкість епоксидної матриці. Отже, тріщиностійкість матриці впливає на стійкість композитів до пошкоджень, що є актуальним в аерокосмічних застосуваннях, і, як наслідок, зміцненню епоксиполімерів приділяється значна увага [4]. Для армування бетону в конструкціях арматурні стрижні з'єднуються дротом, щоб анкерна система була міцно закріплена в бетоні [5]. Зв'язок між цементом та сталевую арматурою відіграє важливу роль у фізико-хімічній поведінці анкерної системи. Загалом, тріщини в бетоні виникають внаслідок розтягуючих напружень, які можуть виникнути внаслідок перевантаження, перепадів температури та усадки, і призводять до поганих з'єднань, прослизання арматури та руйнування анкера. Було докладено багато зусиль для покращення адгезії сталевій арматурі до цементобетону, включаючи нанесення полімерних матеріалів на поверхню арматури та модифікацію складу бетонної суміші.

Зазвичай бетонні клеї поділяються на два типи: на основі епоксидної смоли та на основі латексу/полімеру. Цей вид матеріалів використовується для ремонту бетону, герметизації бетону, покращення фізико-хімічних властивостей бетону, а також з'єднання старого бетону з новим [6]. Деякі з переваг конструкційних клеїв це зміцнення структури та посилення з'єднання між матеріалами, використання у вологому середовищі, з'єднання елементів з поперечним перерізом, стійкість до корозії та швидке та просте встановлення. Монтаж арматури або болтів є одним з найпоширеніших методів у будівельній

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

галузі. Це включає широкий спектр конструкційних та неконструкційних з'єднань, а також зміцнення конструкцій. З цієї точки зору, покращення адгезійних властивостей є найефективнішим методом запобігання структурним пошкодженням шляхом зміцнення з'єднання металу з бетоном.

Сьогодні клеї на основі епоксидної смоли є найпопулярнішими клеями для систем кріплення сталевих арматур завдяки їх високій адгезійній міцності, швидкому та надмірному ущільненню, непроникності для вологи та морської води.

Встановлено, що арматура більшого діаметра має вищу ступінь руйнування у з'єднанні з бетоном, і для кращого з'єднання та відсутності крихкості довжина арматури повинна бути у п'ятнадцять разів більшою за діаметр арматури.

1.2. Властивості модифікованих епоксидних полімерів

Зміцнення епоксидних смол термопластами, яке вивчається з початку 1980-х років, вважається ефективним способом покращення в'язкості епоксидних смол без значного зниження бажаних властивостей, таких як жорсткість і міцність, термостабільність, хімічна стійкість і стійкість до повзучості, а також технологічність [7]. Було досліджено кілька термопластів для зміцнення епоксидних смол, таких як полісульфон (PSF), полі(ефірсульфон) (PES), полі(ефірїмід) (PEI), поліаміди (PA), полі(ефірефіркетон).

Науковцями досліджувався вплив кількох параметрів, таких як вміст армуючого компонента, структура та молекулярна маса армуючих компонентів, тип затверджувача для епоксидної смоли або параметри синтезу, для вивчення результируючих механічних властивостей термопластично модифікованих епоксидних систем [8].

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В деяких роботах досліджувався вплив вмісту армуючого компонента на механічні властивості (в'язкість руйнування) модифікованих епоксидних систем. Наприклад, дослідження включення сополімеру метилметакрилату акрилонітрилбутадієнстиролу (MABS) в епоксидну смолу (DGEBA/DDS) було досліджено в роботі [9]. Автори досліджували вплив вмісту армуючого компонента (4,76...16,6 мас. %) на отриману морфологію та механічні властивості модифікованої епоксидної системи. Мікроструктури зміцненої епоксидної системи, зроблені на різних етапах зшивання епоксидної смоли показали наявність морфології «фаза у фазі» (тобто частинки епоксидної смоли, обмежені термопластичними доменами, які додатково укладені в безперервну фазу епоксидної смоли, при 16,6 мас.% армуючого компонента. Подальші результати показали збільшення міцності на розрив та ударної в'язкості приблизно на 25% та 72% відповідно при додаванні 9 мас.% термопласту до епоксидної смоли; однак, спостерігалось зниження цих властивостей при подальшому додаванні армуючого компонента. Це зниження механічних властивостей пояснюється утворенням морфології «фаза у фазі».

В останні роки епоксидно-порошкові покриття широко використовуються як поверхневі функціональні захисні покриття для металевих листів завдяки їхнім чудовим декоративним властивостям [10], високій адгезійній міцності до основи, екологічності, корозійній стійкості та стійкості до стирання. Незважаючи на переваги, застосування епоксидно-порошкових покриттів обмежене через високі температури затвердіння та крихкість. Тому приготування модифікованих епоксидно-порошкових покриттів для покращення їх комплексних характеристик стало нагальною проблемою, яку необхідно вирішити. В деяких випадках вводили неорганічні наночастинки, частинки гуми та термопластичні смоли в епоксидну смолу для покращення її механічних властивостей [11]. Тим часом, інші дослідження повідомляють, що багато лужних прискорювачів твердіння, таких як третинні

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

аміни та азотні гетероциклічні сполуки, також додаються до епоксидних порошкових покриттів для отримання порошкових покриттів, що тверднуть за низьких температур. Дослідження показали, що додавання наночастинок SiO_2 призвело до значного покращення ударної в'язкості, міцності на розтяг та модуля пружності епоксидних порошкових покриттів. Було виявлено, що порошкові покриття, модифіковані нано- CaCO_3 , значно покращили механічні властивості та властивості на розтяг порівняно з немодифікованими порошковими покриттями. Автори роботи [12] повідомляють, що включення частинок гуми до складу епоксидних порошкових покриттів забезпечило хороші адгезійні та термічні властивості. Було проведено багато досліджень, які повідомляли про значне збільшення в'язкості розриву при додаванні гуми до епоксидних композитних матеріалів. Однак, є мало відомостей про гумомодифіковані епоксидно-композитні покриття.

