

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування факультету)

Композиційні матеріали, хімії та технологій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему **ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРБЕТОНІВ**

Виконав: студент 2 курсу, групи БАД-214м

Спеціальності 132 Матеріалознавство
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма
«Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

Олександр КОНОНЕНКО

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник к.т.н., доц. Іван АКІМОВ


(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент Олександр НЕСТЕРОВ

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Будівництва, архітектури та дизайну
 Кафедра Композиційних матеріалів, хімії та технологій
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 132 Матеріалознавство
 Освітня програма (спеціалізація) Композиційні та порошкові матеріали, покриття


ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри КМХТ
 Іван АКИМОВ

«10» жовтня 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

КОНОНЕНКА Олександра Сергійовича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження властивостей полімербетонів

Керівник проєкту (роботи) к.т.н., доц. АКИМОВ Іван Васильович

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

Затверджені наказом закладу вищої освіти від «29» вересня 2025 року №446

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 14.12.2025р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) технічне завдання

Землючі марше полімербетонів. Проблеми вироблення їх механічних та структурних властивостей. Підвищення міцності на стиск полімербет.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Літературний огляд. 2. Методика та матеріали досліджень. 3. Дослідження властивостей полімербетонів

5. Перелік графічного матеріалу (зточним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Презентація

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	АКИМОВ І.В., к.т.н., доц.	13.10.25	Вик.
2	АКИМОВ І.В., к.т.н., доц.	13.10.25	Вик.
3	АКИМОВ І.В., к.т.н., доц.	13.10.25	Вик.
Нормоконтроль	ПЕТРУША Ю.Ю., к.б.н., доц.	13.10	Вик.

7. Дата видачі завдання «_» _____ 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Літературний огляд	30.10.2025	Вик.
2	Підбір матеріалів та методик дослідження	05.11.2025	Вик.
3	Проведення досліджень	17.11.2025	Вик.
4	Оформлення пояснювальної записки	19.11.2025	Вик.
5	Оформлення презентації роботи	10.12.2025	Вик.

Студент



Олександр КОНОНЕНКО

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)



Іван АКИМОВ

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту магістра «Дослідження властивостей полімербетонів» складається з 45 сторінок, 8 рисунків, 5 таблиць, 31 джерела.

Предметом дослідження є механізм впливу складу полімербетонів на їх механічні властивості.

Мета роботи – прогнозування механічних властивостей полімербетонів, на основі науково-обґрунтованого методу підбору складів полімербетонних сумішей, що враховує роль наповнювачів та полімерних сполучників у формуванні структури та прогнозуванні властивостей полімербетонів.

Пояснювальна записка містить усі необхідні етапи дослідження структури та властивостей полімербетонів для підвищення їх механічних властивостей.

В результаті роботи запропоновано методику дослідження механічних властивостей полімербетонів в залежності від складу наповнювачів та типу полімерної матриці.

ПОЛІМЕРБЕТОНИ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, МІЦНІСТЬ,
СТРУКТУРА, ПОРИСТІСТЬ.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis «Research on the properties of polymer concretes» consists of 45 pages, 8 figures, 5 tables, 31 sources.

The subject of the study is the mechanism of influence of the composition of polymer concretes on their mechanical properties.

The purpose of the work is to predict the mechanical properties of polymer concretes, based on a scientifically sound method for selecting the compositions of polymer concrete mixtures, which takes into account the role of fillers and polymer binders in the formation of the structure and predicting the properties of polymer concretes.

The explanatory note contains all the necessary stages of studying the structure and properties of polymer concretes to improve their mechanical properties.

As a result of the work, a methodology for studying the mechanical properties of polymer concretes depending on the composition of fillers and the type of polymer matrix was proposed.

POLYMER CONCRETES, MECHANICAL PROPERTIES, STRENGTH, STRUCTURE, POROSITY.

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1 Дослідження полімербетонів	9
1.1 Технологія виготовлення полімербетонів	10
1.2 Компоненти та властивості полімербетонів	12
1.3 Галузі використання полімербетонів	17
1.4 Цілі та завдання дослідження	20
Розділ 2 Матеріали та методи дослідження	22
2.1 Матеріали для дослідження	22
2.2 Методи дослідження	23
Розділ 3 Дослідження властивостей полімербетонів	26
3.1 Адгезійна взаємодія компонентів	26
3.2 Дослідження впливу компонентів на властивості полімербетонів	29
Висновки	40
Перелік джерел посилань	42

ВСТУП

Актуальність теми. Полімербетони знайшли широке поширення в будівельній індустрії та інших галузях промисловості. В сучасному науковому світі накопичено велику кількість даних з вивчення їх структури та властивостей. Тим не менш, спостерігається недостатня вивченість універсальних закономірностей, за допомогою яких можна проводити оцінку оптимальних рецептур і властивостей нових спроектованих композитів. Тому встановлення таких закономірностей є досить актуальним завданням.

Полімербетони являють собою різні будівельні полімерні композитні матеріали. У сучасному представленні полімерні композити це досить широко розгалужена система, що формується в результаті фізико-хімічної взаємодії між її структурними компонентами.

Головною ознакою композитів є їх здатність утворювати специфічні структури, відповідальні за набуття композитом не адитивних, а іноді унікальних властивостей. До таких структур можуть бути віднесені, перш за все, фрактальні, кластерні та решітчасті структури, аналізу яких у сучасному будівельному матеріалознавстві надається все більше уваги.

Властивості полімербетонів лише на рівні мікроструктури визначаються явищами, які відбуваються у контакті між рідкою і твердою фазами, тобто залежать від кількості наповнювача, його дисперсності, фізико-хімічної активності.

Для композитів немає універсального оптимального вмісту наповнювача. Залежно від умов застосування полімербетонів ця величина може набувати різних значень. Зазвичай оптимальним вважається такий вміст наповнювача, який забезпечує найвищі експлуатаційні показники полімербетонів. У цьому афективним є використання наповнювачів з переривчастою гранулометриєю. Вивчення впливу наповнювачів на механічні властивості та їх ролі в структуроутворенні полімербетонів є актуальною задачею.

Мета роботи – прогнозування механічних властивостей полімербетонів, на основі науково-обґрунтованого методу підбору складів полімербетонних сумішей, що враховує роль наповнювачів та полімерних сполучників у формуванні структури та прогнозуванні властивостей полімербетонів.

Реалізація поставленої мети вимагала вирішення наступних **завдань**:

- провести аналіз полімербетонів;
- дослідити вплив наповнювачів та полімерного сполучного на утворення контактного шару між ними;
- розробити спосіб визначення міцності наповнювачів в об'ємі полімербетону;
- встановити закономірності формування мікро- та макроструктури полімербетонів та визначити основні функціональні залежності, що забезпечують прогнозування механічних властивостей полімербетонів.

Наукова новизна роботи. Встановлено, що в залежності від вмісту наповнювачів у полімербетонах розрізняються три типи макроструктури полімербетонів: «плаваючий», «перехідний» та «контактний». Виявлено структурні фактори, що впливають на властивості полімербетонів при різних типах макроструктури. Знайдені залежності властивостей міцності полімербетонних сумішей дозволяють проводити оптимізацію і розрахунок складів полімербетонів із заданим комплексом властивостей.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІМЕРБЕТОНІВ

Застосування бетонів, які виготовляються лише з цементу, щебню та піску, на сьогоднішній день, вже не є економічно доцільним. Оскільки сьогоднішня вимогає прискорення технології виготовлення виробів з бетонів для відновлення будинків, а також підвищення властивостей цих матеріалів. Саме тому використання полімерних компонентів, що визначають основні властивості виробів з бетону такі як, наприклад, хімічна стійкість та вібраційна стійкість, дозволяють, на сьогоднішній день, використовувати саме полімербетон для виготовлення різноманітних конструкції з полімербетону там, де традиційний бетон буде зазнавати руйнування [1-5].

Полімербетон це штучний композиційний будівельний матеріал, що утворюється в результаті твердіння ретельно підібраної, приготовленої, укладеної в конструкцію та ущільненої суміші, основними компонентами якої є наповнювачі та полімерний сполучник. В залежності від компонентів, що входять до складу полімербетонів змінюється їх структура, а відповідно і властивості [1-6]. В залежності від виду смол, які використовуються для виготовлення полімербетонів їх можна класифікувати наступним чином (рис. 1.1).

Також властивості полімербетонів залежать від технології їх виготовлення. Тому на першому етапі роботи є важливим дослідження спочатку компонентів що входять до складу цих матеріалів а потім технології їх виготовлення [1-4].



Рисунок 1.1 – Класифікація полімербетонів [7]

1.1 Технологія виготовлення полімербетонів

Полімербетони зазвичай виготовляється наступним чином: із полімерною основою (поліефірної смолою) змішуються наповнювачі. Під час виготовлення полімербетонів можуть додаватися грубодисперсні наповнювачі. Це може бути щебінь розміром до 50 мм і пісок з розміром зерен до 5 мм. Також з метою зниження витрат сполучних компонентів і вартості виробів, а також для регулювання їх властивостей в полімербетон можуть вводитися дрібнодисперсні наповнювачі, які мають розмір частинок менше 0,15 мм. В якості таких наповнювачів можуть використовуватися такі компоненти як вапняк, тальк, подрібнені відходи виробництва композиційних матеріалів, наприклад, склопластиків, а також баритове, кварцове борошно, подрібнений в борошно граніт, мармур та ін. До складу полімербетону можуть входити також пороутворювачі, ПАР, антипірени, барвники і т.п. [5].

