

Національний університет  
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою  
Кафедра будівництва та цивільної інженерії

## **Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної магістерської роботи  
на тему:

# **«ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДНОРІДНИХ ВАЖКИХ БЕТОНІВ»**

Виконав: О.В. Климко

студент групи 601- мБТ

спеціальності 192 – будівництво та цивільна  
інженерія, ОП «Технології будівельних  
конструкцій, виробів і матеріалів»

Керівник О.М. Гукасян

Завідувач кафедри О.В. Семко

Рецензент Ю.О. Побуховська

**Полтава 2026**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 .....	5
ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....	5
1.1. Міцність бетону в конструкції .....	5
1.2 Вплив технологічних чинників на міцність конструкцій .....	8
1.2.1 Використання добавок пластифікаторів, для регулювання властивостей бетонної суміші .....	10
1.2.2 Вплив виробничих факторів на міцність бетону .....	11
1.3 Міцнісні й деформативні характеристики бетонів .....	13
1.4 Деформативні властивості бетонів .....	15
РОЗДІЛ 2_МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	18
РОЗДІЛ 3_МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	19
3.1. Планування експерименту.....	19
3.2. Конструкція та технологія виготовлення дослідних зразків.....	21
3.3 Підготовка до випробувань.....	22
3.4 Методика проведення експериментальних досліджень.....	22
РОЗДІЛ 4_ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	24
4.1 Цемент .....	24
4.2 Щебінь .....	25
4.3 Пісок .....	26
4.4 Характеристики пластифікатору .....	27
4.5 Підбір складу бетону .....	27
РОЗДІЛ 5_АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	31
5.1. Проведення експериментальних досліджень .....	31
5.1.1 Середня густина бетону.....	31
5.1.2. Міцність зразків циліндрів.....	32
5.1.3. Міцність зразків-призм з висотою ребра 400 мм.....	34
5.2. Характер руйнування та мінливість міцності експериментальних зразків.....	37
5.2.1. Результати експериментальних досліджень зразків циліндрів .....	37

5.2.2. Результати експериментальних досліджень зразків-призм висотою 400 мм	48
5.3. Співвідношення міцності зразків циліндрів та зразків призм	55
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ	57
6.1. Бетонні роботи	57
6.2. Виконання будівельних робіт	58
6.3. Вимоги до робочих місць	62
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	65

## ВСТУП

Сучасне будівництво передбачає широке використання бетонних, залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій, що являються основними факторами для детального вивчення необхідного набору характеристик інженерних будівель і споруд та їх елементів при роботі під навантаження [1, 2].

В таких конструкціях раціонально використовувати поєднання бетонів різної міцності, тобто місцеве підсилення, що може зумовити значну економію матеріалів та підвищення міцності конструкції [3].

На протязі останніх років в Україні проводяться активні наукові дослідження бетонних та залізобетонних конструкцій. Проте практично відсутні систематизовані дослідження впливу пошарового бетонування елементів. Не узагальнені експериментальні дані щодо фізико-механічних властивостей таких конструкцій, не розроблені методи їх розрахунку з урахуванням технологічних факторів. Також відсутні нормативні рекомендації щодо розрахунку бетонних елементів різних перерізів, що складаються з двох і більше шарів бетону різної міцності [4–6].

Таким чином, дослідження міцності бетонних зразків з пошаровим бетонуванням є актуальною науковою проблемою. Використання пігменту як індикатора шару бетону з пониженою міцністю дозволяє дослідити ступінь перемішування бетонної суміші при пошаровому бетонуванні та мінливість міцності по висоті елемента [7].

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1. Міцність бетону в конструкції

Проведений аналіз варіації фізико-механічних характеристик матеріалів, з яких формуються будівельні конструкції, показує, що саме бетон серед інших складових вирізняється найбільшою неоднорідністю властивостей [8]. Виявлення та коректне врахування цих особливостей є особливо важливим під час виконання ймовірнісних розрахунків роботи конструкцій і визначення показників їх надійності [9].

Фізико-механічні властивості бетону значною мірою зумовлюються його внутрішньою структурою, яка формується під впливом водоцементного відношення (В/Ц). За наявності надлишкової кількості незв'язаної води відбувається зменшення густини бетону, при цьому пористість цементного каменю може досягати близько третини його об'єму, що призводить до зниження міцності матеріалу [10, 11].