Висока температура затвердіння епоксидно-порошкових покриттів обмежує їх застосування в термочутливих основах. Прискорювачі затвердіння – це клас речовин, які можуть ефективно знижувати температуру затвердіння та енергію активації реакції, а також скорочувати час затвердіння [13]. Основні сполуки, такі як азотні гетероциклічні сполуки та третинні аміни, здатні забезпечити вищу реакційну здатність у менших кількостях в епоксидних композитних матеріалах. Такі сполуки широко використовується в епоксидно-порошкових системах покриттів завдяки своїй відносно високій реакційній здатності, відносно слабкому запаху та твердим властивостям при кімнатній температурі. Однак такі добавки мають високу температуру плавлення та низьку сумісність з матрицею смоли, що обмежує їх застосування. Третинний амін – ще один високоефективний прискорювач затвердіння для епоксидної смоли. Сприяючий вплив третинних амінів на реакцію затвердіння пов'язаний з щільністю електронів на атомах азоту в їх молекулярній структурі та довжиною молекулярних ланцюгів [14]. Однак коротколанцюгові рідкі третинні амініні каталізатори мають високу каталітичну активність і можуть

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

затверджувати рідкофазні епоксидні смоли при кімнатній температурі, які не підходять для твердих епоксидно-порошкових покриттів. Дотепер не існує рішення, здатне вирішити проблему крихкості та високої температури затвердіння епоксидних покриттів. Щоб подолати крихкість та високу температуру затвердіння епоксидно-порошкових покриттів, у цьому дослідженні досліджували вплив карбокситермінального нітрильного каучуку (CNBR) як армуючого модифікатора в епоксидно-порошкових покриттях. CNBR – вид порошкового каучуку із середнім розміром 100 нм, був отриманий за допомогою комбінованих технологій опромінення та розпилювального сушіння [15], тоді як прискорювач є рідким довголанцюговим третинним аміном за кімнатної температури. Частинки каучуку інноваційно адсорбувалися довголанцюговими рідкими третинними амінами, а рідкі третинні аміни затверджувачі успішно застосовують до епоксидно-порошкових покриттів.

В роботі [16] епоксидне порошкове композитне покриття, модифіковане наночастинками, з низькою температурою затвердіння та високою в'язкістю було успішно виготовлено шляхом поверхневої адсорбції та змішування розплаву. CNBR був рівномірно диспергований в епоксидному покритті із середнім діаметром 100 нм. Епоксидні порошкові покриття продемонстрували найнижчу температуру затвердіння та найвищі механічні характеристики порівняно з чистими епоксидними покриттями. Трансмісійна електронна мікроскопія та скануюча електронна мікроскопія показали, що CNBR досяг нанорозмірної дисперсії в епоксидних покриттях. Механічні (ударна міцність, адгезійна міцність та коефіцієнт пружності), теплові та поверхневі властивості епоксидно-порошкових покриттів досліджували з метою врахування впливу CNBR для розробки нової та недорогої стратегії промислового виробництва епоксидно-порошкових нанокompозитних покриттів.

Запропоновано різні методології підвищення в'язкості епоксидних полімерів, включаючи: зміну щільності зшивання та молекулярної маси самої

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

епоксидної системи, хімічну модифікацію епоксидної смоли шляхом включення гнучкого каркаса та інтеграцію другої фази (тобто гуми, термопластів, гіперрозгалужених полімерів, неорганічних наночастинок тощо) [17]. Однак усі ці підходи мають обмеження, які необхідно враховувати для вибору відповідної стратегії зміцнення епоксидних полімерів. Перша стратегія зменшення щільності зшивки та відповідно збільшення молекулярної маси між зшивками епоксидної системи зазвичай призводить до підвищення в'язкості, але зі значним зниженням інших властивостей, включаючи температуру склування, міцність на розтяг та згин [18]. Другий підхід до зміцнення епоксидної смоли, що досягається шляхом хімічної модифікації її каркаса та забезпечення більшої рухливості між зшивками, може змінити термічну стабільність епоксидної системи. Сучасні промислово розроблені системи зазвичай являють собою хороший компроміс між двома вищезгаданими механізмами. Третій підхід, включення пластичної фази (тобто другої фази) до епоксидної системи, також може призвести до небажаних результатів. Наприклад, відомо, що додавання рідкого каучуку, такого як карбоксильно-термінальний бутадієн-акрилонітрил або аміно-термінальний бутадієн-акрилонітрил [19], до епоксидної смоли підвищує її в'язкість до розриву, але супроводжується втратою термічної стабільності через нижчу температуру розриву доданої фази. Тому додавання аморфних термопластів (тобто поліетерсульфону, полікарбонату тощо), які розчиняються з подальшим реакційно-індукованим фазовим розділенням, використовувалося як альтернативне рішення [20]. Однак цей підхід покращення в'язкості до розриву епоксидних полімерів також створює деякі труднощі при розчиненні високомолекулярного термопласту в епоксидній смолі, що призводить до поганої технологічності через збільшення в'язкості. Більш пізній підхід до уникнення цих проблем обробки стосується формування взаємопроникаючих сіток шляхом полімеризації компонента.

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Інший підхід до формування взаємопроникної полімерної структури (ВППС) складається з двох етапів: змішування двох різних полімерів, які є термодинамічно змішуваними, та зшивання цих полімерів для утворення сітки [21]. Структура ВППС, яка зазвичай утворюється в результаті реакції взаємопроникнення та щеплення, наприклад, між доменами більших розмірів, тоді як менші домени демонструють зміщену всередину температуру склування, зрештою демонструючи один пік склування при однорідному змішуванні на молекулярному рівні.

Поліуретан та ненасичений полієфір називають щепленою ВППС. Структури ВППС можуть бути сформовані за допомогою термопластиків або термореактивних смол для зміцнення крихких епоксидних смол.

Відомо, що структура ВППС надає кращим механічним властивостям (наприклад, в'язкості руйнування) модифікованій системі. Існує кілька інших цікавих характеристик ВППС, включаючи: поєднання бажаних властивостей двох різних полімерів, нерозчинність у будь-якому розчиннику тощо [22].

Наприклад, утворення сітки завдяки поєднанню двох несумісних полімерів, тобто міцного термопласту та крихкого термореактивного полімеру, забезпечує притаманні переваги кожного компонента, такі як покращена в'язкість, і походить від термопластів, тоді як термореактивні матеріали відповідають за високу температуру експлуатації. Однак коалесценція цих фаз обмежена через молекулярне переплетення зшитих фаз. У випадку полімеризації фазова поведінка безперервно розвивається; зафіксовано до чотирьох стадій формування системи: спочатку обидва полімери, відповідно їхні мономері, залишаються розчинними з прозорим розчином, розділення фаз відбувається під час полімеризації через механізм зародження та росту, що в деяких випадках може переходити до утворення взаємопов'язаних циліндрів, отже, спінодального розкладу, та подальша полімеризація призводить до росту доменів. Ця двофазна морфологія відіграє життєво важливу роль у покращенні характеристик результуючої системи,

таких як термічна стабільність або стійкість до руйнування. Температура склування є чітким показником фазової морфології та їх масштабів: дві різні температури склування зафіксовано для доменів більших розмірів, тоді як менші домени демонструють зміщену всередину температуру склування, зрештою демонструючи один пік склування при однорідному змішуванні на молекулярному рівні [23].