При високому ступеню наповнення (70...80%) з полімербетонів можна виготовляти недорогі вироби, які матимуть високі фізико-механічні властивості. В якості наповнювача найчастіше використовують пісок, який надає виробам довговічності, стійкості до навантажень. Але в такому наповнювачі є і недолік - він сильно підвищує масу виробів. При виборі технології виробництва таких виробів з полімербетонів необхідно вибирати смолу зі зниженою в'язкістю. Параметри виробництва виробів також повинні враховувати необхідність рівномірного розподілу наповнювача за об'ємом виробу, а також щоб наповнювач не осідав в нижню частину виробу через різницю їх щільності. Також необхідно враховувати що обов'язково повинна проводитися дегазація суміші для того щоб запобігти утворенню порожнин всередині виробів, які можуть привести до зниження показників їх міцності [5].

При виробництві виробів із дрібнодисперсними наповнювачами зазвичай використовують литтєвий метод отримання виробів. Такі вироби можуть імітувати будь-який натуральний камінь, дерево або метал, дозволяючи створювати унікальний дизайн готового виробу що буде мати високий рівень деталізації [4, 6-8].

Також такі вироби вирізняються підвищеною міцністю, стійкістю до погодних умов (добре переносять перепади температур, опади, вологу та ультрафіолет, не покриваючись тріщинами чи не вигораючи на сонці), легшою вагою для транспортування та встановлення, а також доступнішою ціною порівняно з гранітом або мармуром [8-9].

Розробляючи технологічний процес виготовлення полімербетонів необхідно врахувати декілька етапів. На першому етапі необхідні компоненти необхідно завантажити в ємність для змішування в певному порядку: щебінь, пісок, наповнювач. З в'язким компонентом необхідно працювати окремо: розм'якшити його до певної консистенції, нагріваючи або застосовуючи розчинник. До смоли додати стабілізатор, пластифікатор і інші речовини за необхідності. Потім необхідно все ретельно перемішати окремо від наповнювачів [4, 9, 10].

На наступному етапі необхідно ретельно перемішати в'язучий компонент і наповнювачі протягом 2 хвилин. Лише після цього вводили до складу затверджувач. Необхідно зачекати не менше 3 хвилини і полімербетон можна використовувати. Отримана суміш необхідно відразу залити в опалубку або форму, так як схоплюється суміш досить швидко, то потрібно готувати компоненти на одне заливання [4, 9, 10].

1.2 Компоненти та властивості полімербетонів

Властивості композиційних матеріалів, до яких відносяться полімербетони, залежать від хімічного, фазового та речовинного складу. Під хімічним складом ми маємо на увазі процентний вміст в полімербетонах хімічних елементів або оксидів, або інших сполук.

За фазовим складом можна визначити вміст в матеріалах фаз, однорідних за хімічним складом і фізичними властивостями але відокремлених одна від одної поверхнями розподілу. Якщо розглянути портландцемент за фазовим складом то він буде складатися із беліту (двокальцієвого силікату), аліту (трикальцієвого силікату), трикальцієвого алюмінату та алюмоферитної фази.

Склад матеріалів можна визначити за допомогою різноманітних методів аналізу, які базуються на вивченні хімічних реакцій, фізико-хімічних або фізичних процесів. Визначення співвідношення між складом матеріалу та його властивостями і є предметом фізико-хімічного аналізу [2].

Властивості полімербетонів лише на рівні мікроструктури визначаються явищами, які відбуваються у контакті між рідкою і твердою фазами, тобто залежать від кількості наповнювача, його дисперсності, фізико-хімічної активності [11].

Для композитів немає універсального оптимального вмісту наповнювача. Залежно від умов застосування полімербетонів ця величина може набувати різних значень. Зазвичай оптимальним вважається такий вміст наповнювача, який

забезпечує найвищі експлуатаційні показники полімербетонів. У цьому афективним є використання наповнювачів з переривчастою гранулометриєю. Вивчення впливу наповнювачів на механічні властивості та їх ролі в структуроутворенні полімербетонів є актуальною задачею.

Між структурами різних рівнів та підрівнів існує органічний зв'язок - формування структур вищого масштабного рівня відбувається під впливом структур нижнього рівня. У той самий час, структури вищого рівня можуть визначати умови формування підструктур за принципом зворотний зв'язок.

В даний час, ґрунтуючись на результатах численних практичних та теоретичних досліджень [12-14], переглядаються уявлення про оптимальну структуру будівельних композитів як про матричне середовище з рівномірно розподіленими в ньому дисперсними частинками. Встановлено практичну недосяжність такої «ідеальної» структурної ситуації. Навпаки, в ході технологічних процесів приготування та затвердіння будівельних композитів структура їх схильна до об'єднання у різного роду неоднорідності, що по-різному впливають на властивості композитів.

Утворення граничних перехідних шарів полімерної матриці в полімербетонах безпосередньо впливає на їх експлуатаційні властивості. Тому аналіз їх формування потребує докладнішого розгляду.

У роботах [12-15] наведено аналіз існуючих методів підбору гранулометричного складу заповнювачів, який дозволяє зробити наступні висновки: підбір складу заповнювачів трактується різними авторами не однаково, але сутність його в більшості випадків зводиться до отримання сумішей заповнювачів, що забезпечують оптимальну структуру і властивості бетонної суміші при найменшій витраті зв'язуючого.

Також значною мірою на властивості полімербетонів пливає тип полімеру, який використовується в якості зв'язуючого. Для створення виробів і матеріалів, що призначені для експлуатації в умовах пливу навколишнього середовища, а саме змінення температури та вологи, на сьогоднішній день, найбільше використання знайшли полімербетони на основі термореактивних зв'язуючих – поліефірних,

фуранових, епоксидних та карбамідних смол. В якості наповнювачів також можуть використовуватися різноманітні матеріали (табл. 1.1) [15].

Рекомендовані методи підбору гранулометричного складу заповнювачів схожі у виконанні і не гарантують отримання найменшої міжзеренної порожнечі, оскільки не враховують властивостей окремих фракцій заповнювачів, їх взаємного розподілу.

Властивості полімербетонів залежать не тільки від якості вихідних компонентів та їх взаємного розташування, а й від характеру взаємодії між ними. Для створення високоякісних полімербетонів необхідна наявність міцного, хімічно та термічно стійкого зв'язку між поверхнею наповнювачів та полімерною матрицею.

Таблиця 1.1 – Основні компоненти, що входять до складу полімербетонів [15]

Полімербетон	Полімерне зв'язуюче	Твердник	Наповнювачі	Заповнювачі
Поліефірний	Поліефірні смоли	Гідропероксид ізопропілбензолу або кумолу; пероксид метилетилкетону	Баритова, кварцева, діабазова, андезитова, графітова мука, кварцовий пісок, каолін, тальк, аеросил, мелений доломіт, мелений кокс (мука)	Гранітний, базальтовий, вапняковий щебінь, гравій річковий, бій кислото-тривкої цегли
Фурановий	Фурфурол-ацетонові смоли	Безводні ароматичні сульфокислоти або сульфохлориди (толуолсульфокислота, бензолсульфокислота, п-толуолсульфокислота), $FeCl_3$, $AlCl_3$, H_2SO_4 (конц.), аміни		
Епоксидний	Епоксидні смоли	Первинні аміни		
Карбамідний	Сечовино-формальдегідні смоли	Органічні (лимонна, оцтова, щавелева) та неорганічні (сульфатна, хлоридна, фосфатна) кислоти, солі ($ZnCl_2$, NH_4Cl)		

Відомо, що значення показників фізико-механічних властивостей полімербетонів на основі термореактивних смол значною мірою залежать від ступеня полімеризації синтетичного зв'язуючого. полімеризація, що пройшла не до кінця може різко погіршити властивості таких композитів. Відомо, що ступінь полімеризації залежить виду і кількості твердника, наявності у складі

прискорювача, видів та розмірів наповнювачів, а також від режимів їх твердіння. Швидкість твердіння полімербетону також значною мірою може залежати від температури та в меншій мірі від вологості навколишнього середовища. Тому розробка технології виготовлення полімербетону обов'язково повинна включати в себе дослідження якісного і кількісного складу композиту, а також досить чіткі інструкції по співвідношенню компонентів, їх вологості та температурах змішування компонентів, умови твердіння та технологію використання готової суміші.