Важливою особливістю бетону є змінність його структури в часі, обумовлена перерозподілом водяного балансу, зменшенням об'єму гелю, що твердне, та розвитком більш пружних кристалічних утворень. Унаслідок цих процесів відбувається зменшення об'єму бетону, тобто усадка, інтенсивність якої залежить від виду та кількості цементу, вмісту води, а також характеристик заповнювачів [12].

Встановлено, що прикладання навантаження до бетонної суміші до завершення процесу твердіння (попередній обтиск) сприяє підвищенню міцності бетону. Експериментальні дослідження показали, що ізоляція бетонної суміші від впливу навколишнього середовища позитивно впливає на міцнісні показники, зокрема під час бетонування в оболонках або трубах [13].

Причиною зазначеного явища є відсутність вологообміну між бетонним ядром і зовнішнім середовищем. Аналогічні результати отримані в роботах,

присвячених дослідженню усадки та повзучості бетону за умов обмеженого вологообміну [14].

Оскільки бетон один із найбільш мінливих будівельних матеріалів, виробничі фактори, що впливають на величину мінливості міцності бетону  $V_b$  в конструкції, можна поділити на 3 основні групи [15]:

1. Властивості і співвідношення вихідних матеріалів: марка цементу; кількість води на 1 м суміші; водоцементне відношення; крупність заповнювача.
2. Умови приготування суміші - час перемішування в бетономішалці.
3. Умови випробування: міцність бетону, кількість зразків у серії, вік бетону на момент випробувань, розміри зразків.

Якщо вплив марки цементу на  $V_b$  визначено як мало суттєвий з (коефіцієнт кореляції  $\rho=0,4$ ), то кількість води на м значно впливає на величину стандарту міцності  $R_b$  [ 16,17].

Проте марка цементу та витрати води разом з іншими факторами визначають міцність бетону, тому було рекомендовано включити вплив факторів першої групи в залежність  $V_b$  від міцності бетону у фіксований момент часу  $t = 28$  діб  $R_b(28)$ .

Залежність показника  $V_b$  від тривалості перемішування бетонної суміші пояснюється високим ступенем її неоднорідності за короткого часу змішування та швидким зростанням однорідності зі збільшенням тривалості цього процесу. Тому для прийнятого у виробничій практиці часу перемішування 4–5 хв вплив даного чинника на величину  $V_b$  можна вважати несуттєвим [18, 19].

Щодо впливу рівня міцності бетону на показник  $V_b$ , у наукових дослідженнях відсутня єдина позиція. Частина авторів вказує на тенденцію до зменшення  $V_b$  зі зростанням міцності  $R_b$ . Згідно з нормативами США, стандартне відхилення міцності зростає повільніше, ніж її середнє значення, що призводить до зменшення  $V_b$  при підвищенні  $R_b$ . Водночас низка дослідників отримала лінійну залежність стандартного відхилення від міцності бетону, з чого випливає практична незалежність показника  $V_b$  від  $R_b(28)$ .

Відмінності в отриманих експериментальних результатах можуть бути зумовлені різними підходами до забезпечення відпускної міцності бетону, що застосовуються в окремих лабораторіях та на промислових підприємствах [8, 9]. Зміна співвідношень компонентів бетонної суміші під час переходу від одного класу бетону до іншого підвищує вплив похибок дозування на загальне розсіювання міцнісних показників [10]. При цьому ступінь впливу кількості та пропорцій складових на міцність бетону є неоднаковим, що й обумовлює різний характер варіації міцності за зміни її середнього значення [11].

Встановлено такі діапазони мінливості характеристик компонентів бетону [12]:

- міцність цементу — у межах  $\pm(6\dots25)\%$ ;
- міцність заповнювачів —  $\pm(15\dots50)\%$ .

Мінливість кількісного вмісту складових бетонної суміші становить [12, 13]:

- цементу —  $\pm(5\dots15)\%$ ;
- води —  $\pm(8\dots23)\%$ ;
- заповнювачів —  $\pm(5\dots10)\%$ ;
- вологості заповнювачів —  $\pm(1\dots21)\%$ .

Такі значні коливання якості та кількісного складу компонентів суміші істотно впливають на рівень варіації міцності бетону при зміні співвідношень складових [11, 14].