Збільшення вмісту армуючої фази зазвичай призводить до поступового збільшення в'язкості епоксидних полімерів, що пояснюється утворенням структури ВППС [24]. Однак після певного рівня концентрації армуючої фази, в'язкість модифікованої епоксидної системи наближається до межі, оскільки немає подальшої взаємодії між епоксидною смолою та армуючою фазою. У випадку ударної та розривної міцності, після певної концентрації армуючої фази зазвичай спостерігається тенденція до зниження, яка пов'язана з утворенням доменів, багатих на армуючу фазу, що зрештою гальмує розвиток структури ВППС. Однак, це зниження ударної в'язкості епоксидної системи можна вирішити, експериментуючи з розгалуженням та структурою термореактивної армуючої фази. Окрім вмісту армуючої фази, було також відзначено, що інші параметри впливають на механічні властивості зміцнених епоксидних полімерів, такі як молекулярна маса компонентів армуючої фази, різні агенти затвердіння тощо. Отже, кінцеві механічні властивості, включаючи в'язкість модифікованої епоксидної системи, можна точно налаштувати, контролюючи морфологію фаз та/або створюючи структуру ВППС.

Більше того, концепція формування напів-ВППС з використанням поліетиленіміну виявилася цікавою альтернативою для зміцнення епоксидної смоли для аерокосмічного застосування, завдяки її вищій температурі склування, вищій міцності та жорсткості за підвищених температур, добрій сумісності з епоксидною смолою тощо [25]. Цей підхід до формування ВППС може додатково полегшити з'єднання різних композитних деталей з чудовими

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

механічними властивостями, що є важливим процесом в аерокосмічній промисловості. На додаток до модифікації чистою епоксидною смолою, також було проведено приготування полімерних композитів зі зміцненої епоксидної смоли. У випадку модифікованої епоксидної системи на основі термореактивного зміцнювача, полімерні композити демонструють кращі механічні властивості (ударну в'язкість) порівняно з немодифікованою епоксидною смолою, тоді як підхід термопластичного зміцнення зазвичай знижує ударну в'язкість зміцненого полімерного композиту [26]. Тому все ще необхідні подальші дослідження для ефективного використання підходу термопластичної модифікації для приготування полімерних композитів аерокосмічного класу. Наприклад, формування напів-ВППС з використанням термопластичних багат шарових матеріалів (тобто тонких плівок) для зміцнення епоксидної смоли та використання цієї зміцненої епоксидної системи для виробництва полімерних композитів аерокосмічного класу було б цікавою областю досліджень для майбутніх робіт.

У роботі [27] було підготовлено нано-SiO₂-епоксидні клеї для анкерування сталевих арматур в бетоні. Спочатку наночастинки були модифіковані поверхнево за допомогою силану на основі епоксидної смоли для покращення їх міжфазної взаємодії з епоксидним зв'язуючим. Для оцінки характеристик клеїв було проведено тест на адгезію витягуванням. На основі результатів було отримано такі висновки:

Виявлено, що найвищий вміст силану при щепленні був досягнутий при концентрації силану в 10 разів більше стехіометричної концентрації, і модифікація поверхні не вплинула на кристалічну фазу наночастинок, але зменшила їх розміри.

Модифікація поверхні нано-кремнезему призвела до збільшення кута змочування епоксидної плівки приблизно на 19% та 67% порівняно з чистим епоксидним клеєм та епоксидним клеєм, що містить чисті наночастинки,

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

відповідно. Вона також змінила природу модифікованого нанокompозитного клею з гідрофільного на гідрофобний.

Додавання чистого нанокремнезему (1 мас.%) до епоксидної матриці призвело до збільшення міцності на розтяг, модуля розтягу, міцності на стиск та модуля стиску на 56, 81, 200 та 66% відповідно.

Додавання 1 мас.% модифікованого нанокремнезему до епоксидного клею призвело до збільшення міцності на розтяг, модуля розтягу, міцності на стиск та модуля стиску на 70%, 20%, 17% та 21% порівняно з епоксидним клеєм, наповненим чистим нанокремнеземом.

Модифікований нанокремнезем призвів до збільшення модуля пружності епоксидного нанокompозиту на 16% та 43% порівняно з чистим епоксидним клеєм та клеями, що містять чистий нанокремнезем, відповідно. Він також збільшив тангенс кута діелектричних втрат на 6% та 10% відповідно.

Використання поверхнево модифікованого нанокремнезему в епоксидній матриці призвело до покращення міцності на витягування приблизно на 40% та 25% і збільшення міцності на зсув на 33% та 18% порівняно з чистим епоксидним клеєм та клеєм, що містить нанокремнезем. Енергія адгезії була збільшена до 50% та 130% порівняно з чистим епоксидним нанокompозитом та чистими епоксидними клеями.

Епоксидний клей має добру міцність зчеплення як з арматурою, так і з бетоном, і руйнування системи відбувалося на межі розділу клею, але пластичність анкерної системи зменшилася при використанні епоксидного клею. Тип, розмір та властивості наповнювачів мають великий вплив на міцність зчеплення клейових з'єднань та передачу напружень між бетоном та сталеву арматурою [28]. Встановлено, що включення 0,5 мас.% наночастинок TiO_2 до клею покращило його властивості зчеплення, зносостійкість, міцність на розтяг та твердість. Додавання наночастинок призвело до збільшення зв'язку між сталлю та матрицею, особливо при

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

вищому вмісті цементу. Використання наночастинок Al_2O_3 також призвело до зниження розтріскування. Присутність наночастинок забезпечує кращі адгезійні властивості та міцність на розрив (до 28,5 МПа) епоксидної смоли. Створені міжфазні хімічні зв'язки посилювали гідрофобність поверхні. Наповнювачі та хімічні сполучні агенти можуть зміцнювати з'єднання між бетоном та сталевую арматурою. Також було досліджено вплив мікро- та наночастинок кремнезему на епоксидні клеї. Виявлено, що мікрочастинки кремнезему та їх розмір впливають на механічні властивості епоксидного клею та міцність склеювання зі сталевим стрижнем. Однак, наночастинки кремнезему спричинили погіршення властивостей, що пояснюється схильністю гідрофільних наночастинок до агрегації в органічній матриці.

1.3. Висновки і постановка задач досліджень

Взаємопроникна полімерна структура – це клас полімерних систем без ковалентних зв'язків між двома або більше полімерними макромолекулами, які принаймні частково переплетені на молекулярному рівні. Більше того, повне взаємопроникнення зазвичай не спостерігається на молекулярному рівні в ВППС, тоді як частинкові або біконтинуальні морфології радше формуються з характерними масштабами довжини порядку десятків нанометрів.

Розвиток морфології під час синтезу систем ВППС для обробки відіграє важливу роль у визначенні кінцевих властивостей системи. Структури ВППС можуть фазово розділятися або шляхом зародження та росту, що призводить до сферичних включень, або спінодального розкладу.