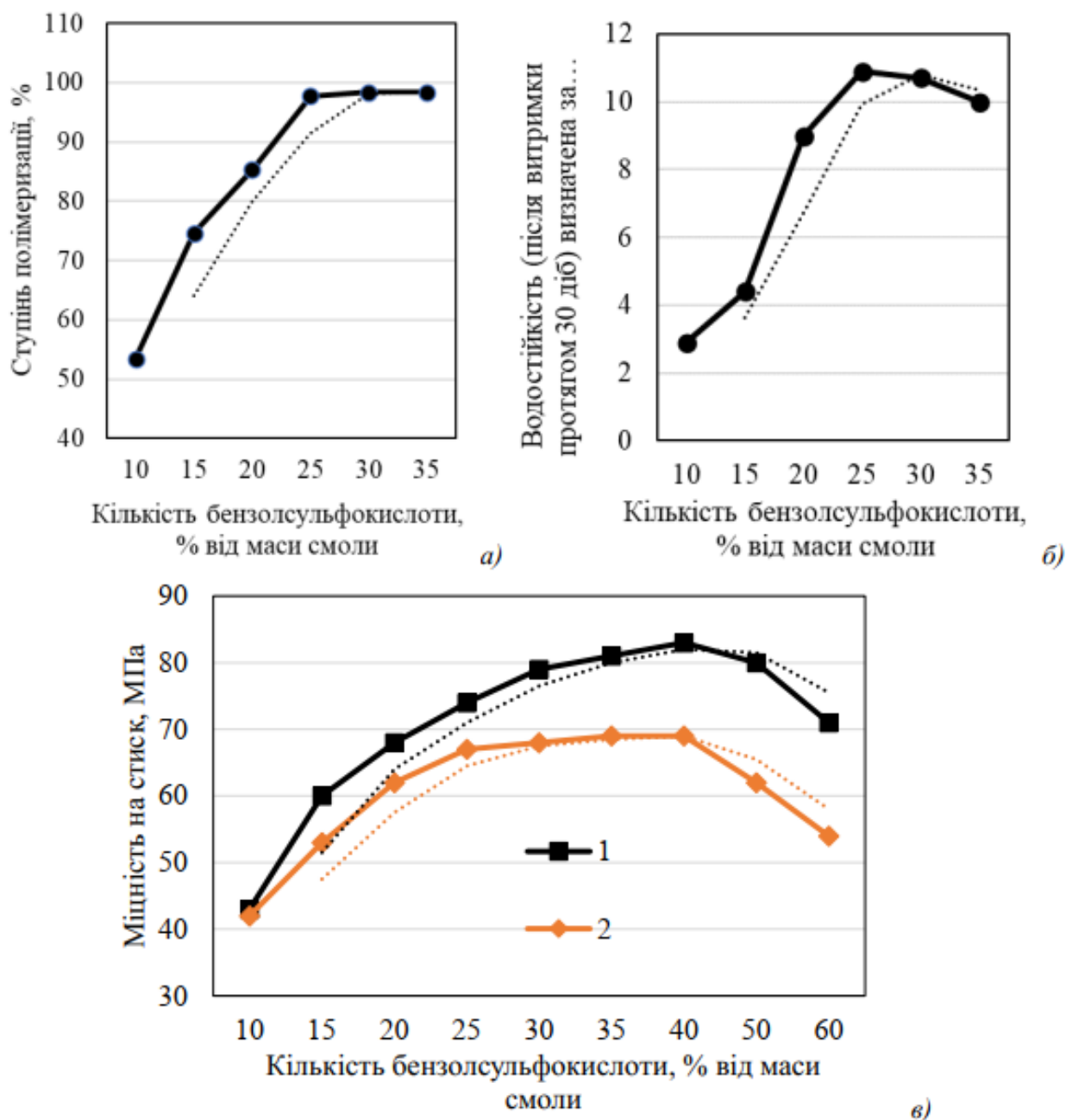
Авторами [15] наведено приклади залежностей властивостей фуранового полімербетону від ступеня полімеризації його синтетичного зв'язуючого (рис. 1.2).

Авторами [16-17] розглянуті сучасні методи прогнозування властивостей та розрахунку складів полімербетонів. Майже всі вони засновані на доборі мінеральної суміші з найменшою порожнечою за методикою, що використовується для цементних бетонів. Останнім часом широкого поширення набули методи прогнозування властивостей та розрахунку складів композитних матеріалів зниженої полімеро місткості та із забезпеченням заданого комплексу властивостей, засновані на отриманих в результаті досліджень моделей різних типів, серед яких велике місце займають багатofакторні полі номінальні моделі.

Методи розрахунку за цими моделями виходять тим ефективніше, чим вдалим обраний тип, клас і вид моделей, чим більшою мірою в них закладені знання про об'єкт моделювання.

Основні властивості полімербетону:

- міцність при стискання (90,0...110,0 МПа);
- міцність на розтягнення при згині (18,0...35,0 МПа);
- коефіцієнт теплопровідності (0,8...2 ккал/м·год·°С);
- середня густина (2300... 2400 кг/м³);
- водопоглинання (1 %).



1 – випробування у стабільних температурно-вологісних умовах,

2 – випробування після витримки у морській воді протягом 28 діб;

Рисунок 1.2 – Залежність властивостей полімербетону, а саме ступеня полімеризації фуранової смоли (а), водостійкості, яка визначалася за міцністю на вигин (б) та міцності на стискання (в) від кількості твердника бензолсульфокислоти

1.3 Галузі використання полімербетонів

Вперше полімербетон почали виробляти і використовувати в США, там же він отримав широке застосування. На сьогодні полімербетони досить популярні у всьому світі і відсоток використання їх у промисловості та побуті зростає з кожним роком. Полімербетони активно використовують в різних галузях промисловості, таких як будівництво, виробництво пам'ятників, меблів, підлог, створенні стільниць і різноманітних декоративних предметів [4].

Застосування полімербетону [4-6]:

- для виготовлення облицювальних панелей;
- для заливання фундаментів під промислове обладнання;
- для виготовлення шумопоглинаючих конструкцій;
- причали та хвилерізи;
- різноманітні ємності для води та інших рідин;
- для виготовлення дренажних конструкцій;
- виготовлення тротуарної плитки, дорожніх бордюрів та заборів;
- виготовлення залізничних шпал;
- виготовлення сходів, балясин, балюстрад;
- для реставрації існуючих залізобетонних конструкцій;
- дренажні каналізації хімічних підприємств;
- виготовлення пам'ятників;
- виготовлення скульптур та малих архітектурних форм.

Полімербетони можуть поділятися на класи матеріалу в залежності від типу наповнювача та його щільності [15]:

- надважкий – $2500-4000 \text{ кг/м}^3$ – до них відносяться поліефірні;
- важкий – $1800-2500 \text{ кг/м}^3$ – до них відносяться карбамідні, поліефірні, епоксидні, фуранові, інденкумаронові, метилметакрилатні;

- легкий – 500-1800 кг/м³ – до них відносяться фуранові, інденкумаронові, метилметакрилатні;
- надлегкий – менше 500 кг/м³ – до них відносяться карбамідні, поліуретанові.

Важкі полімербетони найчастіше використовують в будівництві для виготовлення фундаментів, а також навантажених несучих конструкцій. З більш легких, зазвичай, роблять різноманітні елементи конструкцій, пам'ятники, декоративні елементи (рис. 1.3).

Масовий попит на полімербетонні підлоги в будівництві та промисловому дизайні зумовлений видатними експлуатаційними характеристиками, серед яких відзначають:

- великий запас міцності за невеликої ваги;
- рівна неслизька поверхня без пор і швів;
- безпильність і непроникність для вологи;
- холодостійкість і нечутливість до термоударів;
- стійкість до агресивних середовищ;
- захист від випадкового загоряння;
- привабливий зовнішній вигляд;
- відсутність запаху і шкідливих випарів;
- швидке затвердіння і стійкість до зношування;
- тривалий термін служби – від 10-15 років і більше.

Останнім часом все частіше полімербетони використовують в якості захисних покриттів для підлоги в приміщеннях різного типу призначення. В такому випадку його наносять відповідно до рис. 1.4.



а



б



в

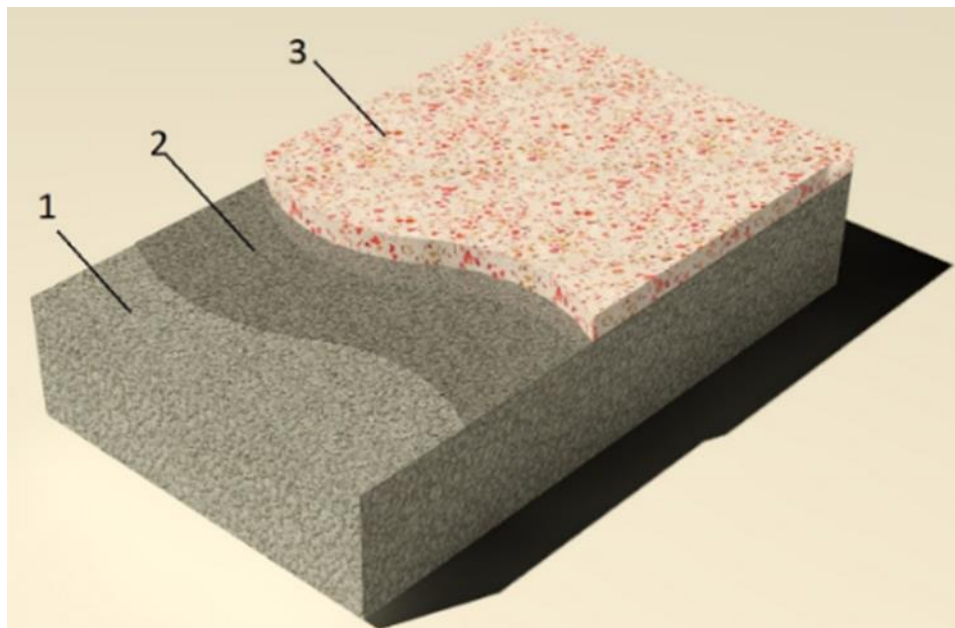


г



д

а – дренажні каналізації, б – сходи та балясини,
в – декор для комину, г – пам'ятники, д – скульптури;
Рисунок 1.3 – Приклади використання полімербетонів