В Одеській державній академії будівництва та архітектури (ОДАБА) було виконано масштабний комплекс лабораторних досліджень, спрямованих на вивчення впливу віку бетону на зміну показника мінливості міцності  $V_b$ . У результаті встановлено, що протягом перших семи діб твердіння мінливість бетону у 2–4 рази перевищує значення  $V_b(28)$  за умов природного твердіння. Для бетонів, що зазнавали теплової обробки, відповідне перевищення становить 20–30% [15, 16].

## 1.2 Вплив технологічних чинників на міцність конструкцій

Технологія виготовлення будівельних конструкцій та якість виконання будівельно-монтажних робіт мають визначальний вплив на їх надійність. Як свідчать результати статистичного аналізу вітчизняних і зарубіжних аварійних випадків [6], близько 60% відмов будівельних конструкцій спричинені помилками під час монтажу та незадовільною якістю виконання робіт. Одним із ключових показників рівня технологічної культури виготовлення залізобетонних, зокрема трубобетонних, конструкцій є мінливість міцнісних і деформативних характеристик бетону [7].

Дослідження властивостей бетону у заводських виробках [8], монолітних конструкціях [9], а також результати лабораторних випробувань [10] підтверджують наявність значної, подекуди до 40%, варіації міцності бетону в межах одного конструктивного елемента. На величину цієї мінливості впливають як технологічні фактори (якість цементу та заповнювачів, склад бетонної суміші, точність дозування, умови перемішування й ущільнення, догляд за бетоном), так і випадкові чинники, що зумовлюють зміну міцності вздовж довжини елемента [11].

Фізико-механічні властивості бетону значною мірою визначаються його внутрішньою структурою, яка формується залежно від водоцементного відношення [1, 2]. Надлишок незв'язаної води призводить до зменшення густини бетону: пори можуть займати до третини об'єму цементного каменю, що негативно позначається на міцності матеріалу і, відповідно, на несучій здатності конструкції [3].

Структура бетону є принципово неоднорідною і являє собою просторову систему цементного каменю, заповнену зернами піску та щебеню різних розмірів і форми, а також значною кількістю мікропор і капілярів, у яких містяться хімічно незв'язана вода, водяна пара та повітря [2, 4]. Сам цементний камінь також характеризується структурною неоднорідністю та складається з пружних кристалічних утворень і в'язкої зв'язувальної фази.

Характерною особливістю бетону є зміна його структури з часом, що пов'язано з перерозподілом вологи, зменшенням об'єму гелю, який твердне, та розвитком кристалічних утворень із вищою пружністю [5]. У результаті відбувається зменшення об'єму бетону, тобто усадка, інтенсивність якої залежить від кількості й виду цементу, вмісту води, а також розмірів і типу заповнювачів [6]. Швидкість розвитку усадкових деформацій визначається вологістю навколишнього середовища та характером прикладених до бетону навантажень [7].

Усадка безпосередньо пов'язана з фізико-хімічними процесами твердіння бетону, які спричиняють зменшення об'єму цементного гелю [3]. Оскільки заповнювачі перешкоджають вільному скороченню об'єму, у цементному камені виникають початкові напруження розтягу. Через нерівномірне висихання бетону по перерізу елемента ці напруження розподіляються нерівномірно, що призводить до утворення усадкових тріщин [6, 7].

Зазначені особливості характерні переважно для бетонів, які тверднуть у відкритому середовищі. Для бетонів, що набирають міцність у замкненому просторі об'єми, типовим є інший механізм — набухання, що суттєво відрізняє їх поведінку від звичайного бетону [16, 17].

Бетонні суміші оцінюють за сукупністю показників якості, зокрема легкоукладальністю, середньою густиною, пористістю, схильністю до розшарування, температурою та здатністю зберігати свої властивості з часом. Визначальною характеристикою бетонної суміші є її консистенція, яка оцінюється показником легкоукладальності — здатністю суміші заповнювати форму або опалубку з мінімальними витратами зовнішньої енергії [13].

Вибір цементу здійснюється з урахуванням основних проєктних вимог до бетону, зокрема необхідної міцності, морозостійкості та корозійної стійкості, а також технології виготовлення виробів і умов бетонування. Формування міцності бетону на ранніх стадіях твердіння (до 7 діб) визначається переважно мінералогічним складом цементу [1].

Заповнювачі виконують функцію просторового каркаса бетону, сприяють зниженню витрат цементу, підвищенню щільності та міцності матеріалу, а також зменшенню усадкових деформацій і внутрішніх напружень [2, 3]. Наявність шкідливих домішок у заповнювачах завжди негативно впливає на властивості бетону: для бетонів високих класів вміст пилюватих і глинистих частинок може призводити до зменшення міцності на 20–25% [13].

