

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд і технологій

(повна назва факультету)

Кафедра Будівельної механіки

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ясній В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

студенту Бехову Анатолію Валерійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження впливу епоксидної модифікації на еволюцію міцності бетону в залежності від терміну твердіння»

Керівник роботи Гудь Михайло Іванович, к.т.н., доцент

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

Затверджені наказом ректора від « 09 » 04 2026 року № 4/9-178

2. Термін подання студентом завершеної роботи _____

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ; Розділ 1 Огляд наукової та нормативної літератури за темою дослідження;

Розділ 2 Методика виготовлення та випробування бетонних зразків; Розділ 3 Результати

експериментальних досліджень; Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях;

Загальні висновки

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каспрук В.Б. доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С. ст. викл.		
Нормоконтроль	Мещерякова О.М. ст.викл.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1 Огляд наукової та нормативної літератури за темою дослідження		
2	Розділ 2 Методика виготовлення та випробування бетонних зразків		
3	Розділ 3 Результати експериментальних досліджень		
4	Розділ 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях		
5	Загальні висновки		

Студент

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Бехов А. В.

_____ (прізвище та ініціали)

Гудь М. І.

_____ (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД НАУКОВОЇ ТА НОРМАТИВНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ	8
1.1 Огляд зарубіжних джерел.....	8
1.2 Огляд праць вітчизняних вчених	13
1.3 Огляд нормативних документів щодо випробування та підбору складу бетонів	16
1.4 Висновки до розділу 1	19
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ БЕТОННИХ ЗРАЗКІВ.....	21
2.1 Методика виготовлення експериментальних зразків	21
2.2 Методика експериментального випробування кубів на міцність	28
2.3 Методика випробування бетонних зразків на водопоглинання.....	33
2.4 Висновки до розділу 2	36
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	38
3.1 Результати міцнісних випробувань	38
3.2 Результати випробувань на водопоглинання	47
3.3 Висновки до розділу 3	50
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	53
4.1 Охорона праці	53
4.1.1 Інженерні рішення з охорони праці.....	53
4.1.2 Техніка безпеки під час експлуатації будівельних машин	54
4.1.3 Висновки до підрозділу 4.1	55
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях	57
4.2.1 Законодавча база України	57

4.2.2 Стійкість споруди від ударної хвилі	57
4.2.3 Розробка заходів щодо підвищення стійкості промислового об'єкту	61
4.2.4 Висновки до підрозділу 4.2	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	65
БІБЛІОГРАФІЯ	68

ВСТУП

У сучасному будівництві питання забезпечення надійності, довговічності та експлуатаційної стійкості бетонних і залізобетонних конструкцій набувають особливої актуальності. Значна частина будівельних конструкцій експлуатується в умовах впливу агресивного середовища, циклічного зволоження та висушування, перепадів температур, а також тривалих механічних навантажень, що поступово призводить до погіршення фізико-механічних характеристик бетону та зниження довговічності конструкцій. У зв'язку з цим одним із важливих напрямів сучасного бетонознавства є пошук ефективних способів модифікації цементних композитів, спрямованих на підвищення їх міцності, щільності, водостійкості та тріщиностійкості.

Одним із перспективних напрямів удосконалення бетонів є використання полімерних модифікаторів, серед яких значний науковий і практичний інтерес становлять епоксидні смоли. Використання епоксидної модифікації дозволяє змінювати структуру цементного каменю, зменшувати кількість відкритих капілярних пор, покращувати адгезію між компонентами бетонного композиту та знижувати проникність матеріалу. Окрім цього, полімерні компоненти можуть впливати на процеси формування внутрішньої структури бетону та змінювати характер його роботи під навантаженням.

Особливого значення набуває дослідження впливу епоксидних компонентів на властивості бетонів у різні терміни тверднення. У більшості нормативних та експериментальних досліджень оцінювання характеристик бетону здійснюється у віці 28 діб, однак для полімер-модифікованих цементних композитів процеси структуроутворення можуть продовжуватись значно довше. Саме тому важливим є дослідження не лише ранньої, але й довготривалої зміни фізико-механічних характеристик епоксидно-модифікованих бетонів.

Аналіз зарубіжних і вітчизняних наукових джерел показує, що значна кількість досліджень присвячена використанню полімерних матеріалів у будівництві, зокрема у ремонтних композиціях, полімербетонах та захисних

покриттях. Водночас питання впливу епоксидної смоли безпосередньо на міцність і водопоглинання цементних бетонів у різні терміни тверднення досліджене недостатньо. Особливо це стосується встановлення взаємозв'язку між зміною міцності бетону та ущільненням структури цементного каменю внаслідок введення епоксидного модифікатора.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення експериментальних досліджень, спрямованих на визначення впливу епоксидної модифікації на фізико-механічні характеристики бетонів у віці 28 та 365 діб. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення складів полімер-модифікованих бетонів, а також для практичного застосування у будівництві та реконструкції будівель і споруд різного призначення.

Мета роботи – дослідження впливу епоксидної модифікації на міцність та водопоглинання бетонів з урахуванням термінів тверднення.

Об'єкт дослідження – бетонні композити, модифіковані епоксидною смолою ED-20.

Предмет дослідження – вплив різного вмісту епоксидного модифікатора на міцність та водопоглинання бетону у віці 28 та 365 діб.

Завдання дослідження:

- провести аналіз наукових джерел щодо застосування епоксидних модифікаторів у бетонних композитах;
- визначити особливості впливу епоксидної модифікації на процес формування структури цементного каменю;
- розробити склади бетонних сумішей із різним вмістом епоксидної смоли;
- провести експериментальні випробування бетонних зразків на стиск у віці 28 та 365 діб;
- виконати дослідження водопоглинання бетонних зразків у віці 28 та 365 діб;
- провести порівняльний аналіз отриманих результатів та оцінити ефективність епоксидної модифікації бетонів;

– сформувати практичні рекомендації щодо використання епоксидних компонентів у технології бетонів.

Методи дослідження – аналіз літературних джерел, експериментальні випробування, порівняльний аналіз та статистична обробка результатів досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні закономірностей впливу епоксидної модифікації на зміну міцності та водопоглинання бетонів у різні терміни тверднення.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання результатів дослідження при підборі складів бетонних сумішей із епоксидними модифікаторами для підвищення експлуатаційних характеристик бетонів, а також у навчальному процесі під час викладання дисциплін будівельного спрямування.

Апробація. Основні положення та окремі результати даного дослідження доповідались на ІХ Міжнародні студентські науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання».

Ключові слова: БЕТОН, МОДИФІКАТОР, ЕПОКСИДНА СМОЛА, ТЕРМІНИ ТВЕРДІННЯ, МІЦНІСТЬ НА СТИСК.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД НАУКОВОЇ ТА НОРМАТИВНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд зарубіжних джерел

Використання епоксидних модифікаторів у технології бетонів належить до перспективних напрямів сучасного матеріалознавства, оскільки дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні характеристики цементних композитів. Зарубіжні дослідження останніх десятиліть свідчать про стабільне зростання інтересу до полімер-модифікованих бетонів, зокрема до систем на основі епоксидних смол, які забезпечують покращення міцності, тріщиностійкості, водонепроникності та довговічності матеріалу [2–5].

Одним із ключових напрямів досліджень є оцінка впливу епоксидних смол на формування структури цементного каменю. У роботах Zhang Z., Zhang F., Wu C., Chen Y. встановлено, що введення епоксидного модифікатора сприяє ущільненню мікроструктури бетону, зменшенню кількості відкритих капілярів та обмеженню розвитку мікротріщин [3-4]. Автори довели, що оптимальний вміст епоксидної смоли у межах 10–15 % забезпечує найкращі показники морозостійкості та стійкості до сольової корозії. Аналогічні результати отримані Rahman M. M. та Galib M. O. F., які показали, що епоксидно-модифіковані бетони мають вищу міцність на стиск та знижену проникність порівняно зі звичайними цементними композитами [4-5].

Дослідження Awodiji C. T. та співавторів підтверджують позитивний вплив епоксидних смол на механічні властивості бетонів [4]. Автори встановили, що часткова заміна цементу епоксидним компонентом дозволяє збільшити міцність матеріалу, особливо при оптимальному дозуванні полімеру. Водночас надлишковий вміст епоксидної смоли може негативно впливати на процеси гідратації цементу, що призводить до зниження щільності структури.

Окремий напрям зарубіжних досліджень стосується деформаційної поведінки епоксидно-модифікованих бетонів при циклічних навантаженнях. У

роботах Rahman M. M. та Islam M. A. показано, що використання епоксидних смол підвищує енергоємність руйнування та покращує роботу матеріалу в умовах повторного стиску [5]. Це пояснюється формуванням полімерної просторової сітки, яка частково компенсує розвиток внутрішніх напружень у цементному камені.

Значна кількість сучасних досліджень присвячена довговічності епоксидно-модифікованих бетонів в агресивних середовищах. У роботі Chen Z. та співавторів досліджено комплексну дію сольової корозії та циклів заморожування-відтавання [6]. Було встановлено, що епоксидні компоненти суттєво сповільнюють розвиток деструктивних процесів у бетоні, а також зменшують втрати динамічного модуля пружності.

Питання самовідновлення бетонів із застосуванням епоксидних систем розглянуто у дослідженнях Lv J. та співавторів [7]. Автори вказують, що введення мікрокапсул з епоксидною смолою дозволяє активізувати процеси самозаліковування тріщин, що позитивно впливає на довговічність конструкцій. Подібні технології сьогодні активно розвиваються у країнах Європейського Союзу, США та Китаї.

У роботах Szewczak A. та співавторів досліджувалась адгезія модифікованих епоксидних смол до бетонної поверхні [8]. Встановлено, що введення мінеральних порошкових наповнювачів дозволяє суттєво покращити зчеплення полімерного шару з цементною основою. Це має важливе значення для ремонтних та захисних покриттів бетонних конструкцій.

Важливим напрямом є також дослідження епоксидно-бітумних композицій для дорожніх та мостових покриттів. Onyshchenko A. та співавтори показали, що використання епоксидних добавок в асфальтобетонах дозволяє підвищити стійкість покриттів до колійності, тріщиноутворення та температурних деформацій [9]. Автори відзначають суттєве підвищення довговічності дорожнього покриття при використанні епоксидно-бітумних систем.

У дисертаційних дослідженнях Shao Meiyu встановлено, що введення епоксидної смоли у литі асфальтобетони забезпечує підвищення адгезійних

властивостей та щільності структури композиту [9]. Автором доведено, що поєднання епоксидних смол із мінеральними волокнами дозволяє покращити водостійкість та тріщиностійкість матеріалу.

Значний інтерес становлять дослідження фізико-хімічних процесів у структурі епоксидних полімерів. У роботах Dong M., Zhang H., Tzounis L. та інших досліджено нанокompозити на основі епоксидних смол [10-11]. Автори відзначають, що введення наномодифікаторів забезпечує покращення механічних характеристик, теплопровідності та стійкості полімерної матриці.

Patil S. U. та співавтори досліджували вплив ступеня зшивання епоксидної смоли на її термомеханічні характеристики [12]. Встановлено, що зі збільшенням щільності просторової сітки підвищуються показники міцності та модуля пружності матеріалу. Подібні результати наведені також у роботах Wan X. та співавторів [13], де встановлено взаємозв'язок між ступенем полімеризації та теплопровідністю епоксидних систем.

Дослідження Li S., Yu X., Bao H., Yang N. показують, що структурна орієнтація полімерних ланцюгів може суттєво підвищувати теплопровідність епоксидних матеріалів [14]. Отримані результати відкривають перспективи використання епоксидних систем у конструкціях спеціального призначення.

У працях Ferdous W., Manalo A., Wong H. та інших дослідників розглядається застосування полімерних композитів у будівельних конструкціях [15]. Автори зазначають, що епоксидні системи є ефективним компонентом для формування композитних елементів із високою корозійною стійкістю.

Дослідження Al-Ghasham T. S. та співавторів показали, що введення епоксидної смоли дозволяє суттєво зменшити водопоглинання бетону та покращити його стійкість до проникнення агресивних середовищ [16]. Це пов'язано з формуванням щільної полімерної плівки в структурі цементного каменю.

У роботах Chandra S. та Ohama Y. встановлено, що полімер-модифіковані бетони мають покращені показники деформативності та ударної в'язкості [17].

Дослідники наголошують, що епоксидні полімери сприяють зниженню крихкості цементних композитів.

Beeldens A. та Ohama Y. досліджували довговічність полімерцементних матеріалів при експлуатації у вологих середовищах [18]. Автори дійшли висновку, що полімерні модифікатори забезпечують стабільність структури бетону навіть при тривалому впливі вологи.

У роботах Fowler D. W. розглядаються сучасні технології використання полімерних бетонів у транспортному будівництві [19]. Автор відзначає високу ефективність епоксидних композицій для ремонту мостів, дорожніх покриттів та промислових підлог.

Дослідження Ohama Y. є одними з фундаментальних у сфері полімер-модифікованих бетонів [20]. Автор детально описав механізми взаємодії полімерних компонентів із продуктами гідратації цементу та обґрунтував підвищення довговічності цементних композитів.

Сучасні роботи Wang R., Li X. та інших авторів [21] підтверджують, що епоксидні модифікатори забезпечують зменшення пористості бетону, покращують міжфазний контакт між цементним каменем та заповнювачем, а також підвищують опір утворенню мікротріщин.

Одними з найбільш авторитетних джерел у сучасному бетонознавстві є фундаментальні праці Sidney Mindess, J. Francis Young та David Darwin. У книзі Concrete автори розглядають бетон як складну багатокомпонентну систему, властивості якої формуються внаслідок фізико-хімічної взаємодії цементу, води, заповнювачів та добавок. Особливу увагу приділено структурі цементного каменю, процесам гідратації, формуванню пористості та механізмам руйнування бетону [22]. Автори наголошують, що будь-яка модифікація бетонної суміші, у тому числі введення полімерних або епоксидних компонентів, змінює процес структуроутворення цементної матриці та характер контактної зони між заповнювачем і цементним каменем. У праці також детально розглядаються питання довговічності, проникності, тріщиностійкості та впливу добавок на властивості бетону.

Вагомий внесок у розвиток сучасної теорії бетону зробив А. М. Neville у праці *Properties of Concrete*, яка вважається одним із базових світових джерел з бетонознавства [23]. У книзі систематизовано дані щодо міцності, деформативності, повзучості, усадки, проникності та довговічності бетонів. Автор детально аналізує вплив водоцементного співвідношення, структури порового простору та умов тверднення на експлуатаційні характеристики матеріалу. Для досліджень епоксидно-модифікованих бетонів ця праця є особливо цінною, оскільки дозволяє пояснити механізми підвищення щільності структури та зниження водопоглинання при введенні полімерних компонентів. Neville також наголошує, що довговічність бетону значною мірою залежить від проникності цементного каменю та розвитку мікротріщин, а саме ці характеристики є основними об'єктами впливу епоксидних модифікаторів.

Праця Р. К. Mehta та Р. J. М. Monteiro *Concrete: Microstructure, Properties and Materials* присвячена мікроструктурним процесам у бетоні та взаємозв'язку між структурою цементного каменю й експлуатаційними властивостями матеріалу [24]. Автори детально описують механізми формування цементної матриці, структуру гідросилікатів кальцію, капілярну пористість та процеси деградації бетону під дією агресивних середовищ. Значну увагу приділено сучасним добавкам і модифікаторам, які впливають на щільність структури бетону. Для магістерського дослідження епоксидних модифікаторів ця праця є важливою з погляду пояснення того, яким чином полімерні компоненти здатні змінювати мікроструктуру цементного каменю, зменшувати кількість відкритих пор та покращувати міжфазний контакт між складовими бетону.

Важливим спеціалізованим документом у сфері полімер-модифікованих бетонів є рекомендації ACI Committee 548. *Guide for the Use of Polymers in Concrete* [25]. Документ Американського інституту бетону систематизує сучасні підходи до використання полімерів у цементних композитах та містить класифікацію полімербетонів, полімерцементних бетонів і бетонів із полімерним просоченням. У рекомендаціях наведено вимоги до компонентів, технології приготування сумішей, методів випробування та сфер застосування полімер-

модифікованих бетонів. Особлива увага приділяється епоксидним смолам як одному з найбільш ефективних полімерних модифікаторів. Документ підкреслює, що введення епоксидних компонентів забезпечує підвищення адгезії, водонепроникності, хімічної стійкості та тріщиностійкості бетонів.