1 – бетонна основа; 2 – шар ґрунтовки; 3 – полімербетон

Рисунок 1.4 – Структура підлоги із захисним шаром з полімербетону

Покриття з полімербетону характеризується гладкою поверхнею, яка має підвищену стійкість до водопоглинання, стирання та хімічних впливів. Таке конструктивне рішення актуальне для приміщень з інтенсивними навантаженнями і присутністю агресивних середовищ, а також для комерційних об'єктів з високими естетичними вимогами. А враховуючи можливість використання різноманітних наповнювачів та фарбників для надання текстури та кольору таким покриттям то використання полімербетонів з кожним роком стає все більш актуальним та набуває все більшого поширення.

1.4 Цілі та завдання дослідження

Виходячи з літературного огляду основною метою роботи є прогнозування механічних властивостей полімербетонів, на основі науково-обґрунтованого методу підбору складів полімербетонних сумішей, що враховує роль наповнювачів

та полімерних сполучників у формуванні структури та прогнозуванні властивостей полімербетонів.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- провести аналіз полімербетонів;
- дослідити вплив наповнювачів та полімерного сполучного на утворення контактного шару між ними;
- розробити спосіб визначення міцності наповнювачів в об'ємі полімербетону;
- встановити закономірності формування мікро- та макроструктури полімербетонів та визначити основні функціональні залежності, що забезпечують прогнозування механічних властивостей полімербетонів.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріали для дослідження

У роботі для приготування полімерних композитів використані такі смоли: фуранова (ФА), епоксидна (ЕД-20), поліефірна ненасичена (ПН).

Фуранова смола – це полімер, що отримується з фурфуролу (продукт переробки рослинної сировини, відходів деревної або сільськогосподарської промисловості), і має склад на основі фуранового циклу. Її основні властивості: висока стійкість до кислот, високих температур, лугів і радіації. Затвердіння відбувається при нагріванні до 150...170 ° С або під дією кислотних каталізаторів. Мономер ФА – утворюється при конденсації фурфуролу з ацетоном. Має щільність 1100...1200 кг/м³, а також високу стійкість до кислот, лугів і радіації. Процес полімеризації відбувається при нагріванні або за допомогою кислотних каталізаторів. Має високу реакційна здатність, що забезпечує швидкий набір міцності, а також мінімальне виділення фенолу та формальдегіду, що робить процес більш безпечним.

Епоксидна смола – це двокомпонентний термореактивний полімер, який складається зі смоли (зазвичай на основі бісфенолу А та епіхлоргідрину) та затверджувача. Після змішування компоненти вступають у хімічну реакцію, яка призводить до полімеризації, перетворюючи рідку суміш на твердий, міцний матеріал з високою адгезією, хімічною стійкістю та водонепроникністю.

Поліефірна ненасичена смола – це реактивний термореактивний полімер, що утворюється в результаті поліконденсації ненасиченої двохосновної кислоти (або її ангідриду) та діолу, або насиченої кислоти та ненасиченого діолу. Вона має подвійні зв'язки в основі макромолекул, які дозволяють їй тверднути (полімеризуватися) під дією затверджувача. Основними властивостями є висока міцність, стійкість до води та хімічних речовин, здатність набувати форми, але при цьому смола може бути токсичною та потребує захисту від УФ-випромінювання.

У дослідженнях в якості наповнювачів використовували природні компоненти: мелений кварцовий пісок, відходи гранітного виробництва у вигляді дрібно фракційного порошку, а також вулканічна пемза. Розміри включень наповнювачів не перевищували 3 мм.

2.2 Методи дослідження

Механічні властивості полімербетонів та полімерних сполучних визначалися на зразках у вигляді призми 4 см x 4 см x 16 см та кубів з розмірами ребер 7 та 10 см. Випробування зразків на міцність проводилося на пресі (марка пресу). Межа міцності при стисканні, згинанні та модуль пружності визначалися відповідно з методикою випробувань полімербетонів за ДСТУ [16-19].

При цьому перед випробуваннями на стиснення зразків полімербетону проводилося випробування на стиснення зразків полімерного зв'язуючого. Підбір складу полімербетонних зразків з зернами заповнювачів, що випробовуються, проводився виходячи із співвідношень за формулою 2.1:

$$\frac{V_z}{V_{пз}} = \frac{\rho_0}{\rho' - \rho_0} \times \frac{\rho_0^{BY}}{\rho' - \rho_0^{BY}}, \text{ при цьому } V_z + V_{пз} = 1, \quad (2.1)$$

де V_z – об'єм, який займають зерна наповнювача, м³;

$V_{пз}$ – об'єм, який займає полімерне зв'язуюче, м³;

ρ_0^{BY} – щільність суміші наповнювачів у вібраційно ущільненому стані т/м³;

ρ' – середня щільність наповнювачів т/м³;

ρ_0 – щільність суміші наповнювачів у вільному стані т/м³;

При цьому показники міцності зерен наповнювачів визначали за наступною формулою (2.2):

$$R_3 = 0,9 R_{пз} \left(\frac{R_{пб}}{R_{пз}} \right)^{1,83}, \quad (2.2)$$

де R_3 – міцність зерен наповнювача, МПа;

$R_{пб}$ – міцність полімербетону, МПа;

$R_{пз}$ – міцність полімерного зв'язуючого компоненту, МПа.

Випробування зразків полімербетону на стиск проводилося в наступній послідовності: навантажувалися зі швидкістю 0,1 МПа/с до величини 0,1 $R_{пз}$; витримувалося при навантаженні 5 хв і проводилося подальше навантаження зразків зі швидкістю 1,0 МПа/с, аж до руйнування. Розроблений спосіб дозволив значно точніше зробити визначення міцності заповнювача порівняно з відомими методиками.

Щільність синтетичних смол та полімерних сполучних визначалася за допомогою пікнометра Пінкевича. Поверхневий натяг полімерного сполучного знаходилося шляхом рахунка крапель.

Відомо що наявність пористості в матеріалі також може значно впливати на його властивості. Визначення пористості H_v в матеріалах визначається як різниця між теоретичними ($\rho_{от}$) і дійсними ($\rho_{од}$) об'ємними масами зразків, що досліджувалися за формулою (2.3):

$$H_v = \frac{\rho_{от} - \rho_{од}}{\rho_{от}} 100\% \quad (2.3)$$

Для визначення загального об'єму пор у полімербетонах ($H_{п.б.}$) можна використати різницю між загальною пористістю бетону ($H_{заг}$) і об'ємом полімеру (V_p), що входить до складу полімербетону (2.4):

$$H_{п.б.} = H_{заг} - V_p, \% \quad (2.4)$$

Кількість полімеру, що входить до складу полімербетону може бути розрахована математичним шляхом або прийнята на основі проведених

досліджень. Так як полімери, що входять до складу полімербетонів найчастіше і заповнюють собою пористість, що є в матеріалі і в процесі полімеризації можуть зазнати часткового випаровування і усадки то визначення показника об'єму полімеру є досить складним. Саме тому, найчастіше, об'єм полімеру визначається через його масу за формулою 2.5.

$$V_{\Pi} = \frac{m_n}{\rho_{\text{оп}} \cdot V_{\text{о.зр}}} 100\%, \quad (2.5)$$

де m_n – це маса полімеру, що міститься у зразку;

$\rho_{\text{оп}}$ – це питома вага полімеру, яка складає $1,05 \text{ г/см}^3$;

$V_{\text{о.зр.}}$ – об'єм зразка.

При знаходженні кількісних співвідношень між показниками якості полімербетону та параметрами його структури використано метод математичного розрахунку експерименту, який дозволяє визначити оптимальне значення властивості при значному скороченні кількості дослідів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРБЕТОНІВ

3.1 Адгезійна взаємодія компонентів

На сьогоднішній день в США та Європейських країнах для виготовлення полімербетонів застосовують досить велике різноманіття полімерних матриць, до яких відносяться мономери, олігомери та полімери, які в комбінаціях з модифікуючими добавками дозволяють отримати різноманітні модифікації полімербетонів. Однак найбільша перевага все ж надається поліефірним та епоксидним смолам, так як вони є досить дешевими та простими у використанні для виготовлення полімербетонів [20-22].