### **1.2.1 Використання добавок пластифікаторів, для регулювання властивостей бетонної суміші**

Міцність бетону перебуває у зворотній залежності від рівня його загальної пористості та зменшується зі зростанням водоцементного відношення [1, 2]. Найбільш відчутне зниження показника В/Ц — у межах 20–30% — досягається шляхом використання суперпластифікуючих хімічних добавок [18].

Для коригування властивостей бетонних сумішей застосовують різні види пластифікуючих і високодисперсних активних мінеральних добавок, зокрема золи-винесення та мікрокремнезем [19]. Процес пластифікації може забезпечуватися добавками з різним механізмом дії: гідрофільними (наприклад, лігносульфонати), гідрофобізуючими, мікропіноутворюючими або комплексними [20].

Найбільш поширеними в сучасній практиці є суперпластифікатори, використання яких, з одного боку, дає змогу отримувати високо рухомі або литі бетонні суміші, придатні для транспортування та укладання із застосуванням бетононасосів, а з іншого — забезпечує істотне зменшення водоцементного відношення, що безпосередньо сприяє підвищенню міцності затверділого бетону [18, 21].

Хімічні добавки є необхідним елементом для регулювання властивостей бетону та раціонального використання цементу. За функціональним призначенням і домінуючим ефектом дії їх поділяють на кілька основних груп: добавки, що впливають на властивості бетонних і розчинових сумішей (пластифікуючі, стабілізуючі, водоутримуючі, а також такі, що покращують перекачуваність); поризуючі добавки (повітровтягувальні, піно- та

газоутворюючі); добавки, що регулюють процеси тужавіння й твердіння (прискорювачі або сповільнювачі); а також добавки, які змінюють характер структуроутворення бетону й надають йому спеціальних властивостей, зокрема протиморозні та гідрофобізуючі [22].

Пластифікуючі добавки забезпечують підвищення рухомості бетонної суміші, тобто зменшують її жорсткість без зниження міцнісних показників бетону [21]. Для оцінювання ефективності дії пластифікатора готують суміш із початковим осіданням конуса (ОК) 2–4 см. Після введення добавки величина ОК зростає, і залежно від досягнутого значення добавку відносять до однієї з чотирьох категорій [23]:

- I — суперпластифікатори, що збільшують ОК з 2–4 до 20 см і більше;
- II — сильнопластифікуючі добавки з ОК 14–19 см;
- III — середньопластифікуючі добавки з ОК 9–13 см;
- IV — слабопластифікуючі добавки з ОК менше ніж 8 см.

У ролі пластифікаторів широко застосовують поверхнево-активні речовини (ПАР), які переважно отримують із побічних продуктів і відходів хімічної промисловості [24].

Залежно від характеру впливу на бетонну суміш розрізняють гідрофільні та гідрофобні пластифікуючі добавки [25].

### **1.2.2 Вплив виробничих факторів на міцність бетону**

Міцність бетону визначається не лише кількісним і якісним складом його компонентів, а й значною мірою залежить від комплексу виробничих чинників. До них належать точність дозування складових, умови перемішування та ущільнення бетонної суміші, а також способи її транспортування. На сучасних бетонних заводах дозування цементу, води й хімічних добавок зазвичай здійснюється з точністю до  $\pm 1\%$ , тоді як для заповнювачів допустимі відхилення становлять близько  $\pm 2\%$  [26, 27]. Разом із тим у реальних виробничих умовах ці відхилення нерідко перевищують нормативні значення, що негативно позначається на однорідності та міцності бетону.

Дослідження свідчать, що збільшення тривалості перемішування бетонної суміші в оптимальних межах позитивно впливає на її структурну однорідність і міцність бетону. Для пластичних сумішей подовження часу перемішування понад 1,5–2 хв практично не призводить до помітного зростання міцності. Водночас для жорстких бетонних сумішей збільшення тривалості перемішування понад 2 хв сприяє істотному підвищенню міцнісних показників [28]. Надмірно тривале перемішування жорстких сумішей (понад 10 хв) має зворотний ефект і може призводити до зниження міцності бетону внаслідок розшарування та руйнування первинних структурних зв'язків. Ефективне перемішування жорстких сумішей і отримання однорідної структури бетону можливе переважно за умови застосування бетонозмішувачів примусової дії.