Однією з фундаментальних праць у сфері полімерцементних композитів є стаття Y. Ohama *Recent Progress in Concrete–Polymer Composites* [26]. Автор узагальнює результати багаторічних досліджень полімер-модифікованих бетонів та аналізує вплив полімерних компонентів на структуру і властивості цементних композитів. У роботі зазначається, що полімери, зокрема епоксидні смоли, формують у структурі бетону додаткову просторову полімерну сітку, яка частково перекриває капілярні пори та зменшує проникність матеріалу. Ohama наголошує, що полімер-модифіковані бетони характеризуються підвищеною міцністю при згині, кращою адгезією та більшою довговічністю в агресивних умовах експлуатації. Ця праця є однією з ключових теоретичних основ сучасних досліджень епоксидно-модифікованих бетонів.

Аналіз зарубіжних наукових джерел свідчить про високу ефективність епоксидних модифікаторів у технології бетонів та бетонних композитів. Основними позитивними ефектами їх використання є підвищення міцності, зниження водопоглинання, ущільнення структури цементного каменю, покращення морозостійкості та довговічності матеріалу. Водночас результати досліджень показують необхідність оптимізації дозування епоксидних компонентів, оскільки надмірний вміст полімеру може негативно впливати на процеси гідратації цементу та формування структури бетону.

1.2 Огляд праць вітчизняних вчених

Однією з найбільш релевантних для цієї тематики є оглядова праця Ю. М. Данченко, Т. М. Обіженко, Т. І. Уманської та О. С. Барабаш, у якій розглянуто проблеми й перспективи використання епоксидних матеріалів у будівництві, архітектурі та реставрації [27]. Для дослідження бетонів ця робота є важливою

насамперед тим, що узагальнює напрями застосування епоксидних композицій у будівельній галузі: як ремонтних матеріалів, захисних покриттів, адгезійних прошарків і полімерних систем для відновлення поверхонь мінерального походження.

Практичний аспект застосування епоксидних матеріалів у ремонтно-відновлювальних роботах розкрито у праці О. В. Струмскаса та Ю. М. Данченко, присвяченій реставрації і відновленню натурального каменю з використанням епоксидних матеріалів [28]. Хоча об'єктом дослідження у цій роботі є природний камінь, її результати мають методичне значення і для бетонних основ, оскільки йдеться про адгезію полімерної композиції до мінеральної поверхні, водостійкість та здатність епоксидного матеріалу працювати в умовах експлуатаційного зволоження.

Окремої уваги заслуговує стаття Ю. М. Данченко, О. В. Струмскаса, Т. М. Обіженко та співавторів, у якій досліджено епоксидні полімерні матеріали з підвищеною стійкістю до водних розчинів [29]. У роботі використано епоксидіановий олігомер ЕД-20 та амінний твердник ДЕТА, що є особливо цінним для тематики модифікації бетонів, оскільки саме подібні епоксидні системи можуть застосовуватись для підвищення водонепроникності, ущільнення порового простору та покращення захисних властивостей цементних композитів.

Фізико-хімічні аспекти формування епоксидної матриці розглянуто у праці Ю. М. Данченко, присвяченій структуруванню епоксидної смоли у присутності неіоногенної поверхнево-активної речовини [30]. Для бетонознавства це має значення з погляду керування процесом твердіння полімерної фази, її сумісності з мінеральними наповнювачами та формуванням контактної зони між полімерною і мінеральною складовими.

Важливим продовженням цього напрямку є дослідження Ю. М. Данченко, Т. М. Обіженко, М. П. Качоманової та М. Г. Тесленка щодо впливу кислотно-основних властивостей оксидних наповнювачів на вільну поверхневу енергію епоксиолімерних матеріалів [31]. Робота показує, що характер поверхні мінерального наповнювача безпосередньо впливає на взаємодію з епоксидною

матрицею. Для бетонних композитів це є принциповим, оскільки ефективність епоксидної модифікації значною мірою залежить від адгезії полімеру до цементного каменю та заповнювачів.

У статті Yu. Danchenko, V. Andronov, M. Teslenko та співавторів досліджено вільну поверхневу енергію епоксидних композитів із використанням автоматизованої вимірювальної системи [32]. Отримані результати можуть бути використані при доборі складу епоксидних композицій для бетонних і кам'яних основ, де важливими є змочування поверхні, адгезія та довговічність контакту між полімером і мінеральним матеріалом.

Робота Yu. Danchenko, V. Andronov, E. Rybka та S. Skliarov присвячена кислотно-основній рівновазі на поверхні оксидів різної хімічної природи [33]. Для епоксидно-модифікованих бетонів це дослідження є корисним у частині пояснення взаємодії полімерної смоли з мінеральними наповнювачами, мікрокремнеземом, оксидними добавками та дрібнодисперсними компонентами цементної матриці.

У праці Ю. М. Данченко, Ю. В. Попова та О. С. Барабаш досліджено вплив наповнювачів на структуру та характеристики епоксикомпозитів [34]. Це джерело є важливим для обґрунтування того, що епоксидна смола в будівельному композиті не повинна розглядатися ізольовано: її властивості залежать від типу, дисперсності та хімічної природи наповнювача.

До безпосередньо близьких до тематики бетонів можна віднести працю М. І. Гудя та П. В. Гирі, присвячену властивостям полімербетонів [35]. У ній полімербетон розглядається як композиційний матеріал, у якому полімерна складова виконує функцію в'язучого або модифікуючого компонента. Такий підхід є важливим для розуміння відмінностей між традиційним цементним бетоном, полімерцементним бетоном і полімербетоном.

Загальні матеріалознавчі основи застосування сучасних композиційних матеріалів у будівництві подано у навчальному посібнику О. В. Кондращенка [36]. Це джерело не є вузькоспеціалізованим дослідженням епоксидного бетону, однак

воно може бути використане для теоретичного обґрунтування ролі полімерних і композиційних матеріалів у сучасній будівельній практиці.

Також корисним допоміжним джерелом є навчальне видання С. В. Шаповала, у якому розглянуто сучасні будівельні матеріали та технології [37]. Праця може бути використана для загального пояснення місця полімерних матеріалів серед сучасних будівельних композитів, але її не варто подавати як експериментальне дослідження саме епоксидно-модифікованого бетону.

Найбільш розвиненим напрямом у межах цієї тематики є не стільки масове введення епоксидної смоли безпосередньо у цементну бетонну суміш, скільки використання епоксидних композицій у ремонті, реставрації, захисті мінеральних поверхонь, формуванні полімербетонів і керуванні властивостями епоксидних композитів із мінеральними наповнювачами. Для магістерського дослідження це є цілком прийнятною науковою базою, однак у тексті варто чітко розмежовувати: праці про епоксидний бетон, праці про полімербетон, праці про епоксидні ремонтні композиції та праці про фізико-хімічні властивості епоксидних композитів.

1.3 Огляд нормативних документів щодо випробування та підбору складу бетонів

Нормативне забезпечення експериментальних досліджень бетонів, модифікованих епоксидними компонентами, повинно ґрунтуватися на чинній системі національних та гармонізованих європейських стандартів, що регламентують підбір складу бетонної суміші, виготовлення контрольних зразків, умови їх тверднення, а також методи визначення фізико-механічних характеристик бетону. У межах даної магістерської роботи зазначені нормативні документи виступають методичною основою проведення експерименту та забезпечують належний рівень достовірності отриманих результатів. Їх використання дозволяє не лише стандартизувати процедуру дослідження, але й

забезпечити можливість коректного порівняння контрольних і модифікованих серій бетонів між собою.

Базовим нормативним документом для обґрунтування рецептури бетонної суміші є ДСТУ Б В.2.7-215:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу». Стандарт встановлює вимоги до підбору, коригування та призначення складів конструкційних бетонів залежно від необхідних експлуатаційних характеристик матеріалу. У документі визначено порядок встановлення номінального складу бетону, переходу до робочого складу та визначення фактичних дозувань компонентів у виробничих умовах [38]. Для даного дослідження положення цього стандарту мають особливе значення, оскільки введення епоксидного модифікатора впливає на співвідношення між компонентами бетонної суміші, її реологічні властивості, процеси ущільнення та формування цементного каменю. У зв'язку з цим експериментальні склади бетонів розглядаються не як довільні композиції, а як технологічно обґрунтовані системи із чітко визначеним співвідношенням цементу, води, заповнювачів та полімерного компоненту.

Вимоги до форми, геометричних параметрів та характеристик контрольних зразків регламентуються ДСТУ EN 12390-1:2024 «Випробування бетону. Частина 1. Форма, розміри та інші вимоги до зразків і форм». Стандарт є гармонізованою версією EN 12390-1:2021 та визначає нормативні вимоги до геометрії контрольних зразків, матеріалів форм і допустимих відхилень їх розмірів [39]. Для експериментальних досліджень бетонів із полімерними модифікаторами дотримання цих вимог є принципово важливим, оскільки навіть незначні відхилення геометрії або нерівномірність поверхонь здатні суттєво впливати на характер розподілу напружень під час випробування та, відповідно, на результати визначення міцності при стиску. Особливої актуальності це набуває при дослідженні бетонів із модифікованою структурою цементного каменю, для яких характерна інша механіка руйнування порівняно зі звичайними бетонами.

Процес виготовлення контрольних зразків і умови їх тверднення визначає ДСТУ EN 12390-2:2024 «Випробування бетону. Частина 2. Виготовлення зразків

та умови їх тверднення для випробування на міцність». Документ встановлює порядок приготування, укладання, ущільнення та витримання бетонної суміші, а також умови зберігання зразків до моменту проведення випробувань [40]. У контексті даного дослідження цей стандарт має особливе значення, оскільки введення епоксидної смоли змінює фізико-хімічні процеси формування структури бетону. Полімерний компонент здатний впливати на швидкість гідратації цементу, процеси водоутримання, формування порової структури та адгезію між компонентами бетонного композиту. Саме тому дотримання однакових умов ущільнення й тверднення для всіх серій зразків є необхідною умовою забезпечення об'єктивності експерименту та мінімізації впливу сторонніх факторів на кінцеві результати дослідження.

Безпосереднє визначення міцності бетонних зразків при стиску здійснюється відповідно до вимог ДСТУ EN 12390-3:2024 «Випробування бетону. Частина 3. Міцність зразків на стиск». Стандарт є ідентичним EN 12390-3:2019 та регламентує методикку проведення випробувань, порядок прикладання навантаження, фіксацію руйнівного зусилля та розрахунок міцності бетонних зразків [41]. Для магістерської роботи цей нормативний документ є одним із ключових, оскільки саме результати випробування на стиск виступають основним критерієм оцінювання ефективності епоксидної модифікації бетонів. Порівняння показників контрольної серії та серій із різним вмістом епоксидного компоненту дозволяє встановити характер впливу полімерної добавки на формування міцнісних характеристик бетонного композиту, а також оцінити доцільність її використання в технології конструкційних бетонів.

Окрему увагу в нормативному забезпеченні дослідження займає ДСТУ EN 12390-4:2024 «Випробування бетону. Частина 4. Міцність на стиск. Технічні вимоги до випробувальних машин». Документ встановлює вимоги до випробувального обладнання, його точності, калібрування та технічного стану [42]. Урахування положень цього стандарту є необхідним для підтвердження достовірності отриманих експериментальних результатів, оскільки точність визначення руйнівного навантаження безпосередньо залежить від технічних

характеристик пресового обладнання. Для проведення дослідження використовувалась випробувальна машина, технічні параметри якої відповідали чинним нормативним вимогам, що забезпечувало стабільність прикладання навантаження та коректність фіксації результатів випробування.

1.4 Висновки до розділу 1

Проведений аналіз наукових літературних джерел показав, що використання полімерних модифікаторів є одним із перспективних напрямів удосконалення сучасних бетонних композитів. Серед різних типів полімерних добавок особливу увагу в сучасному бетонознавстві приділяють епоксидним смолам, які здатні суттєво впливати на процес формування структури цементного каменю та змінювати фізико-механічні характеристики бетону. Результати зарубіжних досліджень свідчать про те, що введення епоксидних компонентів сприяє ущільненню структури цементного композиту, зменшенню кількості відкритих капілярних пор, покращенню адгезії між складовими бетону та підвищенню його довговічності в умовах дії агресивного середовища.

Встановлено, що одним із основних позитивних ефектів епоксидної модифікації є зниження водопоглинання та проникності бетону, що безпосередньо пов'язано з формуванням більш щільної внутрішньої структури цементного каменю. Окремі дослідження також підтверджують підвищення тріщиностійкості, морозостійкості та стійкості до циклічних навантажень у полімер-модифікованих цементних композитах. Водночас аналіз літературних джерел показав, що ефективність епоксидної модифікації значною мірою залежить від дозування полімерного компоненту, оскільки надлишковий вміст епоксидної смоли може негативно впливати на процеси гідратації цементу та формування структури бетону.

Огляд праць вітчизняних науковців показав, що в Україні дослідження епоксидних матеріалів переважно зосереджені у сфері ремонтно-відновлювальних технологій, полімербетонів, захисних композицій та епоксидних систем для

мінеральних поверхонь. Значна увага приділяється питанням адгезії полімерних матеріалів, їх водостійкості, фізико-хімічним процесам структурування епоксидної матриці та взаємодії полімерної фази з мінеральними наповнювачами. Разом із тим безпосередній вплив епоксидних смол на міцність і водопоглинання цементних бетонів досліджений недостатньо, що підтверджує актуальність даної магістерської роботи та необхідність проведення додаткових експериментальних досліджень.

Аналіз нормативної бази дозволив встановити, що проведення експериментальних досліджень бетонів повинно здійснюватися відповідно до чинних національних і гармонізованих європейських стандартів. Основні нормативні документи регламентують порядок підбору складу бетонної суміші, вимоги до контрольних зразків, умови їх тверднення та методику визначення міцності при стиску. Використання стандартів серії ДСТУ EN 12390 забезпечує уніфікованість методики дослідження, достовірність отриманих результатів та можливість їх коректного порівняння між окремими серіями зразків.

Таким чином, результати проведеного огляду літературних і нормативних джерел підтверджують перспективність застосування епоксидних модифікаторів у технології бетонів та обґрунтовують доцільність проведення експериментального дослідження їх впливу на фізико-механічні характеристики цементних композитів. Отримані теоретичні відомості стали основою для формування методики подальших експериментальних досліджень, підбору складів бетонних сумішей та оцінювання зміни міцності й водопоглинання бетонів залежно від вмісту епоксидного модифікатора.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ БЕТОННИХ ЗРАЗКІВ

2.1 Методика виготовлення експериментальних зразків

Випробування бетонних зразків на визначення міцності при стиску виконувалися відповідно до вимог чинних нормативних документів, що регламентують технологію виготовлення контрольних зразків, параметри випробувального обладнання та порядок оцінювання фізико-механічних характеристик бетону. Дотримання стандартизованої методики проведення досліджень дозволяло забезпечити достовірність отриманих результатів і створювало можливість їх подальшого порівняння з нормативними показниками та результатами аналогічних експериментальних робіт.

Як основні об'єкти дослідження використовувалися контрольні бетонні куби стандартного розміру $150 \times 150 \times 150$ мм, що є одним із найбільш поширених типів зразків для лабораторного визначення міцності бетону при стиску. Випробування проводилися після досягнення бетоном нормативного віку тверднення — 28 діб, а також через 365 днів. Саме термін 28 діб прийнятий як базовий для оцінювання проєктної міцності цементних композитів, оскільки в зазначений період відбувається основна частина процесів гідратації цементу та формування структури цементного каменю. Отримані у цьому віці результати дозволяють найбільш об'єктивно оцінити несучу здатність матеріалу та його відповідність заданому класу бетону.

Початковий етап дослідження включав комплекс підготовчих операцій, пов'язаних із підготовкою форм для виготовлення контрольних зразків. Перед початком бетонування форми перевірялися на відповідність установленим геометричним параметрам і допустимим відхиленням розмірів.

Особлива увага приділялася стану внутрішніх робочих поверхонь форм. Вони ретельно очищалися від залишків бетонної суміші, пилу, забруднень та продуктів попередніх випробувань, які могли негативно впливати на якість

формування зразків. Наявність сторонніх включень або нерівностей на поверхні форми здатна спричиняти локальні дефекти бетону, утворення раковин чи неоднорідностей структури, що у подальшому може впливати на результати випробувань.