В літературних даних [23-26] розглянуто процеси адгезійної взаємодії матеріалів на полімерній основі. Спрямоване регулювання адгезією входить до комплексу основних проблем, пов'язаних зі створенням полімербетонів. Процес адгезійної взаємодії умовно поділяється на два етапи. На першому етапі дисперсний наповнювач і полімерний рідкий матричний матеріал, в результаті їх суміщення, механічно знаходяться в тісному контакті. Взаємодію на даному етапі можна інтенсифікувати за рахунок підвищення тиску та температури. На другому етапі відбувається безпосередня фізико-хімічна (міжмолекулярна) взаємодія матричного матеріалу з поверхнею наповнювача, внаслідок чого процес адгезії завершується.

В даний час відомо кілька концепцій, що дають уявлення про механізм адгезії [27, 28]:

- концепція механічної адгезії побудована на явищі затікання сирого матричного матеріалу в нерівності, порожнечі та тріщини твердої підкладки наповнювачів та заповнювачів;

- адсорбційна адгезія здійснюється за рахунок реалізації Ван-дер-Вальсової взаємодії;

- дифузійна адгезія передбачає взаємне молекулярне перенесення в зоні контакту;
- електрична адгезія передбачає наявність поверхні контакту подвійного електричного шару.

Виходячи з літературних даних [29] можна зробити висновок про те, що у реальних умовах в полімербетонах проявляється інтегральний ефект із одночасною участю декількох механізмів.

Ефекти змочування безпосередньо впливають на роботу адгезії (A_a), що визначається рівнянням Дюпре (3.1):

$$A_a = \gamma_n + \gamma_p - \gamma_{np}, \quad (3.1)$$

де γ_n – поверхневий натяг наповнювача на кордоні з повітрям;

γ_p – поверхневий натяг полімеру на кордоні з повітрям;

γ_{np} – поверхневий натяг на кордоні наповнювач-полімер.

Оскільки найчастіше руйнація сполучних відбувається за полімерною матрицею та адгезійним контактом наповнювача і полімеру, то в силу адитивності маємо $A = A_k + A_a$, де A – повна робота руйнування, A_k – робота когезії матриці. Підставляючи в цю рівність співвідношення Юнга $A_a = \gamma_p(1 + \cos \varphi)$, а також роботу когезії матриці, яка визначається за формулою $A_k = 2\gamma_p$, можемо визначити роботу руйнування полімерного сполучного:

$$A = \gamma_p(3 + \cos \varphi) \quad (3.2)$$

У полімербетоні руйнування відбувається за сполучним елементом та зернам наповнювача. Тому робота руйнування (A_p) полімербетону виражається залежністю [29]:

$$A_p = 2\gamma_n + \gamma_m(3 + \cos \varphi) \quad (3.3)$$

де $A_n = 2\gamma_n$ – робота когезії матеріалу наповнювача;

γ_n – поверхневий натяг матеріалу наповнювача на кордоні з повітрям.

З рівняння 3.3 видно, що сумарне підвищення міцності полімербетону в першу чергу забезпечується за рахунок збільшення значень, поверхневого натягу, а також за рахунок зниження крайового кута змочування при адгезійній взаємодії полімеру та частинок наповнювача. Необхідно враховувати, що адгезійна міцність включає також роботу (A_d), витрачену на деформування. Тому залежність 3.3 набуває більш складного вигляду:

$$A_p = 2\gamma_n + \gamma_m(3 + \cos \varphi) + A_d \quad (3.4)$$

За допомогою даного аналітичного виразу можна безпосередньо корегувати технологічний прийом виготовлення полімербетонів з еластичними прошарками між зернами наповнювачів. Саме такий прийом і використовується для виготовлення каркасних полімербетонів.

Основними структуроутворюючими факторами полімерної матриці є об'ємне співвідношення розчинника та полімерної смоли (Р/С), що утворюють полімерне сполучне. Для визначення впливу цього фактору було проведено дослідження з визначення поверхневого натягу різноманітних полімерних матриць з різних вмістом розчинників. Результати досліджень занесено в таблицю 3.1.

З отриманих результатів дослідження можна зробити наступні висновки. Для епоксидної смоли при збільшенні співвідношення Р/С до 1,6 спостерігається збільшення термодинамічної роботи адгезії, а при подальшому підвищенні співвідношення компонентів відбувається поступове зниження величини. Така ж залежність спостерігається і для поліефірної полімерної матриці. Для фуранової матриці ж спостерігається спочатку зниження термодинамічної роботи адгезії, а після співвідношення, яке складає 1,8 починає відбуватися поступове зростання цієї величини. Тому інтервали варіювання фактору Р/С повинні вибиратися з

урахуванням зміни механічних властивостей полімерних сполучних, так як це може значно вплинути на властивості полімербетонів. Отже оптимальним співвідношенням є величини від 1,2 до 1,6.

Таблиця 3.1 – Показники поверхневого натягу полімерної матриці, в залежності від об'ємного співвідношення розчинника та полімерної смоли

№	Об'ємне співвідношення P/C	Поверхневий натяг, 10^{-3} Н/м		
		Епоксидна	Поліефірна	Фуранова
1	0,4	28	31,5	36
2	0,6	33	33,5	34
3	0,8	36	37,5	33
4	1,0	38,5	42	33,5
5	1,2	41	43,5	35
6	1,4	42,5	43	37
7	1,6	43	42	37,5
8	1,8	42,5	40	37
9	2,0	42	38,5	36
10	2,2	41,5	38	35,5

3.2 Дослідження впливу компонентів на властивості полімербетонів

Вплив кількості наповнювачів матеріалів на епоксидну полімерну бетонну матрицю було досліджено в роботі [30], в якій було визначено, що при підвищенні вмісту полімерної смоли може збільшуватися генерація кількості тепла в суміші для виготовлення полімербетонів, але цією кількістю тепла можна знехтувати при малому вмісті полімерів та значних об'ємах наповнювачів (більше 40%) оскільки при цьому наповнювальні матеріали можуть поглинати тепло.

Об'єм пористості в полімербетонах може збільшуватися зі зростанням кількості наповнювача, і при цьому суміш може стати непрацюючою, коли об'єм заповнювача перевищує 80% [31]. При наявності значної кількості пор може значно знижуватися і міцність полімербетону на вигинання з 98 до 30 МПа. Наповнювальні компоненти мають значний вплив на механічні властивості полімерної матриці. Саме тому в досить багатьох літературних джерелах рекомендується притримуватися співвідношення полімербетонів, які використовуються для виготовлення композитних залізничних шпал у величинах 60% смоли та 40% наповнювача. Саме таке співвідношення гарантує досить високі показники міцності, а також жорсткості та тривалу працездатність без порушення суцільності виробів.

Для того щоб спрогнозувати властивості полімербетонів перш за все необхідно дослідити як саме ті чи інші фактори впливають на змінення їх механічних властивосте. Адже полімербетони відносяться до композиційних матеріалів, в яких кожен елемент може значно впливати на їх властивості.

На першому етапі досліджень було проведено ряд експериментів, які показали як саме змінюються властивості композиційних матеріалів залежності від наявності наповнювача в полімерній матриці.

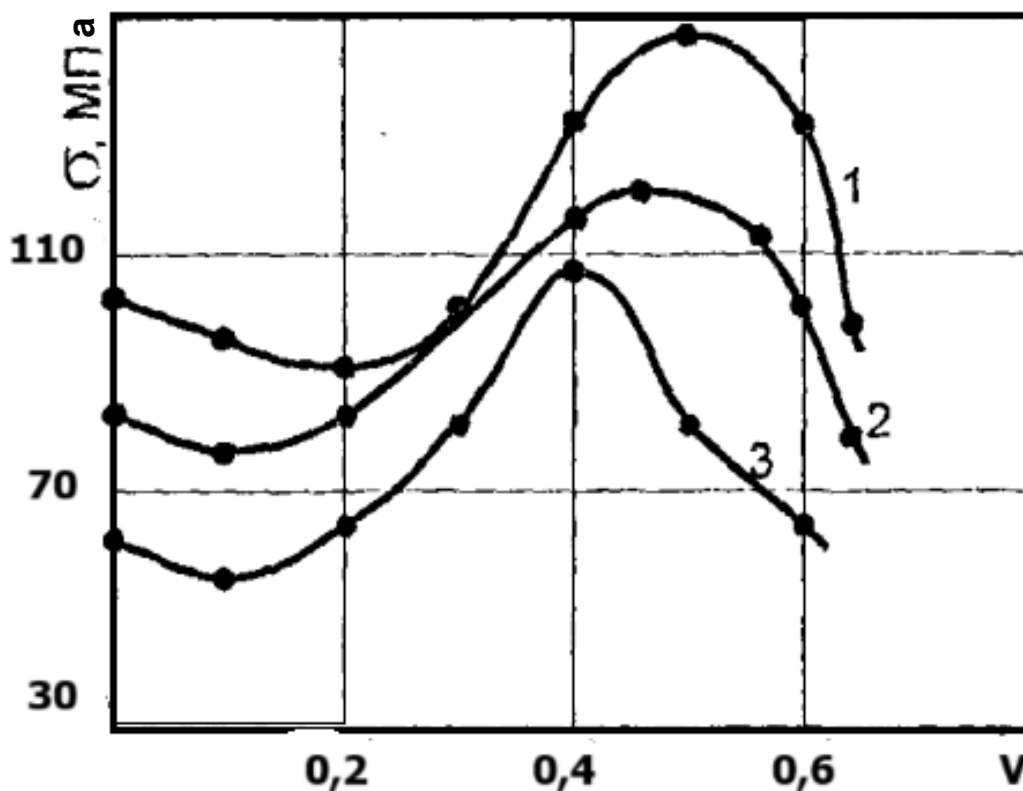
Для збільшення пластичності розчинів полімербетонів у порівнянні з чисто цементними розчинами до їх складу вводяться різноманітні добавки та пластифікатори. Відомо, що міцність полімербетонів, так само як і простих бетонів залежить від умов полімеризації, а саме від впливу вологості та температури. Але вологість повітря все ж впливає досить негативно на механічні властивості полімербетонів. Міцність зразків із полімербетонів наведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Міцність зразків полімербетонів