Переплетені морфології різних масштабів також можуть виникати через розділення фаз, яке також називають спінодальним розкладом. Вони зумовлені термодинамічною стабільністю гомогенного розчину на основі вільної енергії з динамікою, керованою дифузією. Фазова поведінка може характеризуватися верхньою критичною температурою розчину або нижньою

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

критичною температурою розчину. У полімерах можемо спостерігати обидва явища: ВППС та спінодальний розклад, або їх комбінацію. Деякі автори називають ВППС взаємопроникними полімерними сітками на полімерному масштабі, тоді як інші також називають це явищем фазового розділення в полімерах на більших масштабах. У структурі ВППС сітка двох зшитих полімерів переплітається один з одним на полімерному масштабі, тоді як у напів-ВППС переплетена сітка утворюється шляхом поєднання одного зшитого (термореактивного) полімеру та одного лінійного (термопластичного) полімеру. ВППС можуть бути утворені шляхом розчинення мономеру другого полімеру в сітці першого полімеру з подальшим зшиванням другого полімеру для утворення сітки (тобто послідовне ВППС) або шляхом змішування двох мономерів, а потім їх зшивання для утворення сітки (тобто одночасне ВППС).

Метою роботи є оптимізація вмісту мінеральних наповнювачів епоксикомпозитних матеріалів будівельного призначення.

Результатом критичного аналізу літературних джерел є постановка основних завдань, які необхідно виконати для досягнення поставленої мети:

- визначити ступінь структурування епоксикомпозитних матеріалів;
- визначити механічні характеристики епоксикомпозитних матеріалів з вмістом мінеральних наповнювачів;
- провести аналіз руйнування епоксикомпозитних зразків після фізико-механічних досліджень;
- визначити оптимальний вміст та природу наповнювача для формування епоксикомпозитних покриттів будівельного призначення.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

Основу композиції становить епоксидно-діанова смола марки ЕД-20 ISO 3673-1:2017 «Epoxy resins — Part 1: Designation», що являє собою високов'язку прозору рідину. Епоксидна смола затверджується за нормальній або підвищених температурах без зовнішнього тиску, що дозволяє працювати без термічного і пресового обладнання. Здатність затвердження цієї смоли без виділення побічних продуктів забезпечує невисоку пористість і значну щільність матеріалів. Основні фізичні властивості епоксидної смоли представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізичні властивості епоксидної смоли марки ЕД-20

Показник	Значення показника
Густина, г/см ³	1,16...1,2
Молекулярна маса	390...430
Вміст епоксидних груп, %	19,9...22,0
Вміст летких речовин, %	1,0
Умовна в'язкість за кульковим віскозиметром за температури 25°C, с	65
Вміст загального хлору, %	1,0

Для тверднення епоксидних композицій застосовували затверджувач поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70). ПЕПА призначений для затверджування епоксидних смол за кімнатної та понижених температурах в умовах високої вологості. На зовнішній вигляд епоксидна смола це рідина світло-жовтого або темно-бурого кольору без механічних добавок. Масова частка загального азоту може становити не менше 30 %.

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Формування епоксикомпозитних зразків проводили методом отримання однорідної композиції, до складу якої добавляли задані компоненти. Залежно від об'єму зразків використовували кількісний вміст компонентів у масових частинах на 100 мас. ч. епоксидної смоли (ЕД-20).

До епоксидної смоли (ЕД-20) та затверджувача вводили наповнювачі, які раніше були поміщені в сушильну шафу моделі СНОЛ-400 (рисунок 2.1) для видалення вологи. Отриману композицію заливали у спеціальні форми або наносили на підготовлену поверхню. За необхідності поверхню попередньо обробляли абразивним матеріалом для досягнення заданої шорсткості і знежирювали ацетоном. Затверджування епоксикомпозитів за нормальних умов тривало 24 год. Додаткову термічну обробку проводили у печі за температури 50 °С протягом 4 год, відхилення температури в якій не перевищувало ± 2 °С.



Рисунок 2.1 – Камера сушильної шафи з аеродинамічним перемішуванням потоків повітря моделі СНОЛ 400

Як наповнювачі використано цемент, крейда та будівельний гіпс, що являють собою дрібнодисперсні порошки.

Цемент отримують в результаті нагрівання гашеного вапна і глини або інших матеріалів подібного складу до температури 1450 °С [29]. За такої температури відбувається часткове плавлення і формуються гранули клінкеру. Для отримання порошкового цементу клінкер змішують з кількома відсотками гіпсу і подрібнюють. Гіпс регулює швидкість схоплювання, однак його можна частково замінити іншими сполуками сульфату кальцію. Деякі технічні умови дозволяють додавати інші матеріали під час подрібнення. Типовий клінкер має орієнтовний склад: 67 % CaO; 3,3 % Fe₂O₃; 22 % SiO₂; 2, 5 % Al₂O₃ % інших компонентів. У клінкері в більшості випадків присутні в невеликих кількостях інші фази, таких як оксид кальцію і лужні сульфати. Цемент найкраще зберігати в заводській упаковці або в щільно зав'язаних полімерних мішках. Найбільшої уваги до умов зберігання потребує високомарочний цемент. Максимальний термін зберігання такого матеріалу становить 2 роки.

Будівельний гіпс – це однорідний матеріал у вигляді порошку білого або світло-сірого кольору [30]. Виготовляють його з гіпсового каменю одним з двох способів: шляхом випалювання або подрібнення. Основною характеристикою цього матеріалу є швидке «загущення» і практично миттєве наступне затверджування. Останній процес відбувається в процесі розчинення напівводного сірчаноокислого кальцію й появи концентрованого розчину, у якому виникає реакція гідратації з формуванням двухводного сірчаноокислого кальцію. Головною особливістю гіпсу є здатність витримувати тиск від 5-ти до 25 кг/см². Для готування гіпсового розчину потрібно дві частини порошку й одна частина води. Отриману суміш варто використати відразу. Для схоплювання в процесі змішування до складу може бути доданий 1...2 % розчинний у воді глютиновий клей, після чого ємність із речовиною необхідно щільно закрити. Після затвердіння речовина збільшується в розмірі на 1 % від загальної маси, що у свою чергу є важливим функціональним показником для

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

будівельних робіт. Однак є в цього матеріалу й деякі недоліки. У в цьому переліку: низькі показники міцності й водостійкості, можливість легкої деформації виробів. До позитивних якостей можна додати – екологічна чистота й негорючість. Вироби із цієї натуральної речовини мають здатність поглинати надлишки вологи з повітря в приміщенні й навпаки – віддавати її, якщо повітря стає занадто сухим.

Крейда – це осадова напівзв'язна мазка низькоцементована гірська карбонатна порода, що на 90...99 % складається з кальциту, який містить кальцитові залишки морських планктонних водоростей та дрібні частинки черепашок найпростіших організмів. Крейда утворюється на дні морів внаслідок нагромадження органічних решток (переважно черепашок) і осадження CaCO_3 з морської води.