Після очищення внутрішні поверхні форм покривалися тонким шаром мастильного матеріалу для полегшення процесу розпалублення та запобігання пошкодженню граней бетонних кубів після тверднення. Окремо контролювалася жорсткість конструкції форм і надійність їх з'єднань, оскільки деформація або зміщення елементів форми під час укладання й ущільнення бетонної суміші може призводити до викривлення геометрії контрольних зразків.

Проведення ретельної підготовки форм дозволило забезпечити належну якість виготовлення бетонних кубів, мінімізувати технологічні похибки та створити однакові умови для подальшого порівняння результатів експериментальних досліджень.

Після завершення очищення внутрішні поверхні форм покривалися тонким і рівномірним шаром мастильного матеріалу. Застосування такого покриття дозволяло зменшити адгезійне зчеплення бетонної суміші зі стінками форми та забезпечувало більш безпечне розпалублення зразків після початкового тверднення. Це мало особливе значення для збереження цілісності контрольних кубів, оскільки пошкодження граней, ребер або кутових ділянок зразка можуть впливати на характер його роботи під час випробування на стиск і призводити до викривлення фактичних показників міцності.

Окрему увагу на підготовчому етапі приділяли контролю жорсткості конструкції форм та стабільності їх геометричних параметрів у процесі укладання й ущільнення бетонної суміші. Надійність конструкції форми є важливою умовою отримання якісних контрольних зразків, оскільки навіть незначні деформації стінок під дією вібрації або тиску бетонної суміші можуть призводити до порушення правильності геометрії бетонного куба.

Недостатня жорсткість окремих елементів форми здатна спричиняти локальні зміщення або викривлення стінок у процесі бетонування, що негативно

впливає на точність внутрішніх розмірів зразка. У подальшому це може змінювати умови розподілу навантаження під час випробування на стиск та викликати нерівномірну концентрацію напружень у тілі бетону. Як наслідок, результати визначення міцності можуть не повністю відповідати реальним фізико-механічним характеристикам досліджуваного матеріалу.

Саме тому перед початком формування зразків перевірялися надійність з'єднання елементів форм, відсутність люфтів, деформацій та пошкоджень конструкції. Проведення такого контролю дозволяло забезпечити стабільність геометричних параметрів контрольних кубів, мінімізувати технологічні похибки та створити однакові умови для всіх серій експериментальних досліджень.



Рисунок 2.1 - Бетнозмішувач

Перед початком процесу приготування бетонної суміші всі складові матеріали проходили попереднє дозування з урахуванням їх фактичного фізичного стану. Особливу увагу приділяли вологості дрібного та крупного заповнювачів, а також сипкості цементу, оскільки саме ці параметри безпосередньо впливають на точність підбору складу бетонної суміші та стабільність водоцементного співвідношення. Урахування реального стану матеріалів дозволяло зменшити можливі технологічні похибки та забезпечити повторюваність характеристик суміші під час виготовлення різних серій зразків.

Контроль вологості заповнювачів має важливе значення для коригування фактичної кількості води замішування, адже надлишкова або недостатня волога у складі піску чи щебеню може суттєво змінювати реологічні властивості бетонної суміші та впливати на процес формування структури цементного каменю. Своєю чергою, оцінка сипкості цементу дозволяла врахувати можливі зміни його фізичного стану, пов'язані з умовами зберігання або частковим злежуванням матеріалу.

Завантаження компонентів у бетонозмішувач виконувалося послідовно, із дотриманням технологічної черговості введення матеріалів. Такий підхід забезпечував більш рівномірний розподіл компонентів у загальному об'ємі суміші та сприяв підвищенню ефективності процесу перемішування. Спочатку до змішувача вводили сухі компоненти, після чого поступово додавали воду замішування або модифікуючі добавки відповідно до складу дослідної серії.

Для виконання експериментального дослідження було сформовано три серії бетонних сумішей, які відрізнялися між собою складом рідкої фази та співвідношенням води й епоксидної смоли у процесі приготування (Таб.2.1).

У межах першої серії бетонна суміш виготовлялася за традиційною технологією, де як компонент замішування використовувалася лише вода. Її об'єм становив 3 л на 10 л приготовленої бетонної суміші (Рис. 2.2 а). Даний склад був прийнятий як контрольний та використовувався для подальшого порівняльного аналізу результатів експерименту.

Для другої серії дослідних зразків кількість води було зменшено до 2,0 л, після чого до бетонної суміші додатково вводили 0,5 л епоксидної смоли ED-20. Введення полімерного компонента здійснювалося після попереднього перемішування суміші на водній основі, що дозволяло забезпечити більш рівномірний розподіл епоксидної фази у структурі матеріалу. Така схема приготування суміші була спрямована на дослідження впливу помірної епоксидної модифікації на процеси структуроутворення цементного каменю та щільність бетонного композиту.

У третій серії бетонних сумішей вміст епоксидної смоли було суттєво збільшено. Для приготування використовували 1,5 л води та 1,5 л епоксидної смоли ED-20. За такого співвідношення компонентів полімерна складова фактично ставала одним із основних елементів рідкої фази бетонної суміші, що дозволяло оцінити характер зміни властивостей бетону при високому рівні епоксидної модифікації.

Таблиця 2.1 - Параметри складу бетонних сумішей експериментальних серій

Серія	К-сть зразків	Клас цементу	Водо-цементне співвідношення	Склад суміші	Середні розміри зразків, мм	Середня міцність зразків, МПа
Серія 1	10	Портландцемент М500	1:3	Портландцемент М500 (3,5 кг), пісок (8 кг) та щебінь (10 кг, фракція 5–20 мм)	151 × 150 × 151	30,7
Серія 2	10	Портландцемент М500	1:2,5	Портландцемент М500 (3,5 кг), пісок (8 кг), щебінь (10 кг), 2,0 л епоксидної смоли та 0,5 л води	151 × 150 × 151	17,4
Серія 3	10	Портландцемент М500	1:1,5	Портландцемент М500 (3,5 кг), пісок (8 кг), щебінь (10 кг), 1,5 л епоксидної смоли та 1,5 л води	151 × 150 × 151	16,6

Співвідношення цементу, дрібного заповнювача та щебеню для всіх серій залишалося незмінним і підбиралося відповідно до вимог щодо забезпечення проектної міцності бетону класу С25/30 при стиску. Це дозволило виключити вплив зміни мінерального складу суміші на результати дослідження та забезпечити коректне порівняння впливу саме епоксидної модифікації на властивості бетонного композиту.



A)



B)



B)

A) Серія 1. B) Серія 2. B) Серія 3.

Рисунок 2.2 - Зразки бетону на основі епоксидних смол

Формування контрольних зразків здійснювалося шляхом укладання бетонної суміші у попередньо підготовлені металеві форми з подальшим

ущільненням матеріалу. Процес укладання виконувався пошарово, що дозволяло забезпечити більш рівномірний розподіл бетонної суміші по всьому об'єму форми та створювало необхідні умови для якісного ущільнення кожного окремого шару.

Кожний шар бетонної суміші піддавався окремому ущільненню з метою видалення повітряних включень і зменшення загальної пористості бетону. Також, після заповнення форм відбувалося ущільнення на вібростолі в процесі якого досягалося ще більш щільне прилягання цементного каменю до зерен заповнювача, що позитивно впливало на формування контактної перехідної зони між окремими компонентами бетонного композиту. Одночасно це сприяло формуванню більш однорідної структури цементного каменю та зниженню кількості внутрішніх дефектів і мікропорожнин, які в подальшому можуть виступати концентраторами напружень під час навантаження.

Після завершення процесу формування контрольні зразки залишалися у формах протягом початкового етапу тверднення, необхідного для набору бетоном початкової міцності та стабілізації внутрішньої структури цементного каменю. У цей період відбувалися первинні процеси гідратації цементу, формувалася початкова просторово-зв'язана структура матеріалу та забезпечувалося поступове зростання його міцнісних характеристик.

Після досягнення бетоном достатньої початкової міцності виконувалося розпалублення зразків. Особливу увагу при цьому приділяли збереженню цілісності граней і ребер контрольних кубів.

Після розпалублення бетонні куби зберігалися у лабораторних умовах, які забезпечували нормальний перебіг процесів гідратації цементу та рівномірне тверднення матеріалу по всьому об'єму зразка.

Витримування контрольних зразків здійснювалося при досягненні віку 28 діб, а також 365 діб. Відповідно до чинних нормативних вимог саме 28 діб приймається як базовий для визначення проєктної міцності бетону та оцінювання його основних фізико-механічних характеристик. До цього часу в бетоні відбувається основна частина процесів гідратації цементу, що дозволяє отримати

найбільш репрезентативні показники міцності та об'єктивно оцінити ефективність застосованої модифікації бетонної суміші (рис. 2.3).



А) Серія 1. Б) Серія 2. В) Серія 3.

Рисунок 2.3 - Зразки бетону на основі епоксидних смол

2.2 Методика експериментального випробування кубів на міцність

Перед початком випробувань усі контрольні зразки підлягали попередньому візуальному огляду, метою якого була оцінка їх фактичного стану та придатності до подальших досліджень. У процесі огляду перевірялися цілісність граней і ребер бетонних кубів, однорідність поверхні, а також відсутність дефектів, здатних впливати на результати визначення міцності при стиску. Особливу увагу приділяли виявленню тріщин, сколів, раковин, локальних порожнин та інших пошкоджень, які можуть змінювати характер розподілу напружень у тілі бетону та спричиняти передчасне руйнування зразка під час навантаження.

Паралельно здійснювався контроль геометричної правильності контрольних кубів. Для бетонних зразків, поверхня яких мала незначні нерівності або викликала сумніви щодо точності геометричних параметрів, додатково виконувалися вимірювання фактичних розмірів. Уточнення геометричних характеристик дозволяло більш коректно визначити площу навантаженої поверхні та забезпечити точність подальших розрахунків міцності бетону при стиску. Такий

підхід давав можливість мінімізувати похибки, пов'язані з можливими відхиленнями розмірів контрольних зразків від нормативних значень.

Експериментальні міцнісні випробування проводилися із використанням гідравлічного преса Matest C104N (рис. 2.4), призначеного для визначення міцності бетонних і будівельних матеріалів при стиску. Дана установка дозволяє виконувати випробування бетонних кубів із розміром грані до 300 мм, циліндричних зразків, великих бетонних блоків та інших конструктивних елементів відповідних габаритів. Максимальне навантаження, яке здатен розвивати прес, становить 2000 кН, що забезпечує можливість дослідження широкого спектра бетонних і залізобетонних виробів у лабораторних умовах [37].

Випробувальний прес оснащений сучасною системою керування Servo-Plus, функціонування якої базується на цифрових технологіях автоматизованого контролю та обробки даних. Використання такої системи дозволяє забезпечити стабільність процесу навантаження, підвищити точність проведення випробувань і мінімізувати вплив людського фактора на результати експерименту.

Керування роботою установки здійснюється за допомогою сенсорного графічного інтерфейсу, який забезпечує налаштування основних параметрів випробування, контроль процесу прикладання навантаження та безпосереднє управління роботою гідравлічного преса. Система дозволяє оперативно задавати необхідні режими роботи обладнання відповідно до умов проведення експерименту та здійснювати постійний моніторинг параметрів випробування у режимі реального часу.



Рисунок 2.4 - Гідравлічний випробувальний прес Matest C104N [47]

Конструктивно випробувальний прес виконаний у вигляді жорсткої чотириколонної рами, що забезпечує високу просторову стійкість установки та стабільність її роботи під час проведення випробувань. Таке рішення дозволяє забезпечити рівномірне передавання навантаження на бетонний зразок і зменшити ймовірність виникнення перекосів або нерівномірного розподілу стискуючих зусиль у процесі навантаження.

Жорсткість рами та надійність конструктивних елементів пресу забезпечують стабільність геометричного положення натискних плит у процесі роботи установки. Завдяки цьому мінімізується вплив додаткових локальних напружень, які можуть виникати внаслідок перекосу навантаження або деформації елементів обладнання.

Основні технічні характеристики випробувального преса наведені нижче:

- конструктивна схема — жорстка чотириколонна рама;
- максимальне навантаження — 2000 кН;

- максимальний вертикальний просвіт — 336 мм;
- розміри натискних пластин — $510 \times 320 \times 55$ мм;
- клас точності обладнання — 1;
- максимальний хід поршня — близько 55 мм;
- параметри електроживлення — 230 В, 50 Гц, 750 Вт;
- габаритні розміри установки — $870 \times 600 \times 1400$ мм;
- маса випробувального обладнання — близько 900 кг.

Навантаження на контрольні зразки передавалося плавно та рівномірно, без різких динамічних впливів і стрибків тиску, що дозволяло забезпечити стабільний режим роботи випробувального обладнання протягом усього процесу дослідження.

Під час проведення випробувань особлива увага приділялася забезпеченню умов центрального стиску контрольних кубів. Правильне центрування зразка між натискними плитами преса дозволяло досягти рівномірного розподілу стискуючих напружень по всій площі навантаженої поверхні та мінімізувати ризик виникнення ексцентриситету.

У процесі навантаження здійснювалася безперервна фіксація прикладеного зусилля до моменту втрати несучої здатності контрольного зразка. Граничне значення навантаження, при якому відбувалося руйнування бетонного куба, приймалося як основний експериментальний показник для подальшого визначення міцності бетону при стиску.

Отримані результати використовувалися для розрахунку фактичних міцнісних характеристик бетонних зразків та подальшого порівняльного аналізу впливу різних концентрацій модифікуючих добавок на зміну фізико-механічних властивостей досліджуваного матеріалу. Це дозволило оцінити ефективність застосування полімерної модифікації та встановити характер зміни міцності бетону залежно від складу бетонної суміші.

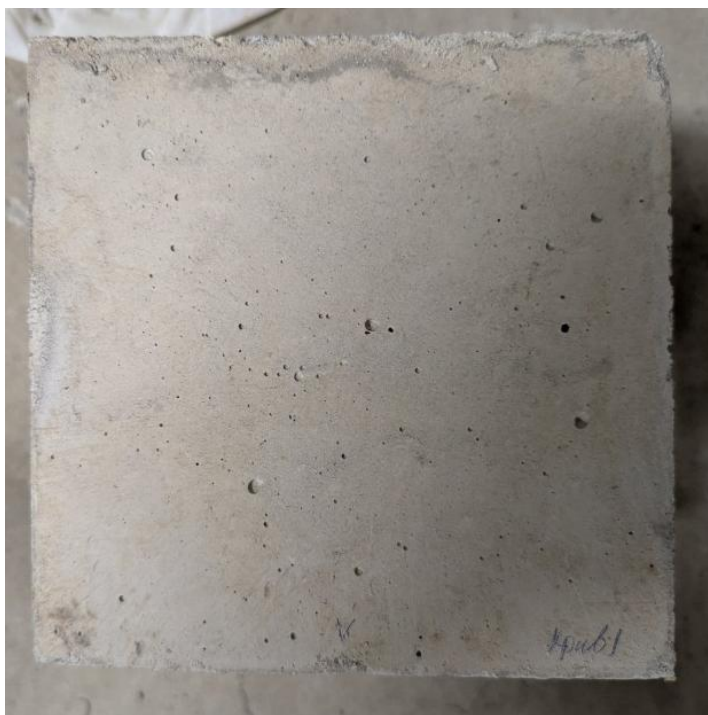


Рисунок 2.5 - Загальний вигляд випробовуваного кубика

Максимальне значення навантаження, при якому відбувалося руйнування контрольного зразка, фіксувалося безпосередньо у процесі випробування та в подальшому використовувалося як основний вихідний параметр для визначення міцності бетону при стиску. Випробування проводилось для кубів у віці 28 та 365 діб.

Визначення міцності при стиску виконувалося відповідно до загальноприйнятої методики шляхом обчислення відношення руйнівного навантаження до площі навантаженої поверхні контрольного зразка. Для бетонних кубів розміром $150 \times 150 \times 150$ мм площа робочої грані, на яку передавалося навантаження, становила 22500 мм^2 . Використання стандартизованих геометричних параметрів зразків забезпечувало уніфікованість отриманих результатів та створювало можливість їх подальшого порівняння з нормативними показниками, а також із результатами інших експериментальних досліджень.

Проведення розрахунків за єдиною методикою дозволяло отримати об'єктивні показники міцності бетону та оцінити ефективність застосування модифікуючих добавок у складі бетонної суміші.