Ущільнення бетонної суміші здійснюється шляхом вібрування або поєднання вібрування зі штампуванням чи прокатуванням. Під дією вібрацій суміш переходить у коливальний стан, за якого її компоненти перебувають у стані нестійкої рівноваги, а бетонна суміш набуває властивостей важкої рідини. Унаслідок цього внутрішнє тертя різко зменшується, що забезпечує ефективне заповнення форми та досягнення необхідного ступеня ущільнення [29].

Основними параметрами процесу віброущільнення є інтенсивність, частота й амплітуда коливань. Інтенсивність вібрації визначається співвідношенням амплітуди та частоти коливального руху. Зі зростанням добутку цих параметрів ступінь ущільнення бетонної суміші підвищується, що безпосередньо сприяє зростанню міцності бетону [30].

Кількість роботи, необхідної для повного ущільнення бетонної суміші, залежить від її легкоукладальності. За сталих значень частоти та амплітуди вібрацій ця робота визначається тривалістю вібрування, яка підбирається індивідуально для кожного виду виробів. Надмірне вібрування, як правило, не забезпечує додаткового підвищення міцності бетону, а для пластичних сумішей може спричиняти їх розшарування [31].

За даними А. Є. Десова, максимальні значення міцності бетону досягаються за тривалості вібрування, що дорівнює показнику жорсткості

суміші або дещо перевищує його, за умови однакових параметрів вібрації та визначення жорсткості за допомогою технічного віскозиметра [32].

Процес твердіння бетону характеризується інтенсивним набором міцності на початкових етапах, після чого швидкість її зростання поступово зменшується. Міцність бетону в заданому віці може бути прогнозована з використанням логарифмічної залежності, що добре узгоджується з експериментальними даними [33].

### **1.3 Міцнісні й деформативні характеристики бетонів**

Міцнісні характеристики бетонів формуються під впливом сукупності чинників, серед яких марка та тип цементу, водоцементне відношення, різновид і міцність крупних заповнювачів, особливості структури бетону, а також умови його виготовлення й зберігання. Міцність бетону зростає з часом, причому найінтенсивніше її наростання відбувається на початковій стадії твердіння — упродовж перших 28 діб. У подальшому швидкість цього процесу зменшується, однак зростання міцності може тривати протягом багатьох років.

Оцінювання міцності бетону здійснюється на основі результатів випробувань зразків встановленої форми та розмірів — кубів, циліндрів або призм, параметри яких регламентуються національними нормативами різних країн.

Найбільш практичним і достовірним методом визначення міцності бетону в реальних конструкціях є випробування на стиск зразків кубічної або циліндричної форми, виготовлених і витриманих в умовах, максимально наближених до умов твердіння самих конструкцій. Міцність бетону при цьому позначають символом  $R_b$ . Відповідно до чинних норм України, стандартні розміри бетонного куба становлять  $15 \times 15 \times 15$  см, а циліндра —  $15 \times 30$  см. За осьового стиску кубічні зразки, як і інші стиснуті елементи, руйнуються внаслідок виникнення розтягувальних напружень у поперечному напрямку. При цьому сили тертя, що діють по опорних гранях зразка (рис. 1.1, а), обмежують розвиток вільних поперечних деформацій у приповерхневих зонах торців [36, 37].

Досліди показують, що зі збільшенням висоти призми  $h/a$  вплив тертя на міцність зразка зменшується (рис.1.1, б,в). При  $h/a = 4$  воно практично зникає, а міцність стає рівною  $R_b = (0,75-0,8)R$  [38]. Поряд з кубиковою ( $R$ ) та призмовою міцністю ( $R_b$ ) для бетонів важливо знати інші міцнісні характеристики й у першу чергу міцність бетону на розтяг  $R_{bt}$ . Дослідним шляхом  $R_{bt}$  визначають випробуванням на розтяг зразків у вигляді вісімок або на згин бетонних брусків, або на розколювання зразків у вигляді циліндрів. Всі отримані при випробуваннях міцнісні характеристики піддають статистичній обробці, а потім вже визначається осереджена величина міцності [39].

Експериментальне визначення міцності бетону на розтяг здійснюють шляхом випробування зразків на прямий розтяг у формі «вісімок», згин бетонних брусків або розколювання циліндричних зразків. Усі отримані в результаті випробувань міцнісні показники підлягають статистичній обробці, після чого визначається їх усереднене значення.