Основу хімічного складу крейди становить карбонат кальцію з невеликою кількістю карбонату магнію, а також присутні і некарбонатні частини, в основному оксиди металів.

Крейда містить значно менше домішок і значно м'якша за вапняк. Розглядаючи порошок крейди під мікроскопом, можна легко спостерігати окремі дрібнесенькі черепашки. Крейда зустрічається в багатьох місцях і утворює великі поклади. Використовують у сільському господарстві, паперовій і гумовій промисловості, у будівництві тощо. Мелена крейда широко застосовується в якості дешевого матеріалу (пігменту) для побілки, фарбування парканів, стін, бордюрів, для захисту стовбурів дерев від сонячних опіків.

2.2. Методи визначення фізико-механічних характеристик

Вибір методів та методик досліджень властивостей епоксикомпозитних матеріалів здійснено враховуючи потенційні умови експлуатації виробу. Дослідження фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів проведено з

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

використанням стандартних методик визначення вмісту гель-фракції, адгезійної міцності та твердості.

Вміст гель-фракції визначали методом видалення неструктурованої частини полімерного матеріалу за допомогою розчинника в екстракторі Сокслета (рисунок 2.2), який працював в автоматичному режимі. Тривалість витримки зразків в екстракторі становила 8 год.



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд екстрактора Сокслета

Екстракцію епоксикомпозитних зразків у формі тонких пластин товщиною до $0,5 \pm 0,1$ мм та розміром $30 \times 40 \pm 1$ мм проводили в толуолі з наступним сушінням за температури $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до постійної маси. Масу епоксикомпозитних зразків до і після екстракції визначали на аналітичних лабораторних вагах з точністю вимірювання 0,5 мг.

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Вміст гелі-фракції (структурована частина) в епоксикомпозитному зразку визначали за формулою:

$$G = 100\% - \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де M_1, M_2 – маса зразка до і після екстракції відповідно, г.

Межу адгезійної міцності склеєних торцевих зразків за нормального відриву визначали за методикою ISO 15509:2019 «Клеї. Визначення міцності з'єднання інженерних пластикових з'єднань». Даний метод дозволяє визначити міцність на розтяг пластмасового з'єднання. Випробування проводили на розривній машині моделі УММ-5 із швидкістю руху нижньої траверси 2 мм/хв.

Межу адгезійної міцності за нормального відриву визначали за формулою:

$$\sigma_a = \frac{P}{S}, \quad (2.2)$$

де P – максимальне навантаження, за якого відбулось руйнування клейового з'єднання, Н;

S – площа клейового з'єднання, см².

Твердість епоксикомпозитних зразків визначали методом Брінелля. Відповідно до стардантної методики ISO 6506 індентор у вигляді сталеві кульки діаметром 5 мм втискували в поверхню епоксикомпозитного зразка з навантаженням 1875 Н протягом 10 с. Твердість епоксикомпозитних зразків визначали за формулою:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (2.3)$$

де P – навантаження, прикладене до індентора, Н;

D – діаметр кульки, мм;

d – діаметр відбитку, мм.

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

3.1. Дослідження фізико-механічних властивостей епоксикомпозитів

Введення до складу епоксиполімерної основи дисперсних наповнювачів приводить до формування композиту з якісно новими властивостями. Для отримання матеріалу з зносостійкісними характеристиками вибір наповнювачів проводили, враховуючи їх фізико-механічні та експлуатаційні характеристики. Оскільки матеріал повинен мати високу абразивну зносостійкість як наповнювачі використано цемент, будівельний гіпс та крейду.

Найвищі значення адгезійної міцності мають системи наповнені крейдою (рисунок 3.1). Вони відповідають високому ступеню структурованості та низьким внутрішнім напруженням. Наповнювачі обмежують рухливість макромолекул полімерної матриці, чим підвищують міцнісні характеристики. Максимальне значення даної характеристики 15,3 МПа зафіксовано для епоксикомпозиту із вмістом 60 мас.ч. крейди. Це можна пояснити кращою взаємодією частинок із епоксидною матрицею, що пов'язано з високою активністю наповнювача утворювати нові хімічні зв'язки, що зумовлює систему чинити опір зовнішньому навантаженню.

Для систем, наповнених цементом відбувається зростання в 1,7 рази адгезійної міцності з підвищенням вмісту наповнювача до 20 мас.ч. Спочатку спостерігається стрімке зростання даної характеристики, далі стабілізація в діапазоні 20...60 мас.ч., а далі ріст характеристики.

При збільшенні вмісту гіпсу до 20 мас. ч. в епоксикомпозитах зафіксовано зниження адгезійної міцності на 8%, що пов'язано з утворенням меншої кількості хімічних та фізичних вузлів та наявністю різноманітних дефектів, які є джерелом виникнення механічних напружень і відповідно визначають початок руйнування. Серед таких дефектів часто зустрічаються

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

тріщини, які мають тенденцію розростатися під дією навантаження. Вони призводять до виникнення напружень розтягу критичної величини, при досягненні яких на межі розділу зароджуються поперечні тріщини, які розповсюджуються за механізмом нормального відриву. Наступне підвищення адгезійної міцності пов'язане з збільшення питомої поверхні та утворенням додаткових хімічних зв'язків.