Випробування виконувалися на серіях контрольних кубів, виготовлених за однакових технологічних умов та витриманих в ідентичному середовищі. Це дозволило визначити середні значення міцності для кожного дослідного складу та забезпечити більш об'єктивну оцінку властивостей бетонного композиту. Одночасно аналіз розкиду результатів у межах однієї серії давав можливість оцінити ступінь однорідності структури бетону, стабільність технології приготування суміші та рівномірність розподілу модифікуючих компонентів у матеріалі.

2.3 Методика випробування бетонних зразків на водопоглинання

Визначення водопоглинання бетонних зразків проводилося з метою оцінювання здатності матеріалу поглинати та утримувати вологу у своїй внутрішній поровій структурі. Даний показник є одним із важливих критеріїв, що характеризують щільність цементного каменю, ступінь відкритих пор бетону та його потенційну довговічність в умовах дії вологи. Аналіз водопоглинання дозволяє опосередковано оцінити якість сформованої структури матеріалу, оскільки інтенсивність проникнення води значною мірою залежить від кількості капілярних пор, мікротріщин та інших внутрішніх дефектів цементного композиту.

Особливого значення дослідження водопоглинання набуває при вивченні бетонів із полімерними модифікаторами. Введення полімерної складової здатне змінювати структуру порового простору цементного каменю, впливати на характер формування капілярної системи та, відповідно, змінювати здатність бетону до поглинання й утримання вологи.

На початковому етапі дослідження кожний контрольний зразок піддавався зважуванню у природному стані. Це дозволяло зафіксувати фактичну масу бетонного куба після витримання в лабораторних умовах та отримати вихідні дані для подальшого аналізу змін маси залежно від ступеня насичення матеріалу

вологою. Отримані показники використовувалися як початкові параметри для подальшого порівняння результатів випробувань між окремими серіями зразків.

Після цього бетонні куби висушувалися до умовно сухого стану (рис. 2.6) при температурі 40-60 °С. Процес висушування проводився з метою видалення вологи з відкритих пор і капілярів цементного каменю, що дозволяло визначити базову масу зразка без урахування вмісту вологи. Після завершення сушіння зразки повторно зважувалися, а отримана маса у сухому стані приймалася як основний показник для подальшого визначення приросту маси після водонасичення.

Використання маси сухого зразка як базового параметра дозволяло більш точно оцінити кількість вологи, яку бетон здатен поглинати у процесі насичення водою. Це, своєю чергою, створювало можливість для подальшого аналізу впливу полімерної модифікації на щільність структури цементного каменю та рівень відкритої пористості досліджуваного матеріалу.



Рисунок 2.6 - Процес висушування зразків

Після визначення маси бетонних зразків у сухому стані контрольні куби занурювалися у воду для подальшого водонасичення. Зразки розміщувалися таким чином, щоб вода повністю покривала всі їх поверхні та забезпечувала рівномірний доступ вологи до кожної грані бетонного куба. Такий підхід дозволяв створити однакові умови насичення для всіх дослідних зразків і забезпечував більш об'єктивне порівняння отриманих результатів.

У процесі витримування у водному середовищі відбувалося поступове проникнення вологи у відкриті капілярні пори та мікропорожнини цементного каменю. Інтенсивність водопоглинання значною мірою залежала від структури бетону, ступеня його пористості та характеру сформованої капілярної системи. Саме тому зміна маси після насичення водою дозволяла опосередковано оцінити щільність цементного каменю та ефективність полімерної модифікації бетонної суміші.

Період водонасичення становив одну добу, після чого бетонні зразки виймалися з води для подальшого зважування. Перед визначенням маси з поверхні кубів обережно видаляли надлишкову вологу без інтенсивного висушування матеріалу. Для цього поверхню зразків протирали вологою тканиною, що дозволяло усунути лише вільну поверхневу воду та водночас не впливати на вологу, яка вже була поглинута внутрішньою структурою бетону.

Після підготовки зразки повторно зважувалися у водонасиченому стані. Отримані значення використовувалися для визначення величини водопоглинання та подальшого аналізу впливу модифікуючих добавок на зміну структури цементного каменю.

Водопоглинання бетонних зразків визначалося шляхом порівняння маси бетону у сухому та водонасиченому станах. Розрахунок показника виконувався за відповідною формулою:

$$W = \frac{m_b - m_c}{m_c} \times 100\% \quad (2.1)$$

де W — водопоглинання зразка, %;

m_B — маса зразка у вологому, водонасиченому стані, кг;

m_C — маса зразка у сухому стані, кг.

На основі отриманих результатів виконувалося оцінювання зміни водопоглинання бетонних зразків залежно від вмісту модифікуючої добавки у складі бетонної суміші. Порівняння маси зразків у сухому та водонасиченому станах дозволяло визначити характер впливу полімерного компонента на структуру цементного каменю, ступінь відкритої пористості бетону та його здатність до поглинання й утримання вологи.

2.4 Висновки до розділу 2

У межах другого розділу було сформовано методику виготовлення та експериментального дослідження бетонних зразків із використанням епоксидного модифікатора. Розроблена методика базувалася на вимогах чинних нормативних документів та передбачала забезпечення однакових технологічних умов для всіх серій дослідних зразків. Це дозволило мінімізувати вплив сторонніх факторів на результати експерименту та забезпечити коректність подальшого порівняння фізико-механічних характеристик бетонів.

У процесі дослідження було виготовлено три серії бетонних сумішей, які відрізнялися співвідношенням води та епоксидної смоли у складі рідкої фази, а також віком випробувальних кубиків (28 та 365 діб відповідно). Контрольна серія виготовлялася за традиційною технологією із використанням лише води як компонента замішування, тоді як у дослідних серіях частина води замінювалася епоксидною смолою ED-20. При цьому співвідношення цементу, піску та щебеню для всіх серій залишалося незмінним, що дозволило оцінити вплив саме епоксидної модифікації на властивості бетонного композиту.

Пошарове укладання й ущільнення бетону забезпечували зменшення кількості повітряних включень, формування більш щільної структури цементного каменю та покращення контактної зони між заповнювачами і в'язучим. Додаткове

ущільнення на вібростолі дозволило підвищити однорідність структури бетонних зразків та мінімізувати внутрішні дефекти матеріалу.

Методика випробування бетонних кубів на стиск передбачала проведення попереднього візуального контролю зразків, перевірку їх геометричних параметрів та подальше навантаження на гідравлічному пресі Matest C104N із дотриманням стабільного режиму прикладання навантаження. Використання сучасного випробувального обладнання з автоматизованою системою керування дозволило забезпечити точність фіксації руйнівного навантаження та стабільність умов проведення експерименту. Отримані результати випробувань створюють основу для подальшого аналізу впливу епоксидної модифікації на зміну міцності бетонів.

Окремим етапом експериментального дослідження стало визначення водопоглинання бетонних зразків. Проведена методика дозволила оцінити зміну маси бетонних кубів у сухому та водонасиченому станах, а також встановити характер впливу епоксидної смоли на пористість і щільність структури цементного каменю. Аналіз водопоглинання є важливим доповненням до міцнісних випробувань, оскільки дозволяє більш комплексно оцінити ефективність полімерної модифікації бетонної суміші та її вплив на довговічність матеріалу.

Таким чином, сформована методика експериментальних досліджень забезпечила можливість комплексного оцінювання впливу епоксидного модифікатора на фізико-механічні характеристики бетонів. Отримані у межах другого розділу методичні положення стали основою для проведення подальших експериментальних випробувань та аналізу зміни міцності й водопоглинання бетонних зразків залежно від складу бетонної суміші.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Результати міцнісних випробувань

За результатами проведених експериментальних випробувань було визначено характер впливу різного вмісту епоксидного модифікатора на показники міцності бетонних зразків при стиску у віці 28 та 365 діб. Усі виготовлені зразки були піддані випробуванням на міцність на стиск з метою оцінки впливу вмісту епоксидної смоли на механічні властивості модифікованого бетону.

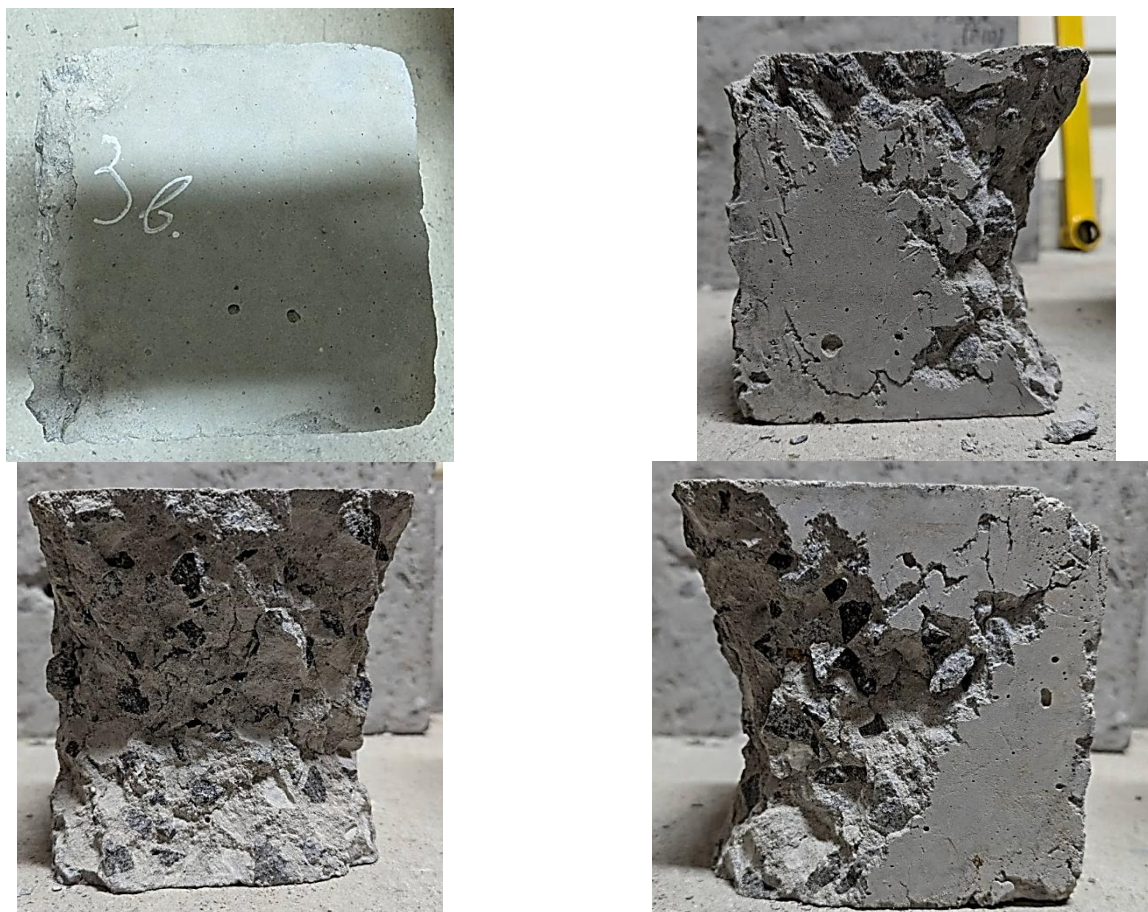


Рисунок 3.1 - Руйнування контрольного зразка у віці 28 діб

Усі випробування проводилися за однакових лабораторних умов із дотриманням стабільного режиму навантаження. Швидкість прикладання напруження становила 0,8 МПа/с, що відповідало вимогам нормативної методики

проведення випробувань бетонів на стиск. Забезпечення однакових умов навантаження мало принципове значення для достовірності експерименту, оскільки дозволяло мінімізувати вплив сторонніх факторів та забезпечити коректне порівняння результатів між окремими серіями зразків.

Найвищі значення міцності на стиск були отримані для контрольної серії, яка не містила епоксидної смоли. Середня 28-денна міцність на стиск становила 30,7 МПа, що відповідає розрахунковій міцності бетону марки С25/30.

Характер руйнування контрольного зразка свідчив про типовий механізм роботи цементного композиту при стиску, коли руйнування відбувається внаслідок розвитку внутрішніх мікротріщин та поступового порушення цілісності цементного каменю. Отримане значення міцності також підтвердило відповідність сформованого складу бетонної суміші проєктним параметрам.



Рисунок 3.2 - Руйнування зразка серії 2 у віці 28 діб

Проміжні значення міцності були отримані для серії бетонних зразків із помірним вмістом епоксидної смоли, де середня міцність при стиску становила 17,4 МПа. Отриманий результат свідчить про те, що навіть часткове заміщення води полімерним компонентом суттєво впливає на процеси формування структури цементного каменю та змінює характер роботи бетонного композиту під навантаженням.

Порівняно з контрольним складом така модифікація не забезпечила підвищення міцності бетону, що може бути пов'язано зі зміною умов гідратації цементу та порушенням оптимального співвідношення між мінеральною та полімерною фазами. Імовірно, присутність епоксидної смоли у складі рідкої фази бетонної суміші частково обмежувала нормальний перебіг процесів формування цементного каменю, внаслідок чого структура матеріалу ставала менш однорідною та більш чутливою до утворення внутрішніх дефектів.

Важливим фактором також є зміна характеру взаємодії між цементною матрицею та зернами заповнювача. За наявності полімерної складової у значній кількості може погіршуватися формування контактної перехідної зони, що негативно впливає на здатність бетону рівномірно сприймати стискуючі навантаження. У результаті підвищується ризик локальної концентрації напружень і передчасного руйнування окремих ділянок структури.

Найнижчі показники міцності були отримані для серії зразків із максимальним вмістом епоксидної смоли, де середня міцність бетону при стиску становила лише 16,6 МПа. Отримані результати свідчать про суттєве погіршення фізико-механічних характеристик бетонного композиту при надмірному вмісті полімерного компонента у складі суміші.

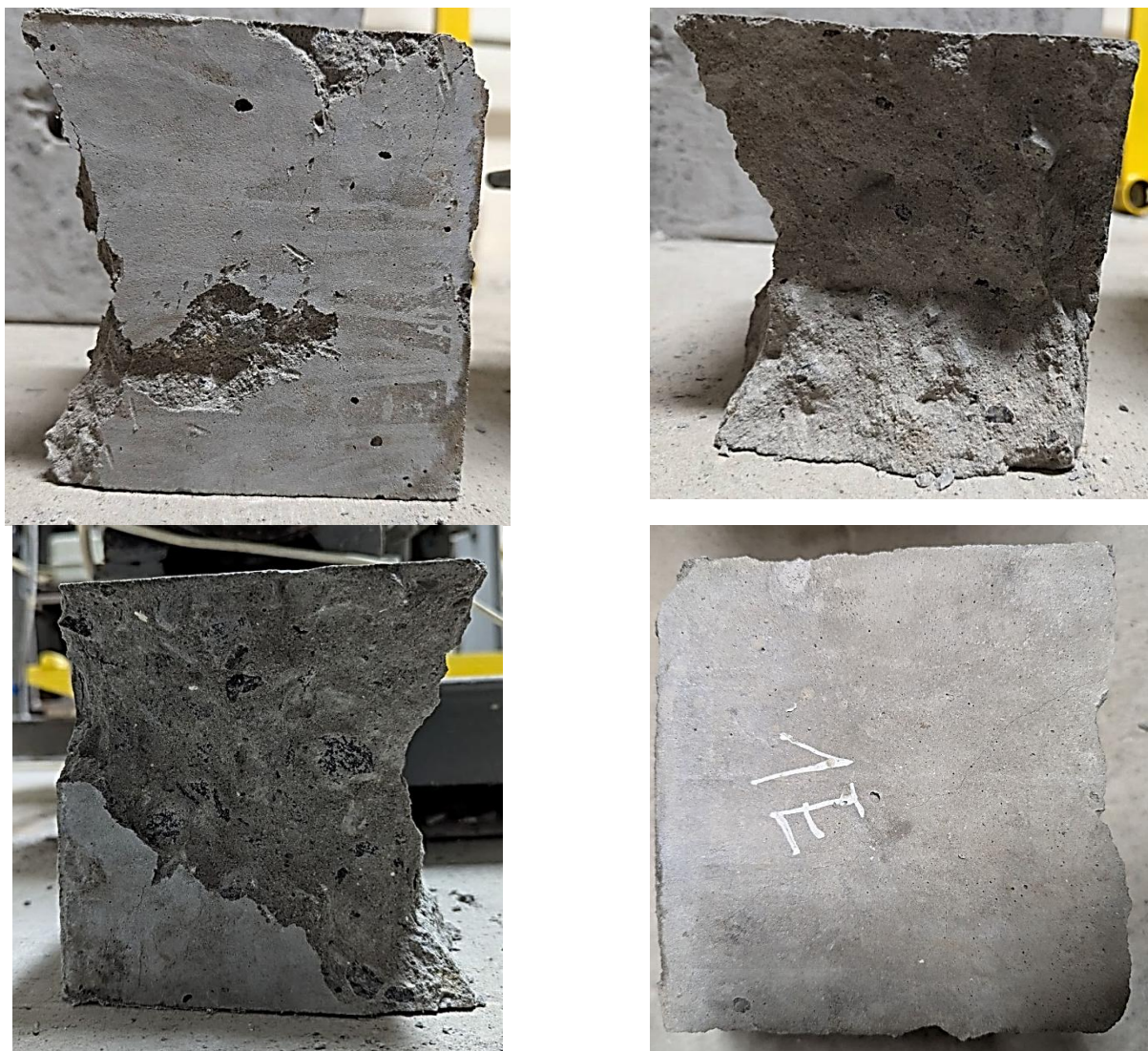


Рисунок - 3.3 Руйнування зразка серії 3 у віці 28 діб

Значне заміщення води епоксидною смолою негативно вплинуло на перебіг процесів гідратації цементу та формування повноцінної структури цементного каменю. За таких умов у бетоні формується недостатньо зв'язана цементна матриця зі зниженою щільністю та порушеною структурною цілісністю. Це, своєю чергою, призводить до ослаблення внутрішніх зв'язків між мінеральними компонентами бетонного композиту та зниження його здатності ефективно сприймати стискуючі навантаження.