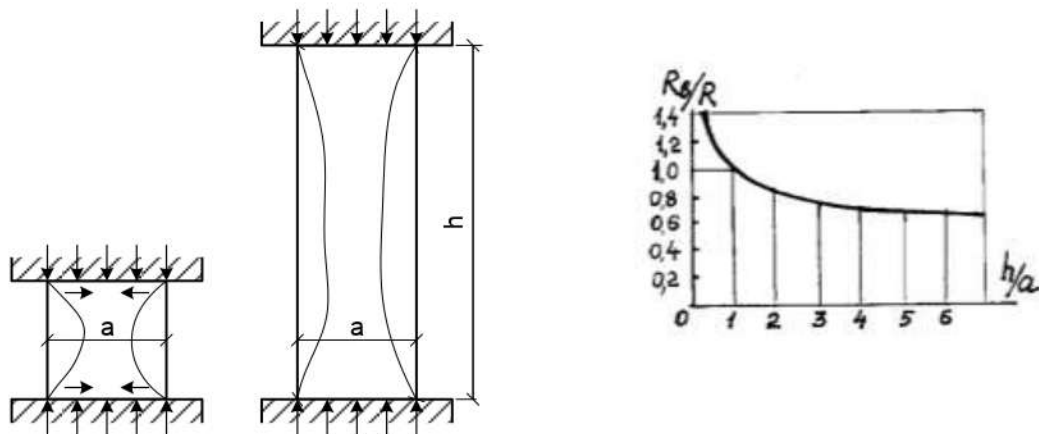


Рис.1.1 – До визначення міцності бетону

Крім основних міцнісних параметрів  $R$ ,  $R_b$ ,  $R_{bt}$  існує ряд інших параметрів, що характеризують властивості бетону: міцність при зрізі й сколюванні, міцність при тривалій дії навантаження, міцність при багаторазово повторному навантаженні, динамічна міцність, опір проникаючій радіації та ін.

У нормативних документах України основні характеристики бетонів описуються показниками якості бетону, до яких відносяться: 1) клас бетону за міцністю на стиск  $B$ ; 2) клас бетону за міцністю на розтяг  $B_t$ ; 3) марка бетону за

морозостійкістю  $F$ ; 4) марка бетону за водонепроникністю  $W$ ; 5) марка бетону за самонапруженням  $S_p$ ; 6) марка бетону за середньою щільністю  $D$ .

Для кожного з перерахованих вище видів бетонів існують усі шість значень показників якості. Виняток складає п'ятий параметр, що вводиться тільки для бетонів, які самонапружують.

Встановлені такі класи важких бетонів за міцністю на осьовий стиск:  $B3,5$ ;  $B5$ ;  $B7,5$ ;  $B10$ ;  $B12,5$ ;  $B15$ ;  $B20$ ;  $B25$ ;  $B30$ ;  $B35$ ;  $B40$ ;  $B45$ ;  $B50$ ;  $B55$ ;  $B60$ . При цьому під класом бетону на осьовий стиск розуміється міцнісна характеристика, одержана при стиску зразків розміром  $15 \times 15 \times 15$  см, витриманих у нормальних умовах і випробуваних у віці 28 діб з обов'язковою статистичною обробкою результатів випробувань. Ступінь надійності значень міцності повинен складати не менше 95% [39].

#### 1.4 Деформативні властивості бетонів

Бетон здатний змінювати свої геометричні параметри — форму та розміри — під дією зовнішніх механічних навантажень, а також температурно-вологісних впливів, що виникають у процесі його взаємодії з навколишнім середовищем. Під час випробування бетонної призми зі співвідношенням сторін  $h:a=1:4$  на стиск отримують залежність деформацій  $\varepsilon$  від прикладених напружень  $\sigma$ , відому як діаграма « $\sigma$ – $\varepsilon$ » (рис. 1.2) [40].

Зазначена діаграма має нелінійний характер і умовно поділяється на дві ділянки. Перша відповідає лінійній залежності між напруженнями та деформаціями, друга — нелінійній, у межах якої зв'язок між  $\sigma$  і  $\varepsilon$  вже не описується лінійною функцією. У зв'язку з цим для бетону розрізняють два модулі деформацій: модуль пружності та поточний (справжній) модуль деформацій.