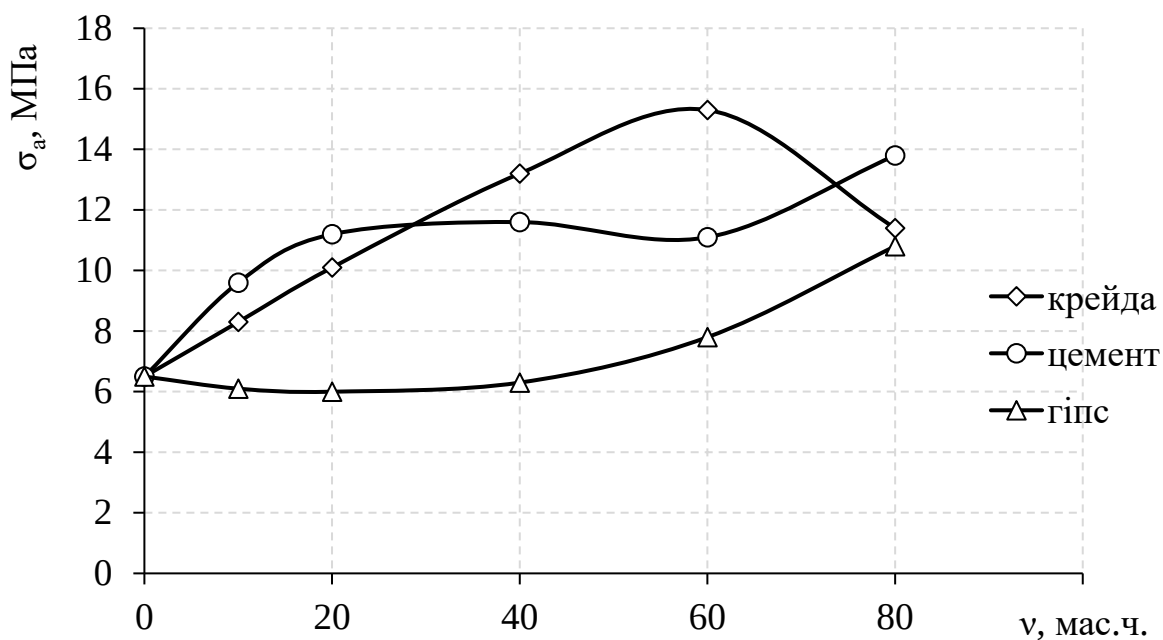


Рисунок 3.1 – Залежність адгезійної міцності епоксикомпозитів від вмісту мінерального наповнювача

Введення мінеральних наповнювачів вище 10 мас. ч призводить до підвищення міцнісних характеристик, оскільки зростає степінь структурування системи. Полімерне в'язуче взаємодіє з частинками наповнювачів, утворює додаткові хімічні вузли, що дозволяє підвищити міцність системи в цілому. Подальше підвищення вмісту наповнювачів є недоцільне, оскільки система є не технологічною через недостатню кількість полімерного в'язучого. В результаті в'язкість знижується і частинки наповнювачів не повністю змочуються, що зумовлює зменшення адгезійної міцності полімеркомпозитів наповнених вище 100 мас. ч.

Експериментально встановлено, що твердість епоксикомпозитів підвищується із збільшенням ступеня наповнення (рисунок 3.2). Найвищі значення твердості зафіксовано 263 МПа для епоксикомпозитів наповнених цементом. Це можна пояснити утворенням додаткових хімічних зв'язків між активними групами на поверхні наповнювача та функціональними групами епоксидної компоненти.

Для зразків наповнених крейдою спостерігається більш різке зростання твердості на менших ступенях наповнення, ніж для зразків наповнених цементом, яке пов'язане із рівномірним розподілом частинок наповнювача і низькими внутрішніми напруженнями системи.

Введення гіпсу підвищує твердість до 210 МПа, що відповідає ступеню наповнення 40 мас.ч., після чого твердість епоксикомпозитів знижується через підвищення вмісту наповнювача, який погано диспергується в системі.

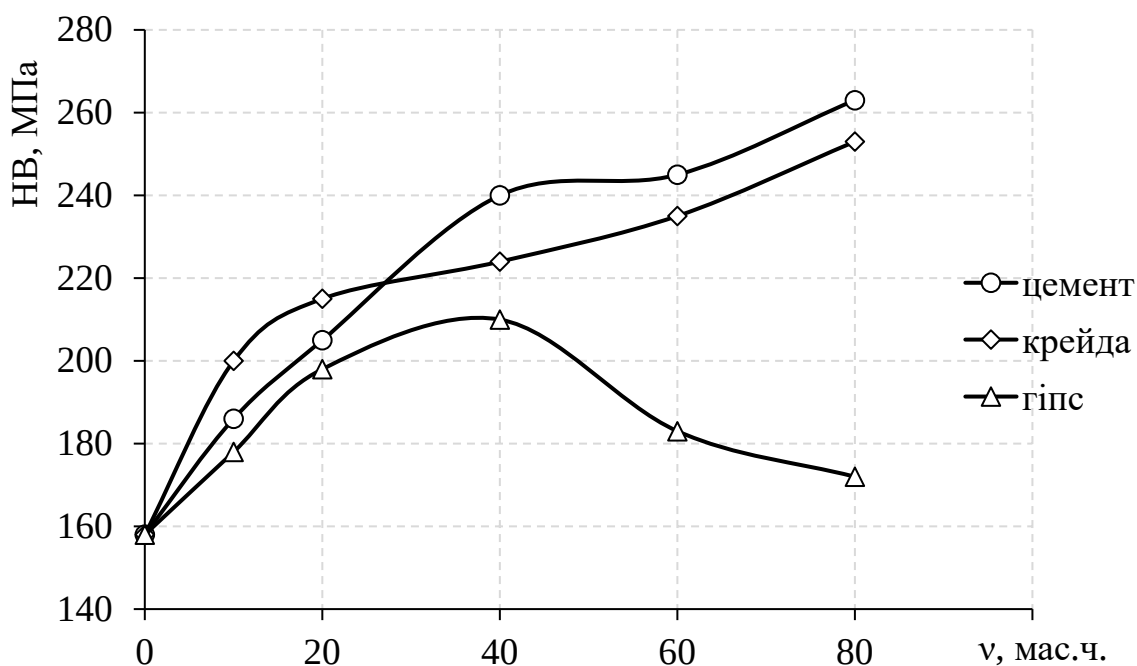


Рисунок 3.2 – Залежність твердості епоксикомпозитів від вмісту мінерального наповнювача

Найвищу ступінь структурування (80,98 %) мають композити наповнені цементом (рисунок 3.3). Це свідчить про зростання ступеня зшивання матриці у зовнішніх поверхневих шарах навколо наповнювача, що підвищує

експлуатаційні характеристики даних епоксикомпозитних систем. Ступінь зшивання визначається кількістю фізичних та хімічних зв'язків між макромолекулами полімеру і поверхнею дисперсних частинок. Подібні значення ступеня структурування мають епоксикомпозити з вмістом крейди, оскільки утворення хімічних зв'язків між компонентами системи відбувається досить інтенсивно.

Найнижче значення вмісту гель-фракції мають епоксикомпозити з вмістом гіпсу (60,75 %) після термічної обробки у печі за 50 °С, яке проводилось після тверднення при нормальних умовах протягом 24 год. До вмісту наповнювача в кількості 20 мас.ч. ступінь структурування епоксикомпозитів знижувався повільно, однак в діапазоні 20...80 мас.ч. відбувається значне зниження вмісту гель-фракції, що пов'язано з поганою взаємодією епоксидного в'язучого з поверхнею частинок наповнювача.