Важливим фактором також є погіршення контактної взаємодії між цементним каменем і зернами заповнювача. При надлишковому вмісті епоксидної складової порушується нормальне формування контактної перехідної зони, яка є однією з найбільш відповідальних ділянок структури бетону. У результаті зростає

ризик виникнення локальних дефектів, внутрішніх неоднорідностей та зон концентрації напружень, що сприяють передчасному руйнуванню матеріалу під дією навантаження.

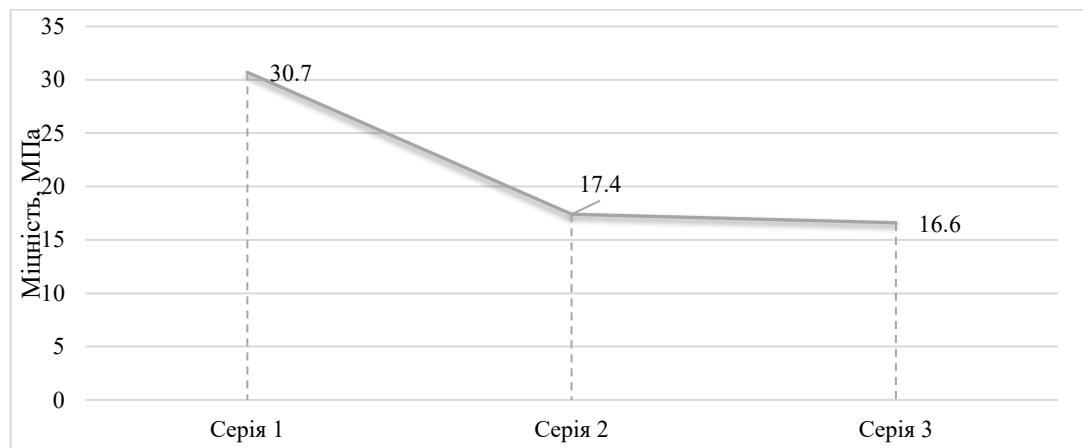


Рисунок 3.4 - Криві міцності зразків у віці 28 діб в залежності від вмісту епоксидного модифікатора

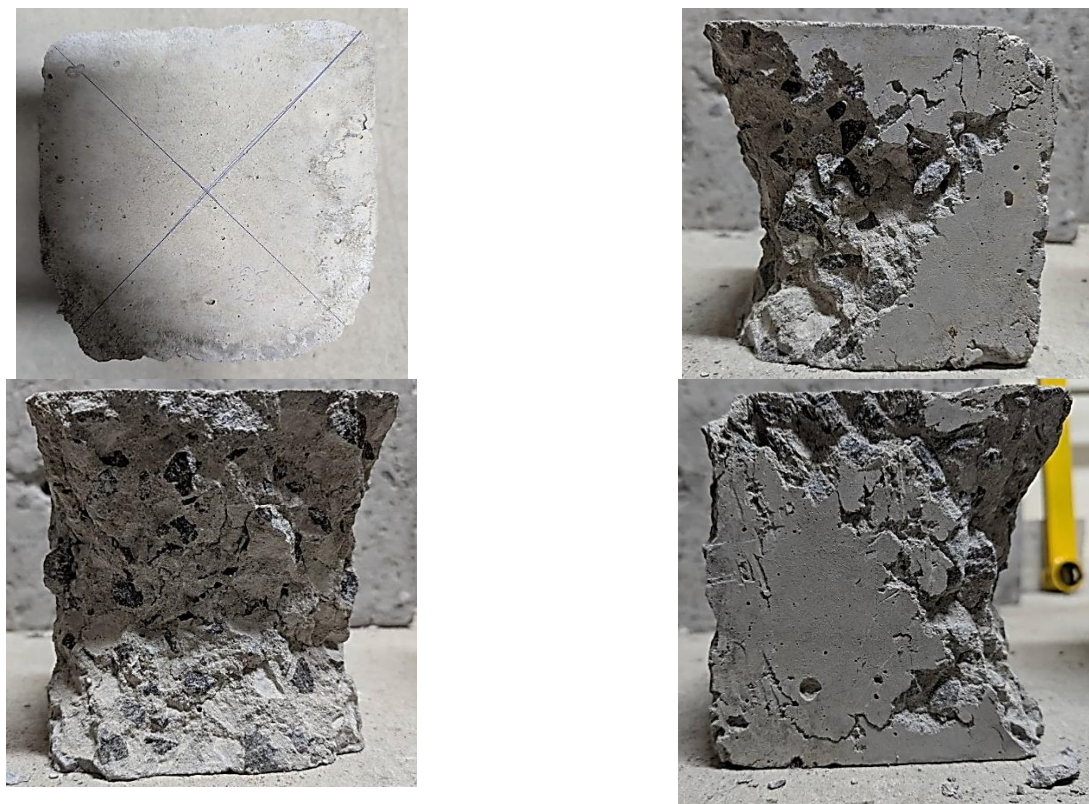


Рисунок 3.5 - Руйнування контрольного зразка у віці 365 діб

Перший дослідний (контрольний) зразок мав площу поперечного перерізу 23560 мм². У процесі навантаження було зафіксовано максимальне значення руйнівного зусилля на рівні 705,03 кН, що відповідало граничному напруженню стиску 29,9 МПа у віці 365 діб. Отриманий результат свідчить про достатньо стабільне формування внутрішньої структури бетону та рівномірний розподіл напружень у межах робочого об'єму зразка. Характер досягнутих показників дозволяє віднести бетон до категорії матеріалів із прогнозованою роботою під дією статичного стиску, без різких ознак передчасного руйнування.



Рисунок 3.2 - Руйнування зразка серії 2 у віці 365 діб

Другий зразок характеризувався дещо меншою площею поперечного перерізу — 22952 мм². При випробуванні було отримано максимальне навантаження 695,50 кН, тоді як відповідне максимальне напруження складало 30,30 МПа у віці 365 діб. Незважаючи на незначне зменшення граничного навантаження порівняно з попереднім зразком, рівень міцності в перерахунку на площу перерізу виявився дещо вищим. Подібний результат пов'язаний із більш щільною структурою бетонного каменю, локальними особливостями ущільнення суміші, меншою кількістю внутрішніх пор у тілі зразка.

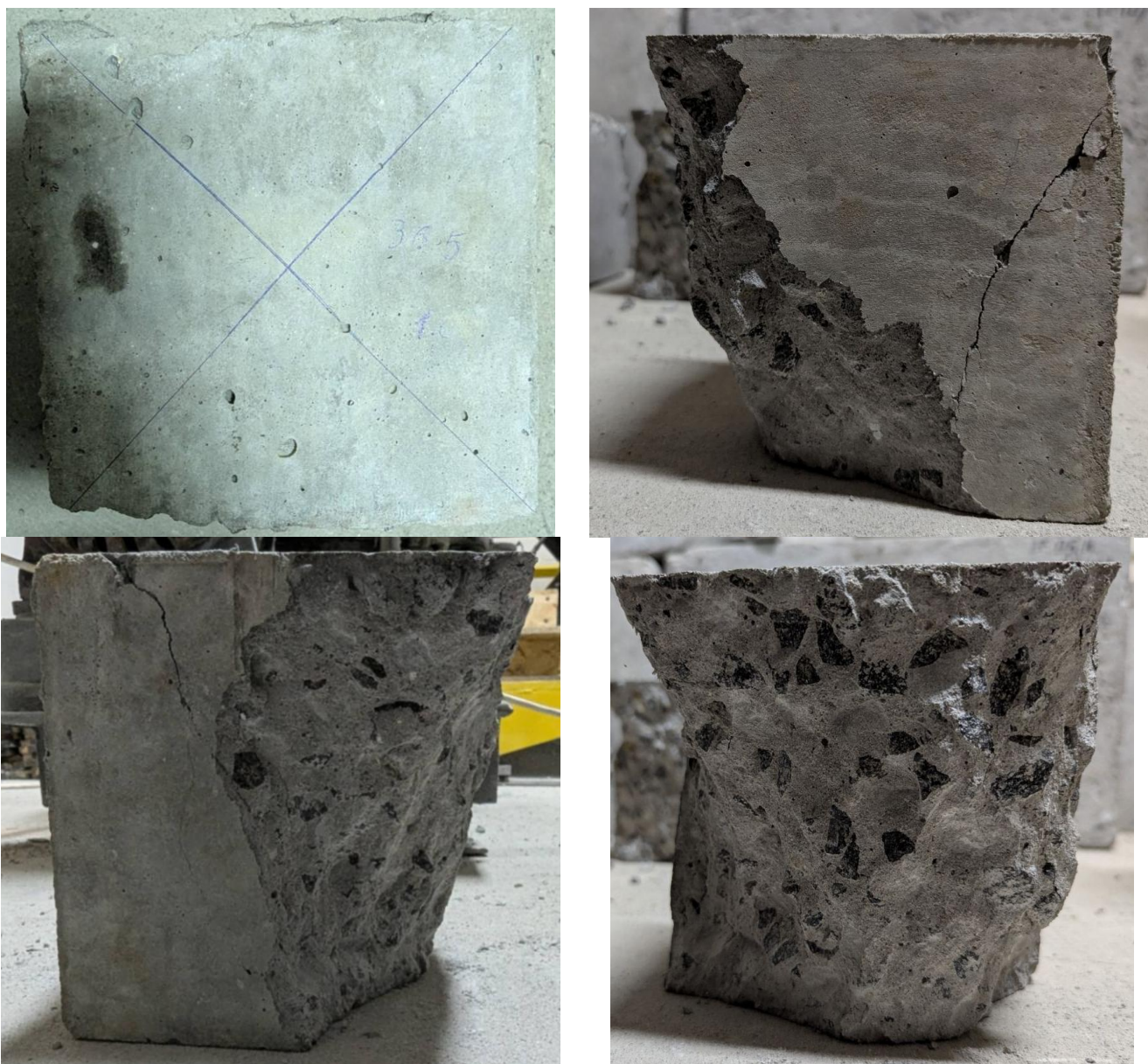


Рисунок 3.3 - Руйнування зразка серії 3 у віці 365 діб

Найвищі показники міцності були зафіксовані для зразків серії, площа поперечного перерізу якого становила 22800 мм². У ході випробування руйнівне навантаження досягло 856,75 кН, а максимальне напруження стиску — 37,6 МПа. Отримані значення суттєво перевищують результати двох попередніх серій, що свідчить про покращену внутрішню структуру матеріалу, більш ефективне ущільнення бетонної суміші та вплив модифікуючих компонентів на формування цементного каменю. Крім того, підвищення граничної міцності пов'язане зі зменшенням кількості мікротріщин та капілярної пористості, які безпосередньо впливають на опір бетону осьовому стиску.

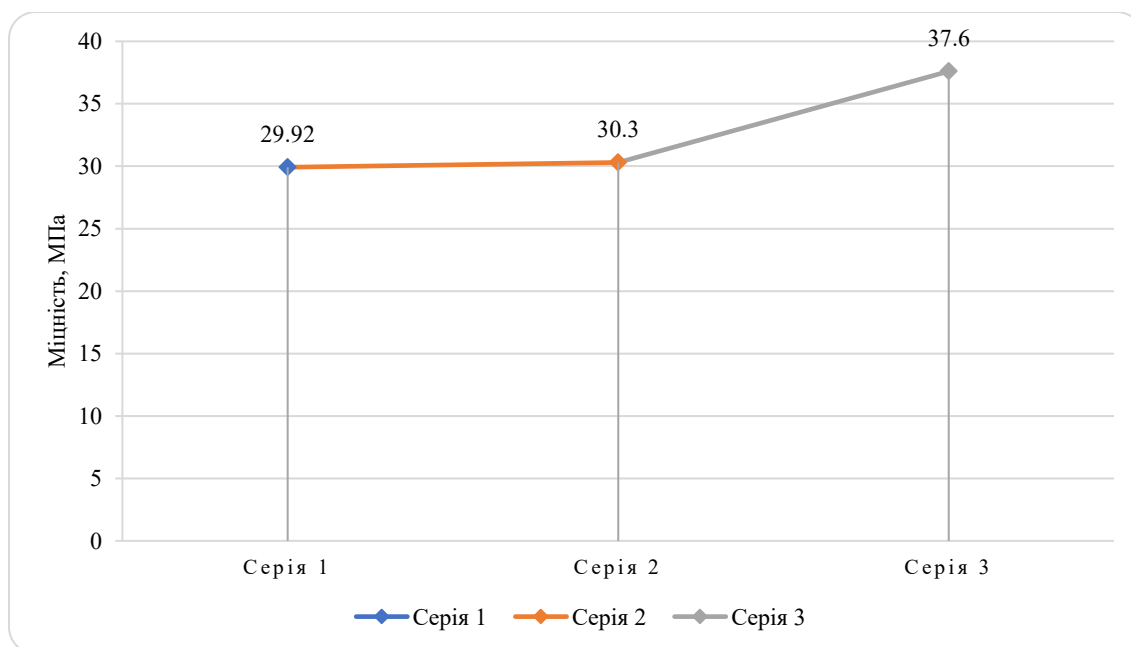


Рисунок 3.4 - Криві міцності зразків у віці 365 діб в залежності від вмісту епоксидного модифікатора

Результати випробувань бетонних зразків у віці 365 діб демонструють виражений вплив епоксидного модифікатора на формування довготривалої міцності бетону при стиску. Зафіксовані значення граничних напружень у межах 29,9–37,6 МПа свідчать про те, що введення епоксидної смоли суттєво змінює характер структуроутворення цементного каменю та впливає на щільність контактної зони між цементною матрицею й заповнювачем. Найвищий показник міцності — 37,6 МПа — дозволяє говорити про формування більш компактної та

менш дефектної внутрішньої структури бетону порівняно зі зразками, які продемонстрували нижчі результати.

Для бетонів віком 365 діб такий ефект проявляється особливо помітно. На відміну від ранніх термінів тверднення, де полімерні компоненти іноді можуть навіть дещо стримувати гідратаційні процеси через часткове блокування водообміну, у довготривалій перспективі структура цементного каменю стабілізується, а полімерна фаза починає працювати як внутрішній армувальний компонент мікрорівня. Саме тому в багатьох наукових роботах приріст міцності полімермодифікованих бетонів через 180–365 діб є більш вираженим, ніж у 28-денному віці.