Модуль пружності можна інтерпретувати як тангенс кута  $\alpha_0$  нахилу лінії  $\sigma$ – $\varepsilon$  на початку координат (пряма ОК). Позначається модуль пружності  $E_b$ . Модуль деформацій ( $E^b$ ), який у літературі називають ще модулем пружньо-

пластичності, який відповідає вже не пружним, а повним деформаціям і інтерпретується як тангенс кута  $\alpha$  нахилу січної в точці С із заданим напруженням  $\sigma_x$  ( $E'b = \text{tg}$ ) [41]. Ці модулі зв'язані між собою співвідношенням  $E'b = \nu E_b$ , де  $\nu = e_l / -$  коефіцієнт пружньо-пластичності. Він змінюється від 1 при пружних деформаціях до 0,45 – 0,15 при врахуванні непружних деформацій [42].

Дане співвідношення можна одержати з розгляду двох трикутників  $\Delta OAB$  і  $\Delta OCD$ .

Окрім наведених характеристик, для бетонів характерні ще дві специфічні деформаційні властивості — **усадка** та **повзучість**. Під усадкою розуміють здатність бетону з часом зменшувати свій об'єм під впливом температурно-вологісних умов зовнішнього середовища [43].

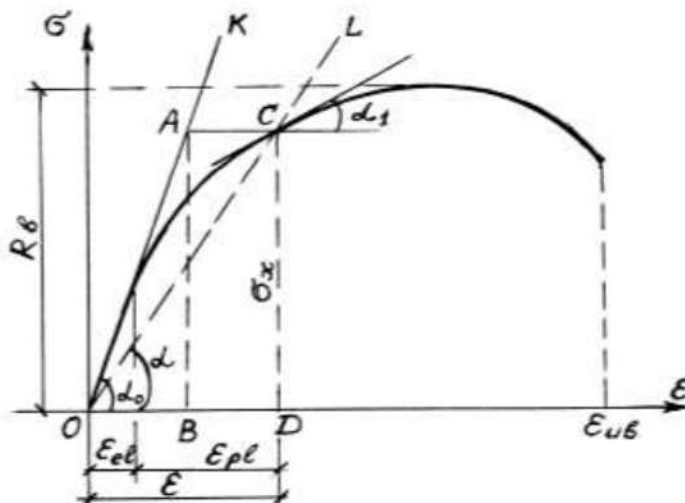


Рис.1.2 Залежності деформації  $\epsilon$  цієї призми від зовнішніх напружень  $\sigma$

Розвиток усадки обумовлений фізико-хімічними процесами, що супроводжують твердіння бетону, а також випаровуванням води з його порового простору. Усадкові деформації сприяють підвищенню зчеплення бетону з арматурою, унаслідок чого арматура зазнає стискальних зусиль, тоді як у бетоні виникають розтягувальні напруження. Нерівномірний характер формування усадки по об'єму елемента призводить до появи тріщин у бетоні [44].

У разі прикладання до бетону постійного тривалого навантаження деформації з часом не стабілізуються, а продовжують зростати навіть за незмінного рівня напружень. Таке поступове збільшення деформацій у часі без зміни прикладеного навантаження визначається як **повзучість бетону**. Найбільш інтенсивно це явище проявляється на ранніх етапах твердіння бетону та поступово зменшується зі збільшенням його віку. Сукупність часових змін деформаційних властивостей бетону відноситься до реологічних процесів. Величина деформацій повзучості залежить від ряду чинників, зокрема вологості навколишнього середовища, водоцементного відношення, вмісту цементу, рівня напруженого стану та інших технологічних і експлуатаційних параметрів.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Мета і задачі дослідження.** Основна мета роботи – експериментально-теоретично дослідити міцнісні характеристик важких бетонів з введенням пігментів для виділення шарів бетону на зразках різної форми.

**Об’єкт дослідження** – пошарове бетонування та змінність міцності по висоті зразків з важкого бетону.

**Предмет дослідження** – зразки призми, циліндри з важкого бетону з пошаровим бетонуванням.

**Основні задачі дослідження:**

– на основі результатів виконаних експериментів, отримати статистичні дані про мінливість міцнісних параметрів бетонних елементів по висоті, при неоднорідності середньої міцності бетону;

– експериментально дослідити мінливість фізико-механічних характеристик бетонних елементів, при однаковій витраті цементу на  $1 \text{ м}^3$  та різній міцності по висоті, при виділенні шарів за допомогою пігменту, та знайти зміну цих властивостей по висоті, викликаного фізичною та геометричною неоднорідністю таких елементів;

– знайти залежність між міцністю на стиск зразків призми та зразків циліндрів.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Планування експерименту

При складанні програми експериментальних досліджень було враховано, що несуча здатність бетонних елементів залежить від геометричних характеристик, конструктивного рішення самих експериментальних зразків і способів їх завантаження, та фізико-механічних характеристик вихідних матеріалів [18, 29, 33, 38, 45].