Маса смоли у співвідношенні до маси цементу, %	Міцність зразків при стисканні, Мпа	
	Сухі	Вологі
0	106	88
2	162	121
4	225	158
6	285	165

Аналізуючи результати досліджень ми можемо зробити висновки, що при проходженні процесу полімеризації на сухому повітрі показники міцності значно зростають, а при вологому повітрі – навпаки знижуються, що можна пояснити насиченням полімерів вологою.

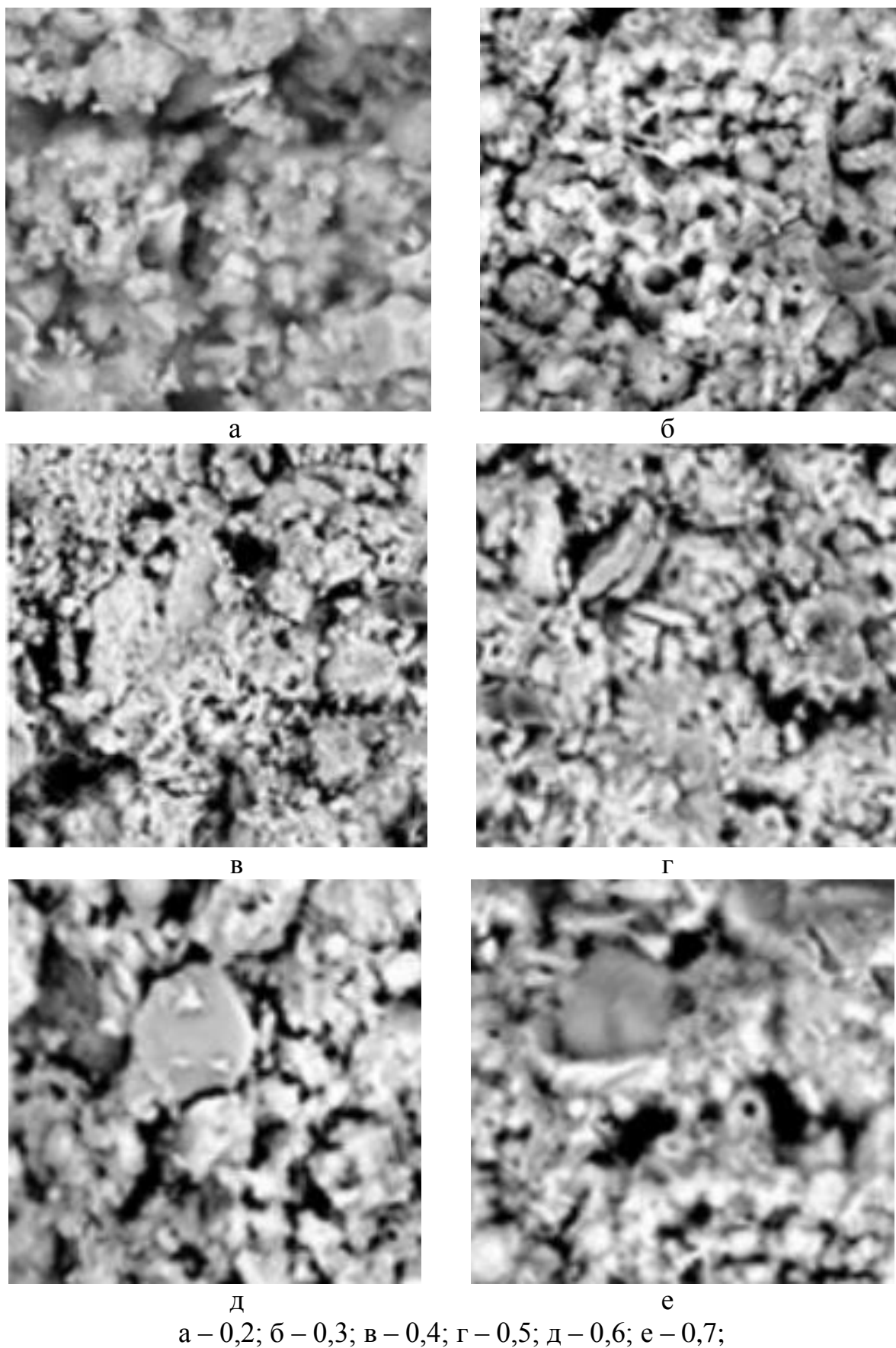
На наступному етапі роботи досліджувався вплив кількості наповнювачів на властивості полімербетонів. В якості дослідних зразків брали полімербетони, до складу яких в якості полімерної матриці входила епоксидна ЕД20, фуранова ФА та поліефірна НА смоли а основним наповнювачем, кількість якого варіювалася в ході експерименту буд дрібнодисперсний кварцовий пісок, вміст якого варіювався від 0 до 80% та мука гранітного виробництва у кількості 20%. Міцність полімербетонів визначали при стисканні за методикою, наведеною в розділі 2. Результати експериментів приведено на рис. 3.1.



1 – епоксидна смола, 2 – поліефірна смола, 3 – фуранова смола

Рисунок 3.1 – Залежність міцності при стисканні полімербетонів від вмісту наповнювачі та типу полімерної матриці

Також на властивості полімербетонів значною мірою може впливати структура полімербетонів, а саме принцип розташування наповнювачів в об'ємі полімербетоні та склад цих наповнювачів. На рисунку 3.2 приведено мікроструктури полімербетонів із вмістом наповнювачів від 0,2 до 0,7.

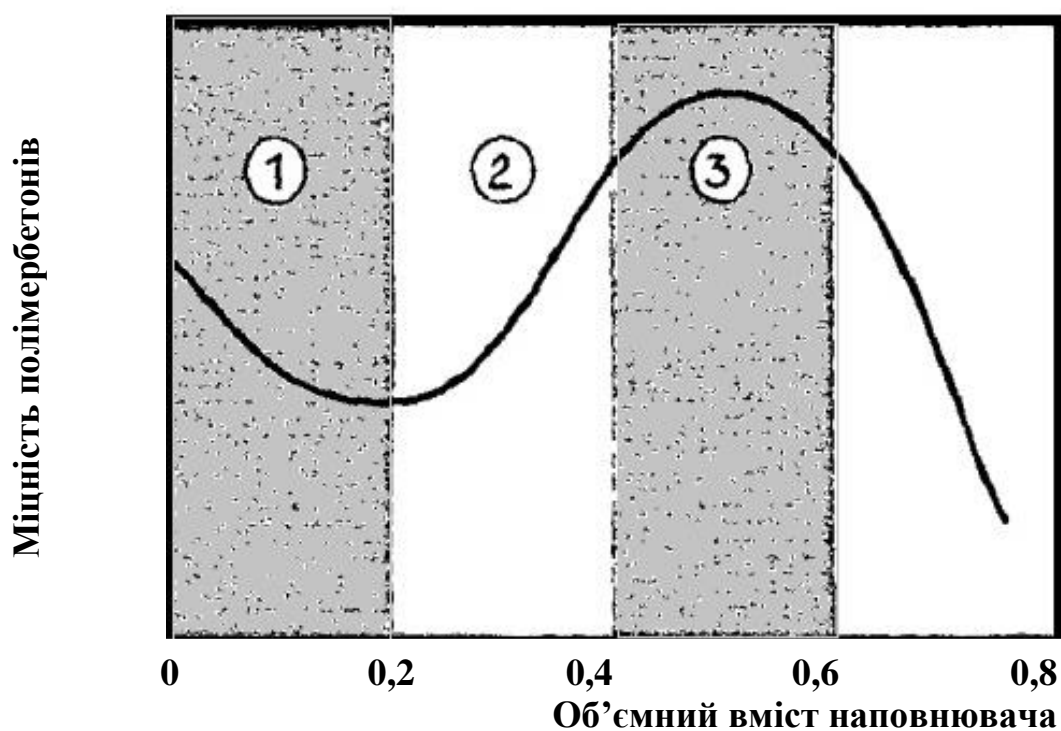


а – 0,2; б – 0,3; в – 0,4; г – 0,5; д – 0,6; е – 0,7;

Рисунок 3.2 – Залежність мікроструктури полімербетонів від об'ємного вмісту кварцового піску, x500

Як видно з рисунку 3.1 при збільшенні вмісту наповнювача спочатку відбувається зростання показника міцності, до значень об'єму наповнювача 0,4...0,5, а потім відбувається поступове зниження міцності. Це можна пояснити наявністю незакритих полімерами пор. Адже згідно з літературними даними [29] зниження міцності для полімербетонів можна пояснити наявністю значної кількості пор, що утворюються при затвердінні.