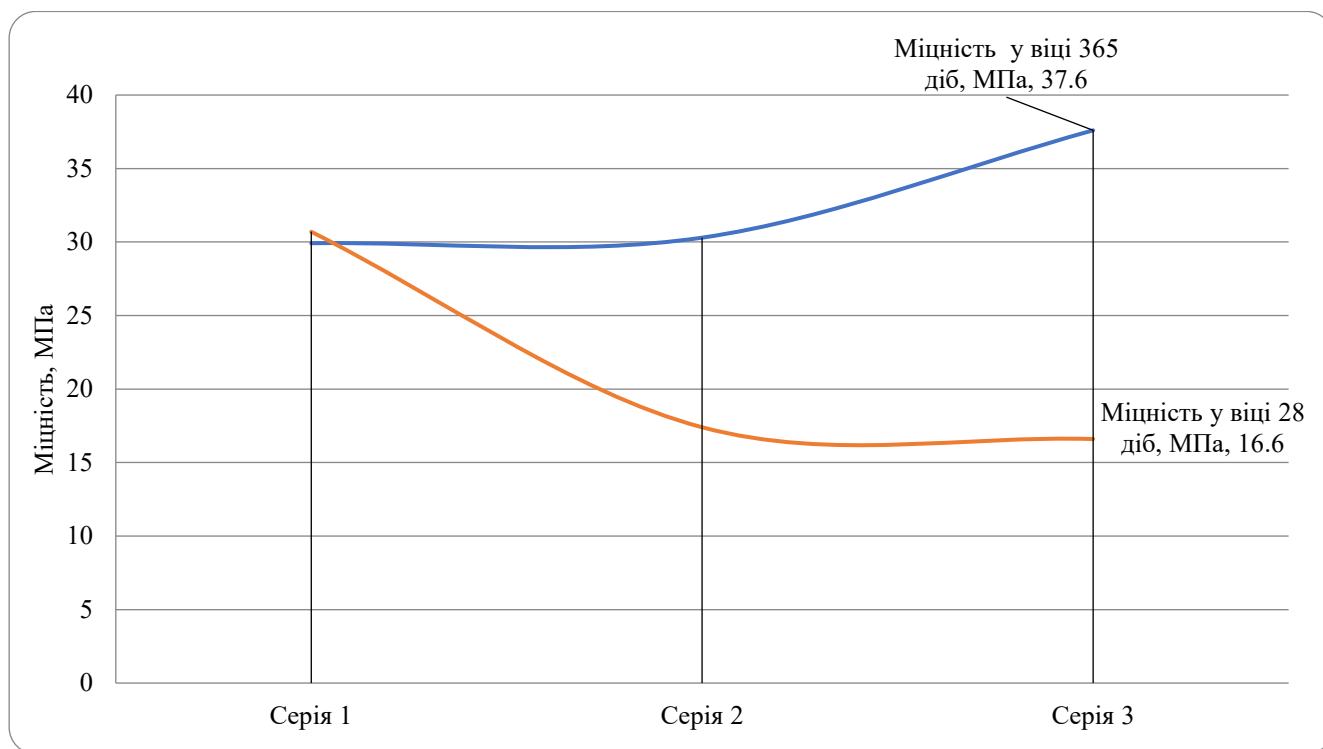


Рисунок 3.5 - Криві міцності зразків у віці 28 та 365 діб в залежності від вмісту епоксидного модифікатора

На рисунку 3.5 наведено результати експериментального дослідження зміни міцності бетонів, модифікованих епоксидною смолою, у віці 28 та 365 діб. Представлені криві дозволяють простежити вплив різних складів бетонної суміші

на формування довготривалих міцнісних характеристик матеріалу та оцінити особливості роботи епоксидного модифікатора на різних етапах тверднення.

Аналіз отриманих результатів показує, що у віці 28 діб міцність бетонів має тенденцію до зниження від першої до другої експериментальної серії з подальшою стабілізацією показників у третій серії.

Разом із тим результати випробувань у віці 365 діб демонструють суттєво іншу тенденцію. Для третьої експериментальної серії спостерігається значне підвищення міцності — до 37,6 МПа, що перевищує показники раннього віку більш ніж удвічі. Це свідчить про позитивний вплив епоксидної модифікації на процеси довготривалого структуроутворення бетону. Упродовж тривалого періоду тверднення відбувається поступове ущільнення цементної матриці, зниження капілярної пористості та формування додаткових полімерних зв'язків між компонентами бетонної суміші. У результаті структура матеріалу стає більш щільною та стійкою до розвитку внутрішніх мікрodefektів.

На відміну від традиційних бетонів, де основний набір міцності відбувається у перші 28 діб, модифіковані композиції здатні продовжувати активне структурне зміцнення протягом значно довшого часу. Це пояснюється поєднанням процесів гідратації цементу та поступового формування полімерної просторової структури всередині бетонного каменю.

3.2 Результати випробувань на водопоглинання

Окрім дослідження механічних характеристик бетону, додатково було проведено аналіз водопоглинання зразків у віці 28 та 365 діб, що дало змогу оцінити ступінь ущільнення цементної матриці та особливості формування пористої структури матеріалу. Отримані результати показали, що збільшення вмісту епоксидного модифікатора суттєво впливає на проникність бетонного композиту та його здатність поглинати вологу.

Для зразків у віці 28 діб найменші показники водопоглинання були встановлені для зразків третьої серії, до складу яких вводився найбільший об'єм

епоксидної смоли. Суха маса зразків у віці становила 7,8 кг, тоді як після водонасичення вона збільшилася лише до 7,81 кг. Незначна різниця між цими значеннями свідчить про формування щільної внутрішньої структури бетону зі зменшеною кількістю відкритих капілярів. Подібний ефект пояснюється тим, що епоксидний компонент частково заповнює поровий простір цементного каменю та ускладнює проникнення води всередину матеріалу. У результаті формується більш компактна та менш проникна структура, що позитивно впливає на довговічність бетону.

Проміжні результати були отримані для другої серії зразків, які містили помірну кількість епоксидної смоли. У цьому випадку маса бетонних кубів після висушування становила 8,20 кг, а після насичення водою збільшилася до 8,25 кг. Отримані значення вказують на часткове зниження водопоглинання порівняно з контрольними зразками, що свідчить про певне ущільнення структури цементного каменю. Водночас ступінь блокування капілярно-пористої системи залишався менш вираженим, ніж у третій експериментальній серії.

Найбільші показники водопоглинання були характерними для першої серії зразків, виготовлених без використання епоксидного модифікатора. Маса бетонних кубів збільшилася з 8,8 кг у сухому стані до 8,88 кг після водонасичення.

Для зразків віком 365 діб найнижчі показники водопоглинання були зафіксовані у третій серії з найбільшим вмістом епоксидної смоли. Маса зразків збільшилася лише з 7,75 кг до 7,80 кг після водонасичення, що свідчить про формування щільної та малопористої структури бетону. Це пояснюється частковим заповненням пор цементного каменю епоксидним компонентом, який знижує проникність матеріалу та підвищує його довговічність.

Для другої серії, що містила помірну кількість епоксидної смоли, маса зразків зросла з 8,15 кг до 8,20 кг. Отримані результати вказують на часткове ущільнення структури та зниження водопоглинання порівняно з контрольними зразками.

Найвищі показники водопоглинання були характерні для першої серії без використання епоксидного модифікатора. Після насичення водою маса бетонних

кубів збільшилася з 8,85 кг до 8,95 кг, що свідчить про більш розвинену капілярно-пористу структуру бетону.

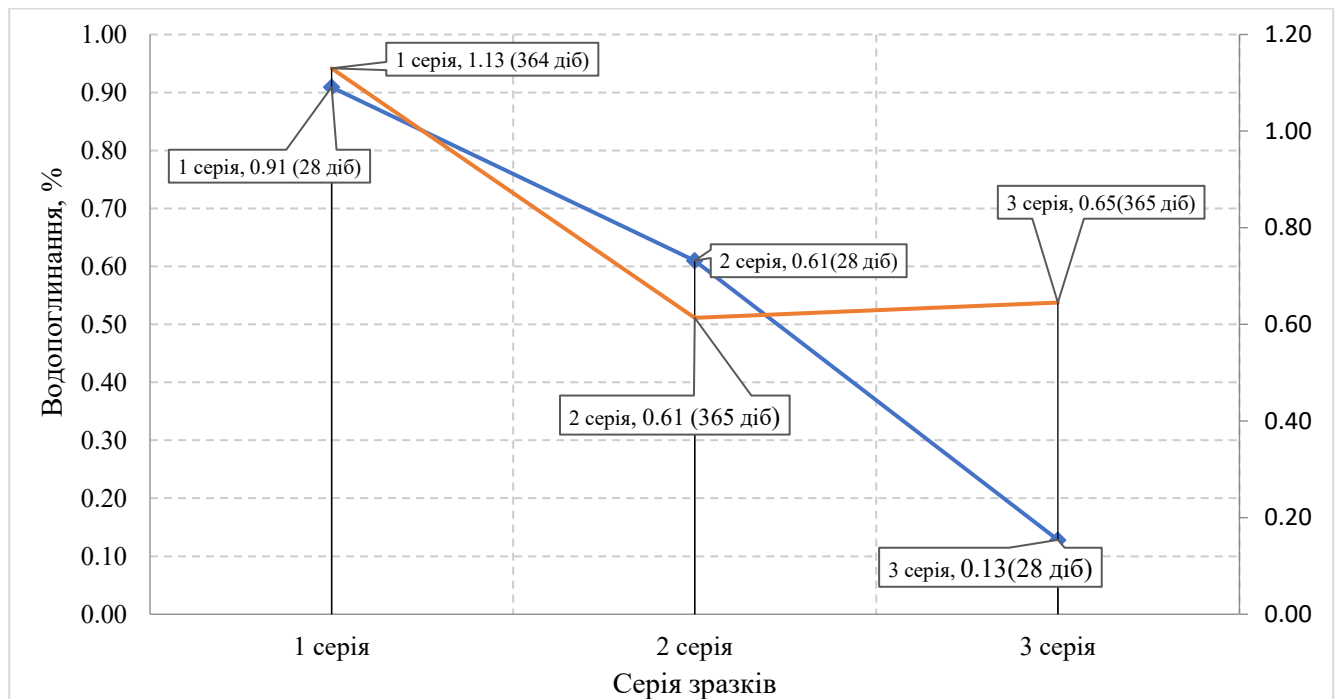


Рисунок 3.7 - Зміна маси зразків залежно від вмісту епоксидного модифікатора(по серіях)

Аналіз отриманих результатів водопоглинання показав чітку залежність між вмістом епоксидного модифікатора та здатністю бетону поглинати вологу. Відповідно до побудованого графіка встановлено, що зі збільшенням кількості епоксидної смоли спостерігається поступове зниження приросту маси зразків після водонасичення як у віці 28 днів, так і після 365 днів твердіння. Це свідчить про ущільнення структури цементного каменю та зменшення кількості відкритих капілярів у бетоні.

Найбільші показники водопоглинання були характерними для контрольної серії без використання епоксидного модифікатора. Для цих зразків зафіксовано найбільший приріст маси після насичення водою, що вказує на більш розвинену капілярно-пористу структуру матеріалу та вищу проникність бетону. Подібний характер зміни маси є типовим для традиційних цементних композитів без полімерної модифікації.

У другій серії, яка містила помірну кількість епоксидної смоли, спостерігалось помітне зниження водопоглинання порівняно з контрольними зразками. Це свідчить про часткове блокування порового простору та покращення щільності внутрішньої структури бетону. Водночас ефект ущільнення залишався менш вираженим, ніж у третій серії.

Найкращі результати були отримані для третьої серії з найбільшим вмістом епоксидного модифікатора. Для цих зразків різниця між сухою масою та масою після водонасичення була мінімальною як у 28-добовому, так і у 365-добовому віці. Отримані результати свідчать про формування більш щільної та малопористої структури бетону. Такий ефект пояснюється здатністю епоксидної смоли частково заповнювати поровий простір цементного каменю, знижуючи проникність матеріалу та ускладнюючи процес проникнення води.

Також графік демонструє, що після 365 діб твердіння всі серії характеризувалися дещо стабілізованими показниками водопоглинання. Це пов'язано з продовженням процесів гідратації цементу та додатковим ущільненням структури бетону впродовж тривалого часу експлуатаційного дозрівання.

3.3 Висновки до розділу 3

Результати експериментальних досліджень показали, що вплив епоксидного модифікатора на властивості бетону необхідно оцінювати не лише за показниками 28-добової міцності, але й з урахуванням подальшого тверднення матеріалу у віці 365 діб. Саме порівняння цих двох вікових періодів дозволило глибше простежити характер структуроутворення епоксидно-модифікованого бетону та встановити відмінності між ранніми і тривалими термінами набору міцності.

У віці 28 діб найвищі показники міцності при стиску були отримані для контрольної серії бетонів без введення епоксидної смоли. Для дослідних серій із полімерним компонентом спостерігалось зниження міцності, що може бути пов'язано з частковим порушенням водоцементного балансу та стримуванням

процесів гідратації цементу на ранньому етапі тверднення. Це свідчить про те, що в початковий період формування цементного каменю епоксидна фаза не завжди забезпечує позитивний вплив на міцність при стиску, особливо за умови значної зміни співвідношення між водою та полімерним компонентом.

Разом із тим результати випробувань у віці 365 діб засвідчили іншу тенденцію. У тривалому терміні тверднення міцність бетонних зразків перебувала в межах 29,9–37,6 МПа, що свідчить про подальшу стабілізацію структури цементного каменю та більш повне проявлення ефекту епоксидної модифікації. Найвищий показник міцності 37,6 МПа вказує на формування щільнішої та менш дефектної внутрішньої структури бетону, у якій полімерна фаза може виконувати роль додаткового мікроструктурного компонента, що покращує зв'язки між окремими елементами цементної матриці.

Порівняння результатів у віці 28 і 365 діб дає підстави стверджувати, що епоксидна модифікація має відкладений ефект. Якщо в 28-добовому віці введення епоксидної смоли могло знижувати міцність через вплив на гідратацію цементу, то після 365 діб структура матеріалу ставала більш стабільною, а полімерна складова починала позитивніше впливати на роботу бетонного композиту. Такий результат свідчить про те, що оцінювання ефективності епоксидних добавок лише за стандартною 28-добовою міцністю є недостатнім, оскільки не відображає повною мірою довготривалих змін у структурі матеріалу.

Результати визначення водопоглинання також підтвердили суттєвий вплив епоксидного модифікатора на структуру бетону. Найбільші показники водопоглинання були характерними для контрольної серії, тоді як у другій і третій серіях спостерігалось поступове зменшення здатності зразків до поглинання вологи. Найкращі результати були отримані для третьої серії з найбільшим вмістом епоксидної смоли, де різниця між сухою масою та масою після водонасичення була мінімальною як у віці 28 діб, так і у віці 365 діб. Це свідчить про формування щільнішої, менш проникної та менш капілярно відкритої структури бетону.

Окремо слід відзначити, що після 365 діб тверднення показники водопоглинання всіх серій мали більш стабілізований характер. Це можна пояснити подальшим розвитком процесів структуроутворення цементного каменю, ущільненням порового простору та поступовим зменшенням відкритої капілярної проникності. Для епоксидно-модифікованих зразків цей ефект був більш вираженим, оскільки полімерна складова частково блокувала пори та ускладнювала проникнення води у внутрішню структуру матеріалу.

Таким чином, результати досліджень показали, що вплив епоксидної смоли на бетон має комплексний і часово залежний характер. У віці 28 діб модифіковані серії поступалися контрольному бетону за міцністю при стиску, однак у віці 365 діб проявлялося покращення довготривалих міцнісних характеристик та стабілізація структури матеріалу. Водночас за показниками водопоглинання епоксидна модифікація мала переважно позитивний ефект уже на ранньому етапі й зберігала його після тривалого тверднення. Отримані результати підтверджують доцільність подальшої оптимізації складів епоксидно-модифікованих бетонів із урахуванням не лише 28-добової міцності, але й показників довготривалого тверднення, водопоглинання та потенційної довговічності матеріалу.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

4.1.1 Інженерні рішення з охорони праці

При виконанні будівельно-монтажних робіт необхідно дотримуватись вимог чинної системи охорони праці (трудове законодавство, виробнича санітарія та техніка безпеки) забезпечує належні умови праці робітникам-будівельникам, підвищення культури виробництва, безпеку робіт та їх полегшення, що сприяє підвищенню продуктивності праці. Створення безпечних умов праці у будівництві тісно пов'язане з технологією та організацією виробництва. Відповідальність за безпеку робіт покладено у законодавчому порядку на технічних керівників будівель – головних інженерів та інженерів з охорони праці, виробників робіт та будівельних майстрів. Керівники будівництва зобов'язані організувати планування заходів з охорони праці та протипожежної техніки та забезпечити проведення цих заходів у встановлені терміни. Поліпшення організації виробництва, створення на будівельному майданчику умов праці, що усувають виробничий травматизм, професійні захворювання та забезпечують нормальні санітарно-побутові умови – одне з найважливіших завдань, від успішного вирішення якого залежить подальше підвищення продуктивності праці на забудовах.