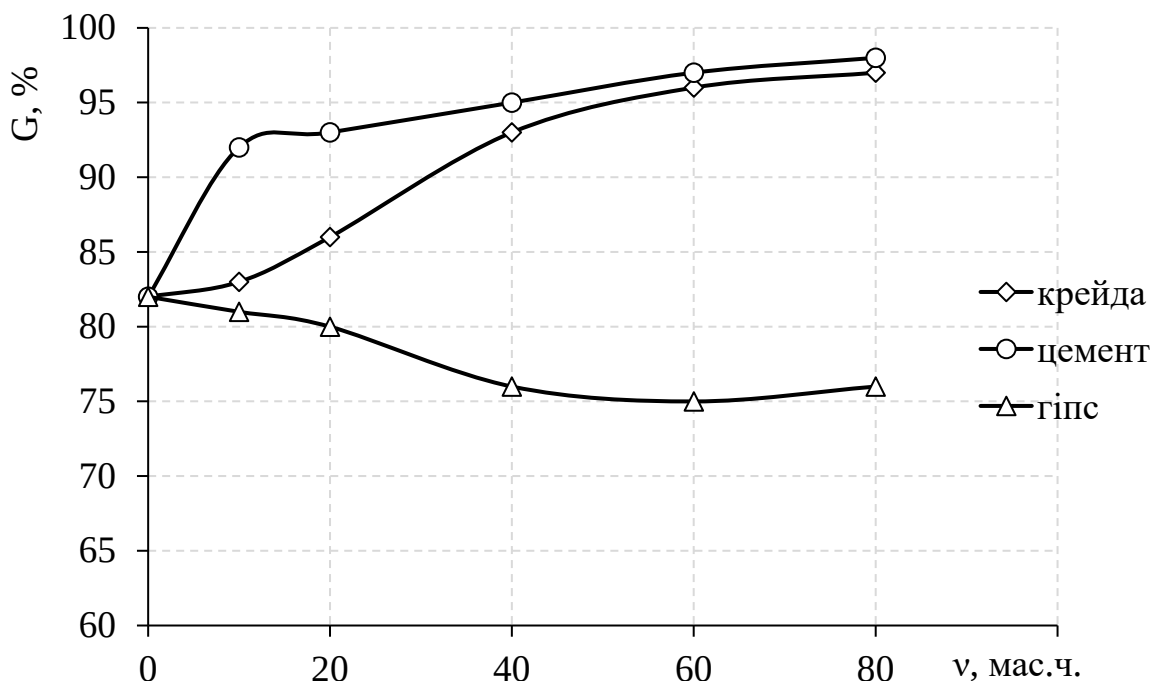


Рисунок 3.3 – Залежність вмісту гель-фракції (ступеня структурування) епоксикомпозитів від вмісту мінерального наповнювача

Зниження ступеня структурування пов'язане з погіршенням

змочуваності частинок наповнювачів епоксиполімером, що призводить до послаблення взаємодії компонентів системи між собою.

3.2. Аналіз стану зразків після впливу фізико-механічних факторів

Епоксикомпозитам наповнених цементом характерний переважаючий адгезійний характер руйнування поверхні зразків при дослідженні на розрив (рисунок 3.4, а), що можна пояснити низькими внутрішніми напруженнями системи. Це вказує на високу взаємодію епоксиполімерної матриці з частинками крейди, яка рівномірно розподілена в об'ємі полімерної матриці.

Для зразків наповнених крейдою характерний адгезійно-когезійний характер руйнування (рисунок 3.4, б), що вказує на зниження адгезійної міцності між компонентами системи. Переважаючий когезійний характер руйнування мають епоксикомпозити наповнені гіпсом, що можна пояснити високими значеннями ступеня структурування та адгезійної міцності.



а

б

в

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд поверхні після досліджень на адгезійну міцність епоксикомпозитів, що містять:

а – цемент; б – крейду; в – гіпс

Зменшення кількості тріщин в епоксикомпозитах зі збільшенням вмісту наповнювача вказує на підвищення ступеня структурування системи, що

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

пов'язано із вищою кількістю хімічних зв'язків і зменшенням вмісту неструктурованої частини (рисунок 3.5).

а

б



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд епоксикомпозитних зразків після екстрагування з вмістом цементу в кількості: а – 60 мас.ч., б – 80 мас.ч.

За вмісту крейди в кількості 60 мас.ч. на поверхні епоксикомпозитних зразків присутні тріщини, що вказує на наявність невеликої кількості неструктурованої частини (рисунок 3.6, а). У випадку збільшення наповнювача до 80 мас.ч. тріщини відсутні, оскільки ступінь структурування системи є високий (рисунок 3.6, б).



а



б

Рисунок 3.6 – Загальний вигляд епоксикомпозитних зразків після екстрагування з вмістом крейди в кількості: а – 60 мас.ч., б – 80 мас.ч.

Епоксикомпозитні зразки з вмістом гіпсу в кількості 60 мас.ч. та 80 мас.ч. мають значну кількість тріщин (рисунок 3.7), що вказує на низьку здатність системи утворювати хімічні зв'язки між компонентами, в результаті чого значна неструктурована частина видаляється разом із розчинником.



а



б

Рисунок 3.7 – Загальний вигляд епоксикомпозитних зразків після екстрагування з вмістом крейди в кількості: а – 60 мас.ч., б – 80 мас.ч.

ВИСНОВКИ

Максимальне значення адгезійної міцності (15,3 МПа) мають епоксикомпозитні матеріали із вмістом 60 мас.ч. крейди. Це можна пояснити кращою взаємодією частинок із епоксидною матрицею, що пов'язано з високою активністю наповнювача утворювати нові хімічні зв'язки.

Для систем, наповнених цементом відбувається зростання в 1,7 рази адгезійної міцності в діапазоні 20...60 мас.ч. з наступним ростом характеристики через збільшення питомої поверхні та утворення додаткових хімічних зв'язків.

Для зразків з вмістом крейди 40...80 мас.ч. зафіксовано різке зростання твердості, яке пов'язане із рівномірним розподілом частинок наповнювача і утворенням великої кількості фізичних та хімічних зв'язків.

Найвищу ступінь структурування (80,98 %) мають композити наповнені цементом та крейдою в діапазоні 60...80 мас.ч., що зумовлено зростанням ступеня зшивання матриці у зовнішніх поверхневих шарах навколо наповнювача, що підвищує фізико-механічні характеристики даних епоксикомпозитних систем.