Аналізуючи мікроструктуру полімербетонів та їх механічні властивості можна зробити висновок, що при збільшенні вмісту наповнювача більше 0,6 відбувається агломерація наповнювача та досить велика кількість пор залишається не заповненою полімерною матрицею, що і призводить до значного зниження міцності. Досліджуючи ці залежності можна зробити висновки також про те, яка саме кількість наповнювача є оптимальною для полімербетонів. Аналізуючи ці дані, було побудовано залежність яка показує оптимальний вміст наповнювача (рис. 3.3).



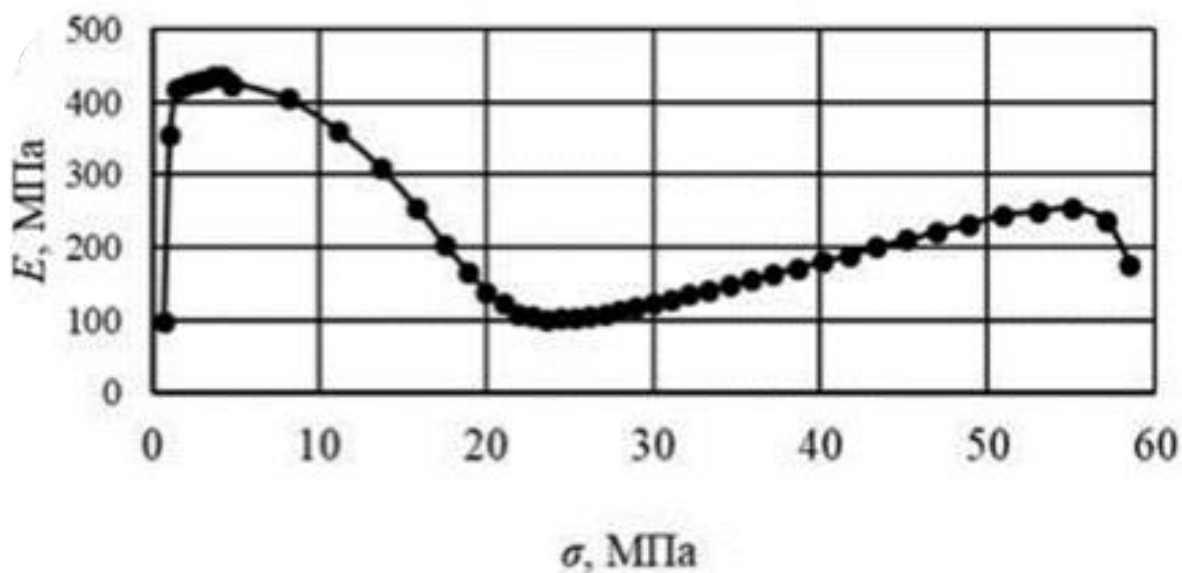
1 – зона неефективного наповнення, 2+3 – зона ефективного наповнення,

3 – зона оптимального наповнення

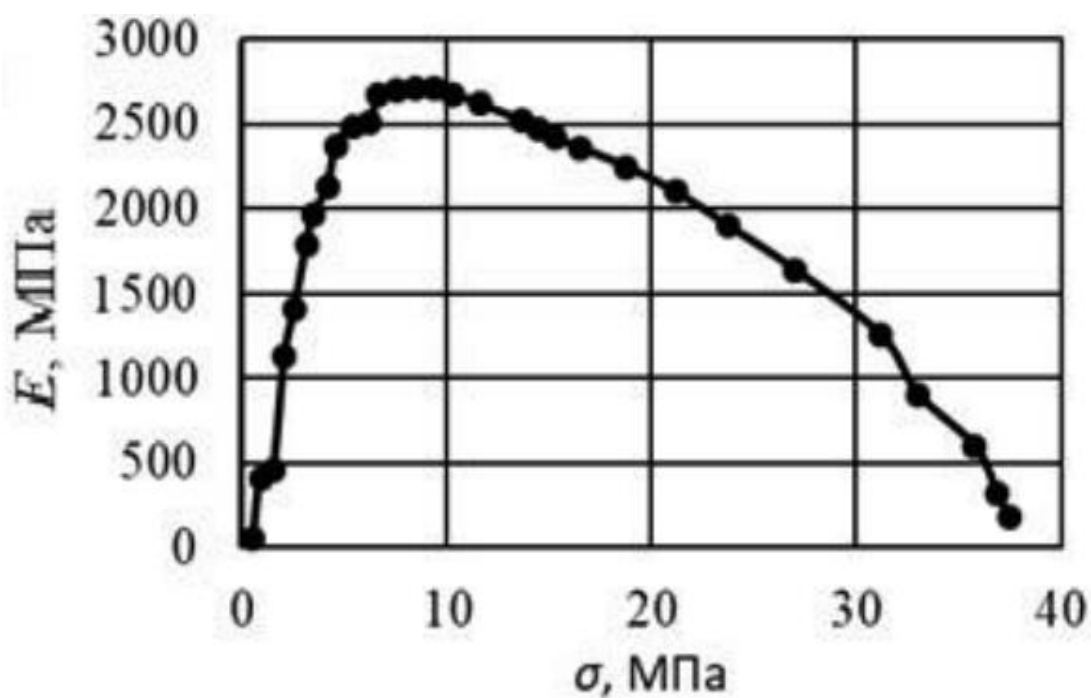
Рисунок 3.3 – Визначення зони оптимального заповнення полімербетонів наповнювачем для отримання максимальних значень міцності

Виходячи з результатів попередніх досліджень, на наступному етапі було досліджено вплив оптимального вмісту наповнювача на механічні властивості полімербетонів. Для дослідження було взято полімербетон, в якому в якості полімерної матриці була епоксидна смола ЕД-20, а в якості наповнювача було взято дрібнодисперсний кварцовий пісок, розмір фракцій якого складав 1...3мм а кількісний відсоток наповнювача складав 45% (рис. 3.4).

З рисунку 3.4. видно, що змінення характеру залежності $\sigma(\varepsilon)$ та $E(\sigma)$ свідчить про трансформацію молекулярної структури матеріалу та деформації за молекулярним механізмом в ході прикладання навантаження. Міцність композиту, наповненого кварцовим піском, менша, ніж міцність ненаповненої полімерної матриці. У той же час опір пружній та пластичній деформації композиту значно вищий, що виражалось у збільшенні ефективного модулю його пружності. Така залежність свідчить про складність фізичних (молекулярних) механізмів деформування та руйнування композиційних матеріалів. Протилежна дія двох факторів (зменшення рухливості фрагментів макромолекул та збільшення кількості джерел мікротріщин) призводить до того, що при досить великих напруженнях, що утворюються перед початком руйнування зразків, величина ефективного модуля композиту суттєво зменшується та наближається до значень, характерних для чистої смоли.



а



б

а – епоксидна смола ЕД-20, б – епоксидна смола та 45% дрібнодисперсного кварцевого піску

Рисунок 3.4 – Залежність модуля пружності композиційного матеріалу від ступеня напруженості

Згідно з літературними даними на механічні властивості полімербетонів значною мірою може впливати який саме наповнювач використовується для їх виготовлення, а саме показник питомої міцності поверхні наповнювача. Для дослідження цього впливу на властивості проводилися дослідження на міцність зразків полімербетонів на основі фуранової смоли, наповненої дрібнозернистим кварцовим піском та борошном граніту і пемзи. При цьому питома міцність наповнювача визначалася відповідно до довідкової літератури. Результати цих досліджень занесено до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Залежність міцності фуранових полімербетонів від об'ємного вмісту та питомої міцності наповнювача

№ дослідю	Питома міцність наповнювача, S, м ² /кг	Міцність(МПа) на стиснення при об'ємному вмісті наповнювача			
		0,3	0,4	0,5	0,6
1	1000	37	55	70	59
2	1500	55	70	85	92
3	2000	62	82	96	112
4	2500	68	90	103	120
5	3000	65	89	106	118
6	3500	60	86	104	114
7	4000	52	80	100	110

Аналізуючи дані таблиці 3.3 можна зробити висновок про наступне, що змінюючи склад наповнювачів для полімербетонів ми можемо регулювати механічні властивості. Додавання борошна граніту та пемзи призвело до зміщення зони максимальних значень при показнику наповнювача, який дорівнював 0,6. Порівнюючи властивості полімербетонів із наповненням лише кварцовим піском ця зона складала 0,5. Отже, наявність дрібнозернистих наповнювачів призводить до зміщення цієї зони в бік більших показників об'ємного співвідношення

наповнювачів, а також на 10% підвищує показники міцності полімербетонів на стиснення.