До обов'язків адміністрації будівельних організацій з охорони праці входять:

- дотримання правил охорони праці, здійснення заходів з техніки безпеки та виробничої санітарії;
- розробка перспективних планів та угод колективних договорів щодо покращення та оздоровлення умов праці;
- забезпечення працюючих спецодягом, спецвзуттям, засобами індивідуального захисту;
- проведення інструктажів та навчання робочих правил техніки безпеки;

- організація пропаганди безпечних методів праці, забезпечення будівельних об'єктів плакатами, запобіжними написами тощо;
- організація навчання та щорічної перевірки знань, правил та норм охорони праці інженерно-технічного персоналу;
- проведення медичних оглядів осіб, зайнятих на роботах із підвищеною небезпекою та шкідливими умовами;
- розслідування всіх нещасних випадків та профзахворювань, що сталися на виробництві, а також їх облік та аналіз;
- ведення документації та перевірка встановленої звітності з охорони праці;
- видання наказів та розпоряджень з питань охорони праці.

Загальне керівництво робіт з техніки безпеки та виробничої санітарії, а також відповідальність за її стан покладається на керівників (начальників та головних інженерів) будівельних організацій.

4.1.2 Техніка безпеки під час експлуатації будівельних машин

Сучасне технологічне обладнання розташовується на підприємствах із виробництва будівельних виробів і конструкцій. Також такі підприємства забезпечені механізованими інструментами. Щорічно випускається нове обладнання, зібране за сучасними технологіями, але при цьому першочерговим завданням виявляється забезпечення безпечної експлуатації машин. Обладнання підприємств характеризують як засоби підвищеної небезпеки. Найнебезпечнішими, серед великої кількості машин і механізмів, є підйомно-транспортні, дорожньо-будівельні та землерийні засоби, а також обладнання для виробництва будівельних матеріалів.

Близько 25% нещасних випадків виробничого травматизму є наслідком експлуатації будівельних машин і механізмів, про це свідчать статистичні дані будівельних підприємств. Особливо небезпечними є такі процеси, як вплив механічної сили (травмування робітників рухомими частинами машини), дія

електричного струму, шуми і вібрації, забрудненість повітря на робочому місці, теплове випромінювання.

Джерелами таких наслідків виявляється не тільки поведінка робітників, яка порушує техніку безпеки і є неорганізованою, а й також конструктивне недопрацювання механізмів.

У процесі проєктування будівельних машин застосовують спеціальні пристрої, які гарантують безпеку обладнання під час аварійної ситуації: непередбачувану появу небезпеки. Пристрої безпеки класифікують таким чином: сигнальні, блокуючі, огорожувальні, гальмівні.

- у разі виникнення небезпечної ситуації робітників інформують за допомогою сигнальних пристроїв: світла або звуку.

- у тому випадку, коли робітник потрапляє в небезпечну зону або обладнання виходить з ладу, блокувальні пристрої припиняють роботу машини.

- щоб уникнути проникнення робітників на небезпечну ділянку, використовують огорожувальні пристрої.

4.1.3 Висновки до підрозділу 4.1

У межах підрозділу було розглянуто основні вимоги охорони праці під час виконання експериментальних досліджень бетонних зразків та експлуатації лабораторного обладнання. Встановлено, що проведення випробувань бетонів пов'язане з впливом комплексу потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких основними є підвищені механічні навантаження, робота з електрифікованим обладнанням, використання хімічних компонентів та можливість травмування під час приготування й випробування бетонних сумішей.

Визначено, що особливу увагу необхідно приділяти безпечній експлуатації бетонозмішувачів, вібростолів та гідравлічних пресів, оскільки робота такого обладнання супроводжується дією рухомих елементів, вібраційних навантажень та високих стискуючих зусиль. Дотримання вимог техніки безпеки, справність обладнання, наявність захисних елементів та проведення періодичного технічного

контролю є необхідними умовами забезпечення безпечного проведення експериментальних робіт.

У процесі дослідження встановлено, що використання епоксидних компонентів додатково підвищує вимоги до організації безпечних умов праці. Епоксидні смоли та супутні компоненти можуть чинити подразнювальний вплив на шкіру, органи дихання та слизові оболонки, тому виконання робіт із полімерними матеріалами повинно здійснюватися із застосуванням засобів індивідуального захисту, вентиляції приміщень та дотриманням санітарно-гігієнічних вимог.

Окрему увагу приділено питанням електробезпеки та забезпечення стійкої роботи лабораторного обладнання. Встановлено, що надійне заземлення електроустановок, справність кабельних мереж, відсутність пошкоджень ізоляції та дотримання вимог експлуатації електрообладнання є важливими чинниками запобігання аварійним ситуаціям і виробничому травматизму..

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.2.1 Законодавча база України

Основу нормативно-правової бази в сфері цивільної оборони, захисту населення і території від наслідків надзвичайних ситуацій складають: Кодекс цивільного захисту України, закони «Про війська цивільної оборони», «Про аварійно-рятувальні служби»; укази Президента України «Про Концепції захисту населення і територій у випадку загрози і виникнення НС» і Положення «Про міністерство України з питань НС і в справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи», постанови Кабінету Міністрів України про затвердження «Положення про цивільну оборону України», «Про єдину державну систему попередження і реагування на НС техногенного і природного характерів», «Положення про керування з питань НС і цивільного захисту населення обласних і міських державних адміністрацій» та інші нормативні акти.

4.2.2 Стійкість споруди від ударної хвилі

Нові об'єкти народного господарства повинні будуватися з урахування вимог, виконання яких сприяє підвищенню сталості об'єкта. Основні з них такі:

1. Будівлі і споруди на об'єкті необхідно розташовувати розосереджено. Відстані між будівлями повинні забезпечувати протипожежні розриви. При наявності таких розривів виключається можливість перенесення вогню з однієї будівлі на іншу, навіть якщо пожежу не гасять.

Ширина протипожежного розриву L_p м визначається за формулою:

$$L_p = H_1 + H_2 + (1.5 \dots 2.0), \text{ де } H_1 \text{ і } H_2 \text{ — висоти сусідніх будівель, м.}$$

Будівлі адміністративно господарського та обслуговуючого призначення повинні розташовуватися окремо від основних цехів.

2. Найважливіші виробничі будівлі слід будувати заглибленими або пониженої висотності, прямокутної форми у плані. Це зменшує парусність будівель і збільшує опірність їх ударній хвилі ядерного вибуху. Належну стійкість

до впливу ударної хвилі мають залізобетонні будівлі з металевими каркасами в бетонній опалубці .

Для підвищення стійкості до світлового випромінення у будівлях та спорудах, що будуються, повинні застосовуватися вогнетривкі конструкції, а також вогнетривка обробка елементів будівлі, які горять. У кам'яних будівлях перекриття повинні бути виготовлені з армованого бетону або виконані з бетонних плит. Великі будівлі повинні розділятися на секції вогнетривкими стінами (брандмауерами). У ряді випадків при проектуванні та будівництві промислових будівель і споруд має бути передбачена можливість герметизації приміщень від проникнення радіоактивного пилу. Це особливо важливо для підприємств харчової промисловості і продовольчих складів.

3. У складських приміщеннях повинна бути мінімальна кількість вікон і дверей. Складські приміщення для зберігання легкозаймистих речовин (бензин, гас, нафта, мазут) повинні розташовуватися в окремих блоках заглибленого або напівзаглибленого типу біля меж території об'єкта чи поза нею.

4. Деякі унікальні види технологічного обладнання доцільно розміщувати у найміцніших спорудах (підвалах, підземних приміщеннях) або у будівлях з легких вогнетривких конструкцій павільйонного типу, під накриттям чи без нього. Це обумовлюється тим, що у багатьох випадках обладнання може витримати набагато більший тиск ударної хвилі, ніж будівлі, в яких воно знаходиться, а при зруйнуванні будівель в результаті падіння конструкцій встановлене в них обладнання виходитиме з ладу.

5. На підприємствах, що виробляють або використовують сильнодіючі отруйні та вибухонебезпечні речовини, при будівництві і реконструкції необхідно передбачати захист ємностей та комунікацій від зруйнування ударною хвилею чи конструкціями, що падають, а також заходи, що виключають розливання отруйних речовин і вибухонебезпечних рідин.

6. Душові приміщення необхідно проектувати з урахуванням використання їх для санітарної обробки людей, а місця для миття машин — з урахуванням використання їх для знезараження автотранспорту.

7. Шляхи на території об'єкта повинні бути з твердим покриттям і забезпечувати зручне і найкоротше сполучення між виробничими будівлями, спорудами і складами; в'їздів на територію об'єкта має бути не менше двох з різних напрямків. Внутрізаводські залізничні шляхи повинні забезпечувати найпростішу схему руху, займати мінімальну площу території об'єкта та мати обгінні ділянки. Вводи залізничних ліній в цехи повинні бути, як правило, тупикові.

8. Системи побутової та виробничої каналізації повинні мати не менше двох випусків у міські каналізаційні мережі та пристрої для аварійних скидів у котловани, яри, траншеї тощо.

Дія ударної хвилі на об'єкт характеризується складним комплексом навантажень: надлишковим тиском, тиском відбиття, тиском швидкісного напору, тиском затікання, навантаження від сейсмовибухових хвиль і т.д. Значення їх залежить в основному від виду і потужності вибуху, відстані до об'єкта, конструкції і розмірів елементів об'єкта, орієнтації щодо епіцентру вибуху, місця розташування будинків і споруджень у загальній забудові об'єкта й окремих елементів виробництва в приміщеннях будинків, рельєфу місцевості і деяких інших факторів. Врахувати їх у сукупності для кожного елемента об'єкта, як правило, неможливо. Тому можливість елементів опиратися дії ударної хвилі характеризують тільки надлишковим тиском у її фронті, вважаючи, що масштаби руйнувань не залежать від потужності і висоти найбільш ймовірних ядерних вибухів.

Для визначення ступеня руйнувань чи ушкоджень:

- вивчають вихідні дані і розраховують параметри ударної хвилі на відповідних відстанях;
- для розрахованих значень надлишкових тисків оцінюють ступінь руйнування розглянутих елементів;
- оцінюють можливість виникнення вторинних вражаючих факторів;
- з огляду на ступінь руйнувань найслабших елементів об'єкта, визначають ступінь руйнування об'єкта в цілому.

Вихідними даними для оцінки фізичної стійкості є: конструктивні особливості елемента, його форма, вага, габарити, характеристики міцності. Оцінка ступеня руйнувань будинків і споруд, сховищ і ПРУ, енергетичного устаткування і мереж, верстатного і технологічного устаткування, вимірювальної апаратури, засобів зв'язку й оповіщення, транспортних та інших засобів може здійснюватися або методом порівняння наявних довідкових даних для розглянутого виду чи аналогічного йому елемента, або методом розрахунку впливу ударних навантажень і сил зсуву на елемент.

Для порівняльної оцінки необхідно мати відповідні таблиці можливих руйнувань елементів об'єкта в залежності від надлишкового тиску у фронті ударної хвилі: будинків, споруд, транспорту, устаткування, енергетичних споруд і мереж. Ці таблиці складаються на основі статистичних даних, отриманих при аналізі руйнувань у Хіросімі й Нагасакі та при проведенні випробувальних ядерних вибухів на полігонах, і можуть поповнюватися результатами розрахунків при конструюванні нових елементів. Метод розрахунку передбачає визначення динамічних навантажень, створюваних надлишковим тиском у фронті ударної хвилі, і реакції елемента на ці навантаження. Вихідними даними при використанні цього методу є: надлишковий тиск у фронті ударної хвилі і характер його зміни в часі (протягом фази стискання), тривалість фази стискання і швидкість руху фронту ударної хвилі. У більшості випадків дію ударної хвилі оцінюють питомим імпульсом — добутком надлишкового тиску на час його дії. Оскільки ΔP_ϕ залежить не тільки від часу, а й від відстані до епіцентру, і від потужності джерела ПУХ, розрахунок імпульсу з використанням інтегрального числення ускладнений. Тому звичайно використовують кусково-лінійну апроксимацію кривої ΔP_ϕ як функції часу.

Таким чином, дія ударної хвилі на об'єкт характеризується складним комплексом навантажень: надлишковим тиском, тиском відбиття, тиском швидкісного напору, тиском затікання, навантаження від сейсмовибухових хвиль і т.д. Значення їх залежить в основному від виду і потужності вибуху, відстані до об'єкта, конструкції і розмірів елементів об'єкта, орієнтації щодо епіцентру вибуху, місця розташування будинків і споруджень у загальній забудові об'єкта й

окремих елементів виробництва в приміщеннях будинків, рельєфу місцевості і деяких інших факторів. Врахувати їх у сукупності для кожного елемента об'єкта, як правило, неможливо. Однак ряд таких заходів як розосередження нових будівель та споруд, забезпечення протипожежних розривів, наявність в будівлі залізобетонного каркасу та шляхів із твердим покриттям, запроектовані брандмауери істотно підвищують шанси людей вижити під час катастрофи, а також зменшують ризик отримання травм чи пошкоджень, сприяють швидшому доступу рятувальних служб до місця трагедії.

4.2.3 Розробка заходів щодо підвищення стійкості промислового об'єкту

Оцінювання стійкості роботи об'єкту – це всебічне вивчення підприємства з погляду здатності його протистояти впливу вражаючих факторів ядерного вибуху, відновлення виробництва при одержанні середніх і слабких руйнувань.

Мета дослідження складається в тому, щоб виявити уразливі місця в роботі об'єкту у воєнний час і виробити найбільш ефективні пропозиції і рекомендації, спрямовані на підвищення його стійкості. Надалі ці рекомендації включаються в план заходів щодо підвищення стійкості роботи об'єкту, що і реалізується.

Дослідження стійкості підприємств проводиться силами інженерно-технічного персоналу із залученням фахівців науково-дослідних і проектних організацій, пов'язаних із даним підприємством. Організатором і керівником дослідження є керівник підприємства – начальник ЦО об'єкту.

Весь процес планування і проведення дослідження можна розділити на три етапи: перший – підготовчий, другий – оцінка стійкості роботи об'єкту в умовах воєнного часу, третій – розробка заходів, що підвищують стійкість роботи об'єкту.

На першому етапі розробляються керівні документи, визначається склад учасників дослідження й організується їхня підготовка.

Основними документами для організації дослідження стійкості роботи об'єкту є: наказ керівника підприємства; календарний план основних заходів щодо підготовки до проведення дослідження; план проведення дослідження.

Наказ директора підприємства (керівника дослідження) розробляється на підставі вказівок старшого начальника з урахуванням особливостей і конкретних умов, пов'язаних із виробничою діяльністю об'єкту. У наказі вказуються: мета і задачі майбутнього дослідження, час проведення робіт, склад учасників і задачі дослідницьких груп, терміни готовності звітної документації.

Календарний план підготовки до проведення дослідження визначає основні заходи і терміни їхнього проведення, відповідальних виконавців, сили і засоби, які беруть участь у поставлених задачах.

План проведення дослідження стійкості роботи об'єкту є основним документом, що визначає зміст роботи керівника дослідження і дослідницьких груп головних фахівців. У плані вказуються: тема, мета і тривалість дослідження, склад слідчих груп і зміст їхньої роботи, порядок дослідження. Тривалість дослідження встановлюється в залежності від обсягу робіт і підготовленості учасників, залучених до виконання задач, і може складати два – три місяці.

Залежно від складу основних виробничо-технічних служб на об'єкті можуть створюватися такі дослідницькі групи:

- начальника відділу капітального будівництва;
- головного енергетика;
- головного технолога;
- головного механіка;
- відділу матеріально-технічного постачання та ін.

Крім того, створюється група штабу ЦО об'єкту, в яку входять начальники служб оповіщення і зв'язку, протирадіаційного і протихімічного захисту сховищ і ПРУ, медична, охорони суспільного порядку, матеріально-технічного постачання.