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zou S., Dang L., Li P., Zhu J., Lan S., Zhu D. Organic-Inorganic Modification of Magnesium Borate Rod by Layered Double Hydroxide and 3-Aminopropyltriethoxysilane and Its Effect on the Properties of Epoxy Resin // Polymers. – 2022. – Vol. 14. – Article 3661.
2. Qu C., Li X., Yang Z., Zhang X., Wang T., Wang Q., Chen S. Damping, thermal, and mechanical performances of a novel semi-interpenetrating polymer networks based on polyimide/epoxy // Journal of Applied Polymer Science. – 2019. – Vol. 136. – Article 48032.
3. Fischer F., Beier U., Wolff-Fabris F., Altstädt V. Toughened high performance epoxy resin system for aerospace applications // Science and Engineering of Composite Materials. – 2011. – Vol. 18. – P. 209–216.
4. Wang Z., Zhang X., Weng L., Liu L. Low dielectric constant and high toughness epoxy resin based on hyperbranched polyester grafted by flexible chain modified // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2019. – Vol. 30. – P. 5936–5946.
5. Gebhard L., Esposito L., Menna C., Mata-Falcón J. Inter-laboratory study on the influence of 3D concrete printing set-ups on the bond behaviour of various reinforcements // Cement and Concrete Composites. – 2022. – Vol. 133. – Article 104660.
6. Bazli M., Heitzmann M., Hernandez B. V. Hybrid fibre reinforced polymer and seawater sea sand concrete structures: A systematic review on short-term and long-term structural performance // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 301. – Article 124335.
7. Ying W. B., Yang H. S., Moon D. S., Lee M. W., Ko N. Y., Kwak N. H., Lee B., Zhu J., Zhang R. Epoxy resins toughened with in situ azide–alkyne polymerized polysulfones // Journal of Applied Polymer Science. – 2018. – Vol. 135. – Article 45790.

8. Karthikeyan L., Mathew D., Robert T. M. Poly(ether ether ketone)-bischromenes: Synthesis, characterization, and influence on thermal, mechanical, and thermo mechanical properties of epoxy resin // Polymer Advanced Technologies. – 2019. – Vol. 30. – P. 1061–1071.

9. Joy J., Winkler K., Joseph K., Anas S., Thomas S. Epoxy/methyl methacrylate acrylonitrile butadiene styrene (MABS) copolymer blends: Reaction-induced viscoelastic phase separation, morphology development and mechanical properties // New Journal of Chemistry. – 2019. – Vol. 43. – P. 9216–9225.

10. Wang W., Wang Y., Liu Z., Han Y., Wang C. Study on application performance of oxidized polyethylene wax in powder coatings // Progress in Organic Coatings. – 2019. – Vol. 136. – Article 105294.

11. El-Fattah M. A., El Saeed A. M., El-Ghazawy R. A. Chemical interaction of different sized fumed silica with epoxy via ultrasonication for improved coating // Progress in Organic Coatings. – 2019. – Vol. 129. – P. 1–9.

12. Piazza D., Lorandi N. P., Pasqual C. I., Scienza L. C., Zattera A. J. Influence of a microcomposite and a nanocomposite on the properties of an epoxy-based powder coating // Materials Science and Engineering A. – 2011. – Vol. 528. – P. 6769–6775.

13. Merfeld G., Molaison C., Koeniger R., Acar A. E., Mordhorst S., Suriano J., Irwin P., Warner R. S., Gray K., Smith M., et al. Acid/epoxy reaction catalyst screening for low temperature (120 °C) powder coatings // Progress in Organic Coatings. – 2005. – Vol. 52. – P. 98–109.

14. Hesabi M., Salimi A., Beheshty M. H. Effect of tertiary amine accelerators with different substituents on curing kinetics and reactivity of epoxy/dicyandiamide system // Polymer Testing. – 2017. – Vol. 59. – P. 344–354.

15. Dong W., Liu Y., Zhang X., Gao J., Huang F. Preparation of High Barrier and Exfoliated-Type Nylon-6/Ultrafine Full-Vulcanized Powdered Rubber/Clay Nanocomposites // Macromolecules. – 2005. – Vol. 38. – P. 4551–4553.

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

16. Zhang R., Wang H., Wang X., Guan J., Li M., Chen Y. Rubber-Composite-Nanoparticle-Modified Epoxy Powder Coatings with Low Curing Temperature and High Toughness // Polymers. – 2023. – Vol. 15, Issue 1. – Article 195.

17. Hsieh T. H., Kinloch A. J., Masania K., Taylor A. C., Sprenger S. The mechanisms and mechanics of the toughening of epoxy polymers modified with silica nanoparticles // Polymer. – 2010. – Vol. 51. – P. 6284–6294.

18. Tian N., Ning R., Kong J. Self-toughening of epoxy resin through controlling topology of cross-linked networks // Polymer. – 2016. – Vol. 99. – P. 376–385.

19. Que X., Yan Y., Qiu Z., Wang Y. Synthesis and characterization of trifluoromethyl-containing polyimide-modified epoxy resins // Journal of Materials Science. – 2016. – Vol. 51. – P. 10833–10848.

20. Shiravand F., Ascione L., Persico P., Carfagna C., Brocks T., Cioffi M. O. H., Puglisi C., Samperi F., Ambrogio V. A novel hybrid linear–hyperbranched poly(butylene adipate) copolymer as an epoxy resin modifier with toughening effect // Polymer International. – 2016. – Vol. 65. – P. 308–319.

21. Yun C., Chu F., Cui B., Wang X., Liu G., Sun J. Enhanced flexibility of conductive layer with inkjet-imprinted microstructure surface // Materials Letters. – 2020. – Vol. 266. – Article 127461.

22. Wang J., Liu R., Jian X. Introduction to Epoxy/Thermoplastic Blends / J. Wang, R. Liu, X. Jian // Handbook of Epoxy Blends / Eds. J. Parameswaranpillai, N. Hameed, J. Pionteck, E. M. Woo. – Cham: Springer International Publishing, 2017. – P. 429–458.

23. Inamdar A., Cherukattu J., Anand A., Kandasubramanian B. Thermoplastic-Toughened High-Temperature Cyanate Esters and Their Application in Advanced Composites // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2018. – Vol. 57. – P. 4479–4504.

					БР 5426.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

24. Lee S.-E., Jeong E., Lee M. Y., Lee M.-K., Lee Y.-S. Improvement of the mechanical and thermal properties of polyethersulfone-modified epoxy composites // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2016. – Vol. 33. – P. 73–79.

25. Farooq U., Teuwen J., Dransfeld C. Toughening of Epoxy Systems with Interpenetrating Polymer Network (IPN): A Review // Polymers. – 2020. – Vol. 12, Issue 9. – Article 1905.

26. Liu J., Fan W., Lu G., Zhou D., Wang Z., Yan J. Semi-Interpenetrating Polymer Networks Based on Cyanate Ester and Highly Soluble Thermoplastic Polyimide // Polymers. – 2019. – Vol. 11. – Article 862.

27. Ghamarpour R., Jamshidi M., Mohammadpour M. Achieving outstanding mechanical/bonding performances by epoxy nanocomposite as concrete–steel rebar adhesive using silane modification of nano SiO₂ // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10. – Article 14567.

28. Gonçalves F. A., Santos M., Cernadas T., Alves P., Ferreira P. Influence of fillers on epoxy resins properties: A review // Journal of Materials Science. – 2022. – Vol. 57, No. 32. – P. 15183–15212.

29. Властивості цементу [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.britannica.com/technology/cement-building-material?utm_source=copilot.com

30. Властивості арамідних волокон [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>