Ще одним із факторів, що впливає на властивості полімербетонів є їх пористість. Визначення пористості полімербетонів проводилися математичним методом, відповідно до методики, наведеної у другому розділі за формулою 2.5. Розрахунки проводилися для фуранової полімерної матриці та об'ємного співвідношення наповнювачів, яке складало 0,6. Результати розрахунків було занесено в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Показники пористості полімербетонів

№ дослідів	Н об, %	Vп, %	Пористість розрахована математичним шляхом
1	24,8	14,5	11,8
2	20,6	12,1	9,8
3	27,4	11,7	9,5
4	21,5	10,8	8,7
5	23,3	11,5	10,3
6	23,7	11,9	10,8
7	23,9	12,1	11,2

Виходячи із даних таблиці 3.4 можна зазначити, що похибка розбіжності між експериментальними та розрахунковими значеннями пористості полімербетонів складає приблизно 10%, що може входити в середньостатистичну похибку розрахунків, а отже цими формулами можна користуватися для прогнозування властивостей полімербетонів.

Аналізуючи дані таблиць 3.3 – 3.4 можна зробити висновки про вплив загального об'єму пор на міцність полімербетонів:

– при величинах питомої поверхні наповнювача до 2500 м²/кг відбувається інтенсивне зростання показника міцності полімербетонів, що можна пояснити зростанням дисперсності наповнювача;

– при подальшому збільшенні питомої поверхні наповнювача відбувається незначне зниження показників міцності, що можна пояснити утворенням пор через зменшення кількості полімерної матриці, яка могла б заповнити собою ці пори. Також можливою причиною зниження міцності може слугувати залишок повітря у суміші, що також може призводити до збільшення кількості пор.

ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день використання полімербетонів зростає з кожним роком і тому дослідження механічних властивостей таких матеріалів є досить актуальною матеріалознавчою задачею.

В результаті проведеного вивчення літературних даних науковців з України та із-за кордону, а також за результатами власних досліджень впливу різноманітних факторів на властивості полімербетонів можна зробити наступні висновки:

1. Для епоксидної смоли при збільшенні співвідношення Р/С до 1,6 спостерігається збільшення термодинамічної роботи адгезії, а при подальшому підвищенні співвідношення компонентів відбувається поступове зниження величини. Така ж залежність спостерігається і для поліефірної полімерної матриці. Для фуранової матриці ж спостерігається спочатку зниження термодинамічної роботи адгезії, а після співвідношення, яке складає 1,8 починає відбуватися поступове зростання цієї величини.

2. В полімербетонах при збільшенні вмісту наповнювача спочатку відбувається зростання показника міцності, до значень об'єму наповнювача 0,4...0,5, а потім відбувається поступове зниження міцності.

3. Міцність композиту, наповненого кварцовим піском, менша, ніж міцність ненаповненої полімерної матриці. У той же час опір пружній та пластичній деформації композиту значно вищий, що виражалось у збільшенні ефективного модулю його пружності. Така залежність свідчить про складність фізичних (молекулярних) механізмів деформування та руйнування композиційних матеріалів.

4. Змінюючи склад наповнювачів для полімербетонів ми можемо регулювати механічні властивості. Додавання борошна граніту та пемзи призвело до зміщення зони максимальних значень при показнику наповнювача, який дорівнював 0,6. Порівнюючи властивості полімербетонів із наповненням лише кварцовим піском ця зона складала 0,5. Отже, наявність дрібнозернистих наповнювачів призводить

до зміщення цієї зони в бік більших показників об'ємного співвідношення наповнювачів, а також на 10% підвищує показники міцності полімербетонів на стиснення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Будівельне матеріалознавство : підручник / за ред. П.В. Кривенка та ін. – К.: Ліра-К. – 2012. – 624 с.
2. Дворкін Л.Й. Будівельне матеріалознавство / Л. Й. Дворкін. – Навчально-довідковий посібник. – Рівне: НУВГП, 2017. – 355 с.
3. Дворкін Л. Й. Будівельне матеріалознавство : підручник / Л. Й. Дворкін, С. Д. Лаповська. – Рівне : НУВГП, 2016. – 504 с.
4. Полімербетон – що це таке: склад, особливості, призначення [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://stroyfibra.com.ua/polimerbeton-sho-ce-take-sklad-osoblivosti-priznachennya>
5. Технологія виробництва промислового полімербетона [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://polymall.com.ua/instrukcii/tehnologiya-virobnicztva-promislovogo-polimerbetona/>
6. Полімербетон. Характеристики полімербетона [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://pp-budpostach.com.ua/ua/a225894-polimerbeton-harakteristiki-polimerbetona.html>
7. Чередниченко І. А. Корозійно стійкі полімербетони на основі фуранових, епоксидних та поліефірних смол // Науковий вісник будівництва. – 2013. – № 3. – С. 278-282.
8. Ashcroft W. R. Industrial Polymer Applications: Essential Chemistry and Technology / William R. Ashcroft. – Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2016. – 564 p.
9. Figovsky O. Advanced Polymer Concretes and Compounds / Oleg Figovsky, Dmitry Beilin. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 390 p.
10. Hollaway L. C. Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure / L. C. Hollaway. – Amsterdam ; New York : Elsevier Science, 1999. – 405 p.

11. Ohama Y. Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars: Properties and Process Technology / Yoshihiko Ohama. – Park Ridge, N.J. : Noyes Publications, 1992. – 256 p.
12. Polymers in Concrete: Proceedings of the Second International Congress on Polymers in Concrete / edited by Y. Ohama. – SP-69. – Detroit : American Concrete Institute (ACI), 1981. – 441 p.
13. Hollaway L. C. Polymers and Polymer Composites in Construction / Leonard Hollaway. – London : Thomas Telford Publishing, 1990. – 258 p.
14. Мірус О. О. та ін. Переваги та недоліки використання полімербетонів у цивільному будівництві // Науковий вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності : Збірник наукових праць. – 2024. – С. 20-24.
15. Данченко Ю. М. Корозійно стійкі полімербетони на основі терморезистивних смол будівельного призначення (Огляд) / Ю. М. Данченко, А. І. Карєв, Т. М. Обіженко // Науковий вісник будівництва. – 2021. – Т. 105, № 3. – С 140-154. doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-140-154
16. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності / Мінрегіонбуд України. – [Чинний від 2009-07-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 15 с. – (Національний стандарт України).
17. ДСТУ Б В.2.7-213:2009 Будівельні матеріали. Бетони хімічно стійкі. Методи випробувань / Мінрегіонбуд України. – [Чинний від 2010-06-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 9 с. – (Національний стандарт України).
18. ДСТУ Б В.2.7-217-2009 Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона / Мінрегіонбуд України. – [Чинний від 2010-06-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 8 с. – (Національний стандарт України).
19. ДСТУ Б В.2.7-221:2009 Бетони. Класифікація і загальні технічні вимоги / Мінрегіонбуд України. – [Чинний від 2010-06-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – 14 с. – (Національний стандарт України).

20. Дослідження впливу вмісту піску та модифікуючих добавок на властивості полімербетонних композицій / Новак Д. С., Березненко Н. М., Середенко А. А., Піщулін О. Г. // Вісник КНУТД. – 2020. – №5 (150). – С. 103-110.
21. Bedi R., Chandra R., Singh S. Mechanical Properties of Polymer Concrete // Journal of Composites. – 2013. – Vol. 2013. – 12 p.
22. Guler S., Akbulut Z. F., & Tawfik T. A. Mechanical and Physical Properties of Polyester Polymer Concrete with Different Types of Aggregate // Advances in Civil Engineering. – 2014. – Vol. 2014. – 9 p.
23. Вергун О. О. Реологічні властивості бетонних сумішей та фізико-механічні характеристики важкого бетону з модифікованим плавом дикарбонових кислот: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та виробы» / О.О. Вергун. – Дніпропетровськ, 2011. – 20 с.
24. Pamshidi M., Pourkhorshidi A. R. A comparative study on physical/mechanical properties of polymer concrete and portland cement concrete // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 77. – P. 421-428.
25. Mohd Yusof M. Y., & Shahidan S. A Comprehensive Review on Physical and Mechanical Properties of Polymer as Concrete Material // Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment. – 2024. – Vol. 4(3). – P. 70-83.
26. Sivakumar M. V. N. Effect of Polymer modification on mechanical and structural properties of concrete – An experimental investigation // International Journal of Civil and Structural Engineering. – 2010. – Vol. 1, No 4.
27. Ali A., Ansari A.A. Polymer Concrete as Innovative Material for Development of Sustainable Architecture // In 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology. – 2013 Apr 12.
28. Fowler D.W. Polymers in concrete: a vision for the 21st century // Cement and concrete composites. –1999. – № 21(5-6). – P. 449-52.
29. Wahid Ferdous. Design of epoxy resin based polymer concrete matrix for composite railway sleeper // Proceedings of the 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23). – 2014. – P.137-142.

30. Турба Ю. В. Тріщиностійкість дисперсно армованого бетону : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та вироби» / Ю. В. Турба. – Львів, 2021. – 22 с.

31. Милков С., Крумов В. Дослідження пористої структури бетону і бетонополімеру. – Київ : Технічна думка. – 2010. – № 4. – С. 35–39.