Для узагальнення отриманих результатів і подання загальних пропозицій створюється група керівника дослідження на чолі з головним інженером чи начальником виробничого відділу. Чисельність дослідницьких груп залежить від обсягу розв'язуваних задач, специфіки виробництва і може складати 5 – 10 чоловік. Притягнуті до досліджень представники зовнішніх організацій беруть участь у роботі відповідних груп.

Підвищення стійкості об'єкта досягається посиленням найбільш слабких (вражаючих) елементів і ділянок об'єкту. Для цього на кожному ОНГ завчасно на основі досліджень планують і проводять відповідні організаційні й інженерно-технічні заходи. Досягнення науки і техніки дозволяють реалізувати такі рішення, при яких підприємство буде стійке до впливу дуже значних надлишкових тисків, однак це пов'язано з великими витратами засобів і матеріалів і може бути виправдано лише при захисті унікальних, особливо важливих елементів об'єкту. Заходи будуть економічно обґрунтовані, якщо вони максимально узгоджені із завданнями, які розв'язуються в мирний час для забезпечення безаварійної роботи, поліпшення умов праці, удосконалювання виробничого процесу. Особливо велике значення має розробка інженерно-технічних заходів при новому будівництві, бо у процесі проектування, як відзначалося раніше, у багатьох випадках можна домогтися логічного поєднання загальних інженерних рішень із захисними заходами ЦО, що знизить витрати на їх реалізацію.

4.2.4 Висновки до підрозділу 4.2

У підрозділі було розглянуто основні аспекти забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях та питання підвищення стійкості будівельних об'єктів до дії небезпечних факторів. Проведений аналіз законодавчої та нормативної бази України показав, що забезпечення цивільного захисту та стійкості споруд є важливою складовою сучасної системи безпеки будівельних об'єктів, особливо в умовах підвищених техногенних і воєнних ризиків.

У результаті було оцінено вплив ударної хвилі на конструктивні елементи споруди та визначено основні фактори, які впливають на її стійкість. Встановлено, що здатність будівлі протистояти динамічним навантаженням значною мірою залежить від конструктивної схеми, жорсткості несучих елементів, якості будівельних матеріалів та рівня просторової стійкості конструкції.

Проведений аналіз показав, що важливим напрямом підвищення стійкості об'єктів є впровадження комплексу інженерно-технічних заходів, спрямованих на

зменшення можливих пошкоджень конструкцій та забезпечення збереження їх несучої здатності в умовах надзвичайних ситуацій. До таких заходів належать підсилення окремих конструктивних елементів, забезпечення резервування критично важливих систем, підвищення жорсткості конструктивної схеми та використання матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками.

Окрему увагу приділено ролі сучасних будівельних матеріалів у забезпеченні довговічності та надійності конструкцій. Встановлено, що підвищення щільності бетонного композиту, зниження його водопоглинання та покращення структури цементного каменю можуть позитивно впливати на загальну стійкість конструкцій до зовнішніх впливів і сприяти підвищенню довговічності будівельних елементів у складних умовах експлуатації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було проведено комплексне експериментальне дослідження впливу епоксидної модифікації на міцність та водопоглинання бетонів у різні терміни тверднення. Проведені дослідження дозволили встановити особливості зміни фізико-механічних характеристик бетонного композиту при введенні епоксидної смоли ED-20, а також оцінити характер впливу полімерного компоненту на процеси формування структури цементного каменю у віці 28 та 365 діб.

У процесі аналізу зарубіжних і вітчизняних наукових джерел встановлено, що використання епоксидних модифікаторів є одним із перспективних напрямів удосконалення бетонних композитів. Наукові дослідження підтверджують, що епоксидні компоненти здатні знижувати проникність бетону, покращувати водостійкість, підвищувати щільність структури цементного каменю та позитивно впливати на довговічність матеріалу. Водночас встановлено недостатню кількість досліджень, присвячених оцінюванню впливу епоксидної смоли на міцність і водопоглинання цементних бетонів у тривалих термінах тверднення, що підтвердило актуальність виконаної роботи.

Визначено, що епоксидна модифікація суттєво впливає на процеси структуроутворення бетонного композиту. Введення епоксидної смоли змінює співвідношення між водною та полімерною фазами бетонної суміші, впливає на інтенсивність гідратації цементу, характер формування порового простору та умови взаємодії між цементним каменем і заповнювачами. Встановлено, що полімерна складова сприяє ущільненню структури бетону, однак при значному вмісті епоксидного компоненту може частково обмежувати повноцінний розвиток цементної матриці.

У межах дослідження було розроблено три серії бетонних сумішей із різним співвідношенням води та епоксидної смоли ED-20. Контрольна серія виготовлялася за традиційною технологією без полімерного модифікатора, тоді як у дослідних серіях частина води замішування замінювалася епоксидною смолою.

Використання незмінного співвідношення цементу, піску та щебеню для всіх серій дозволило забезпечити коректність порівняльного аналізу та оцінити вплив саме епоксидної модифікації на властивості бетонного композиту.

За результатами випробувань бетонних зразків на стиск у віці 28 діб встановлено, що контрольна серія продемонструвала найвищі показники міцності. Для серій із введенням епоксидної смоли спостерігалось зниження середньої міцності при стиску, що свідчить про негативний вплив значного заміщення водної фази полімерним компонентом на процеси раннього тверднення цементного каменю. Отримані результати підтвердили, що на початковому етапі тверднення надмірний вміст епоксидної смоли може стримувати повноцінний перебіг процесів гідратації цементу та формування щільної цементної структури.

Результати випробувань бетонних зразків у віці 365 діб показали, що в умовах тривалого тверднення структура епоксидно-модифікованих бетонів продовжувала формуватися та стабілізуватися. Міцність бетонів у віці 365 діб перебувала в межах 29,9–37,6 МПа, що свідчить про подальший розвиток структури цементного каменю та часткову стабілізацію фізико-механічних характеристик матеріалу. Встановлено, що довготривале тверднення дозволяє більш повно оцінити ефективність епоксидної модифікації, оскільки вплив полімерної складової у тривалому часовому інтервалі проявляється інакше, ніж у стандартному 28-добовому віці.

Дослідження водопоглинання бетонних зразків у віці 28 та 365 діб показали, що введення епоксидної смоли сприяє зменшенню здатності бетону поглинати вологу. Найменші показники водопоглинання були характерні для серій із більшим вмістом полімерного компоненту. Встановлено, що після 365 діб тверднення ефект ущільнення структури ставав більш вираженим, а різниця між сухою масою та масою після водонасичення зменшувалася. Це свідчить про формування більш щільної та менш проникної структури цементного каменю, у якій епоксидна смола частково блокує капілярний поровий простір.

Проведений порівняльний аналіз результатів дослідження дозволив встановити, що вплив епоксидної модифікації на бетон має комплексний і часово

залежний характер. У віці 28 діб введення епоксидної смоли переважно супроводжувалося зниженням міцності при стиску, тоді як у віці 365 діб спостерігалася стабілізація структури матеріалу та більш виражений ефект ущільнення цементного каменю. При цьому позитивний вплив епоксидного модифікатора на зниження водопоглинання спостерігався як у ранньому, так і у тривалому терміні тверднення.

На основі отриманих результатів сформовано практичні рекомендації щодо використання епоксидних компонентів у технології бетонів. Встановлено, що застосування епоксидної модифікації є доцільним у випадках, коли основними вимогами до матеріалу є зниження водопоглинання, підвищення щільності структури та покращення довговічності бетонного композиту. При цьому підбір складу бетонної суміші повинен здійснюватися з урахуванням необхідного балансу між міцністю бетону у ранньому віці та його довготривалими експлуатаційними характеристиками.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Ковальчук Я. О. Методичний посібник для виконання кваліфікаційної роботи магістра за спеціальністю 192 “Будівництво та цивільна інженерія” / Я. О. Ковальчук, Г. М. Крамар, О. М. Мещерякова. - Тернопіль: ТНТУ, 2020. – 56 с.
2. Zhang Z., Zhang F., Wu C., Chen Y. Experimental Study on the Performance of Sustainable Epoxy Resin-Modified Concrete Under Coupled Salt Corrosion and Freeze–Thaw Cycles // Sustainability. 2025. Vol. 17(13). P. 6186.
3. Rahman M. M., Galib M. O. F. Improvement of Concrete Durability and Strength with Epoxy Resin Concrete // European Journal of Theoretical and Applied Sciences. 2024. Vol. 2(1). P. 112–121.
4. Awodiji C. T., Olatunji S. O., Akinpelu M. A. Effect of Epoxy Resin on the Strength Property of Portland Cement Concrete // Saudi Journal of Civil Engineering. 2024. Vol. 8(8). P. 179–185.
5. Rahman M. M., Islam M. A. Deformation Behavior of Epoxy-Modified High Strength Concrete under Uniaxial and Repeated Compression // Asian Journal of Civil Engineering. 2022. Vol. 23(2). P. 331–344.
6. Chen Z., Liu Y., Wang H. Study on the Performance of Composite-Modified Epoxy Resin Concrete under Aggressive Environment Conditions // Materials. 2025. Vol. 18(4). P. 1120.
7. Lv J., Zhao Y., Xu P. Study on Self-Healing Effect of Concrete Based on Epoxy Resin Adhesive // Materials. 2025. Vol. 18(6). P. 1450.
8. Szewczak A., Kamiński M., Glinicki M. Adhesion of Modified Epoxy Resin to a Concrete Surface // Materials. 2022. Vol. 15(24). P. 8961.
9. Onyshchenko A., Petrenko D., Kovaliova O. Evaluation of Epoxy-Bitumen Composite for Its Application in Asphalt Concrete Thin-Layer Pavements on Highway Bridges // Roads and Bridges. 2022. Vol. 22(3). P. 45–57.
10. Shao Meiyu. Modified Cast Asphalt Concrete and Epoxy Asphalt Concrete : dissertation. Kyiv, 2024. 215 p.

11. Dong M., Zhang H., Tzounis L., Santagiuliana G., Bilotti E., Papageorgiou D. G. Multifunctional Epoxy Nanocomposites Reinforced by Two-Dimensional Materials: A Review // *Nano Materials Science*. 2021. Vol. 3(3). P. 223–245.
12. Patil S. U., Shah S. P., Olaya M. N., Deshpande P. P., Maiaru M., Odegard G. M. Molecular Dynamics Study to Predict Thermo-Mechanical Properties of Epoxy as a Function of Crosslinking Density // *Polymer*. 2021. Vol. 230. P. 124–136.
13. Wan X., Demir B., An M., Walsh T. R., Yang N. Thermal Conductivities and Mechanical Properties of Epoxy Resin as a Function of the Degree of Cross-Linking // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 165. P. 120–134.
14. Li S., Yu X., Bao H., Yang N. High Thermal Conductivity of Bulk Epoxy Resin by Bottom-Up Parallel-Linking and Strain: A Molecular Dynamics Study // *Journal of Applied Physics*. 2018. Vol. 123(8). P. 085103.
15. Ferdous W., Manalo A., Wong H., Abousnina R., AlAjarmeh O. Advances in Polymer Composites for Civil Engineering Applications // *Polymers*. 2020. Vol. 12(12). P. 2750.
16. Al-Ghasham T. S., Mahmood A. H., Rashid K. A. Water Absorption and Durability of Epoxy Resin Modified Concrete // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 301. P. 124–138.
17. Chandra S., Ohama Y. *Polymers in Concrete*. Boca Raton : CRC Press, 1994. 172 p.
18. Beeldens A., Ohama Y. Durability of Polymer Cement Concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2005. Vol. 17(5). P. 631–640.
19. Fowler D. W. *Polymers in Concrete: A Vision for the 21st Century* // *Cement and Concrete Composites*. 1999. Vol. 21(5–6). P. 449–452.
20. Ohama Y. *Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars: Properties and Process Technology*. Park Ridge : Noyes Publications, 1995. 248 p.
21. Wang R., Li X., Wang P. Influence of Epoxy Polymer on the Microstructure and Mechanical Properties of Cement-Based Composites // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 247. P. 118–130.

22. Mindess S., Young J. F., Darwin D. Concrete. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2003. 644 p.
23. Neville A. M. Properties of Concrete. 5th ed. London : Pearson Education, 2011. 872 p.
24. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. 4th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 704 p.
25. ACI Committee 548. Guide for the Use of Polymers in Concrete // American Concrete Institute. Farmington Hills, 2003. 78 p.
26. Ohama Y. Recent Progress in Concrete–Polymer Composites // Advanced Cement Based Materials. 1997. Vol. 5(2). P. 31–40.
27. Данченко Ю. М., Обіженко Т. М., Уманська Т. І., Барабаш О. С. Епоксидні матеріали у будівництві, архітектурі і реставрації: проблеми і перспективи (огляд) // Науковий вісник будівництва. 2018. Т. 94, № 4. С. 160–170.
28. Струмскас О. В., Данченко Ю. М. Реставрація і відновлення натурального каменю з використанням епоксидних матеріалів // Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Об'єднані наукою: перспективи міждисциплінарних досліджень». Київ, 2019. С. 81–83.
29. Данченко Ю. М., Струмскас О. В., Обіженко Т. М., Уманська Т. І. Епоксидні полімерні матеріали з підвищеною стійкістю до водних розчинів для реставрації натурального каменю // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2019. № 29(1). С. 100–112.
30. Данченко Ю. М. Структурирование эпоксидной смолы в присутствии неионогенного поверхностно-активного вещества // Строительные материалы и изделия. 2017. № 5–6(96). С. 70–72.
31. Данченко Ю. М., Обіженко Т. М., Качоманова М. П., Тесленко М. Г. Вплив кислотно-основних властивостей оксидних наповнювачів на вільну поверхневу енергію епоксиолімерних матеріалів // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. Вип. 178. С. 115–122.

32. Danchenko Yu., Andronov V., Teslenko M., Permiakov V., Rybka E., Meleshchenko R., Kosse A. Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, Iss. 12(91). P. 9–17.
33. Danchenko Yu., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. Investigation into acid-basic equilibrium on the surface of oxides with various chemical nature // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4, Iss. 12(88). P. 17–25.
34. Данченко Ю. М., Попов Ю. В., Барабаш О. С. Вплив наповнювачів на структуру та характеристики епоксикомполімерів // Вопросы химии и химической технологии. 2016. Т. 3(107). С. 53–60.
35. Гудь М. І., Гиря П. В. Властивості полімербетонів // Актуальні задачі сучасних технологій : матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів. Тернопіль : ТНТУ, 2024. С. 28.
36. Кондращенко О. В. Будівельне матеріалознавство для сучасного будівництва : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 208 с.
37. Шаповал С. В. Сучасні будівельні матеріали і технології : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 97 с.
38. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.
39. ДСТУ EN 12390-1:2024. Випробування бетону. Частина 1. Форма, розміри та інші вимоги до зразків і форм (EN 12390-1:2021, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.
40. ДСТУ EN 12390-2:2024. Випробування бетону. Частина 2. Виготовлення зразків та умови їх тверднення для випробування на міцність (EN 12390-2:2019, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.
41. ДСТУ EN 12390-3:2024. Випробування бетону. Частина 3. Міцність зразків на стиск (EN 12390-3:2019, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.
42. ДСТУ EN 12390-4:2024. Випробування бетону. Частина 4. Міцність на стиск. Технічні вимоги до випробувальних машин (EN 12390-4:2019, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.

43. Бондар, В. О., & Конончук, О. П. (2020). Дослідження впливу на міцність бетону пластифікаторів, що сповільнюють тужавіння. *Матеріали міжнародної наукової конференції „Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України “(до 175-ліття від дня народження), 52-53.*

44. Hud, M. (2026). Evaluation of physical and mechanical properties of concrete modified with epoxy resin. *Procedia Structural Integrity, 81*, 205-209.

45. Гудь, М. І., & Бехов, А. В. (2025). Дослідження міцності бетонів на основі епоксидних смол. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій “, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 76-77.*

46. Гудь, М. І., & Юркевич, О. М. (2024). Бетони на основі епоксидних смол. *Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій “, 27-27.*

47. Науково-випробувальна лабораторія будівельних матеріалів, виробів та конструкцій : вебсайт. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. URL: <https://tntu.edu.ua/?p=uk/structure/research/labs/nvlbm>

48. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

49. Методичні вказівки для написання розділу дипломного проекту з дисципліни «Охорона праці в галузі» / В. Б. Каспрук. - Тернопіль: ТНТУ, 2017. — 14 с.