Тому метою проведення експериментальних досліджень було отримання даних про:

- характер руйнування дослідних зразків;
- мінливість міцності дослідних зразків по висоті;
- дослідження міцнісних характеристик бетонних зразків з однаковою витратою цементу то різною міцністю за висотою.

Для вирішення поставлених задач було виготовлено 2 серія зразків, в основу яких покладено пошарове заповнення зразків бетоном різної якості, та різними міцнісними характеристиками, при цьому витрата цементу та осадка конуса стала. Для отримання дотримання даних вимог вводиться суперпламтифікатор для осадки конуса П 1...4 см(рис. 3.1 ).

Прийнята програма експериментальних досліджень передбачає випробування на стиск бетонних зразків циліндрів (зі співвідношенням розмірів  $l = 4D$ ) та призм розміром  $10 \times 10 \times 40$  см, що мають послаблення бетону по різній висоті зразка. Для більш чіткого виділення шарів, слабший шар бетону виділено за допомогою пігменту. Під час проведення експерименту варійованими параметрами слугували склад бетону (на двох рівнях: середня кубикова міцність при витраті цементу  $250 \text{ кг/м}^3$  та середня кубикова міцність при витраті цементу  $450 \text{ кг/м}^3$ , при цьому середня витрата цементу на  $1 \text{ м}^3$  для всіх варіантів досліджуваних зразків  $350 \text{ кг/м}^3$ . Досліджувані зразки забетоновані різними складами бетону по висоті [21, 30, 46]..

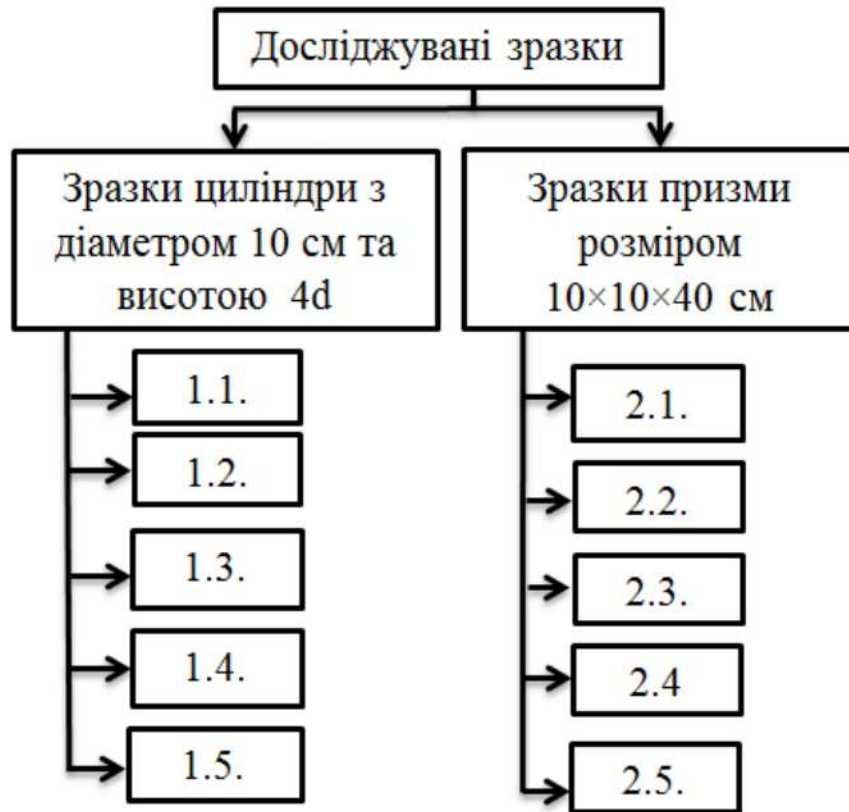


Рис. 3.1. Серії досліджуваних зразків.

Детальний опис бетонування зразків наведено на рисунку 3.2., шар бетону з витратою цементу 250 кг/м<sup>3</sup> пофарбований пігментом:

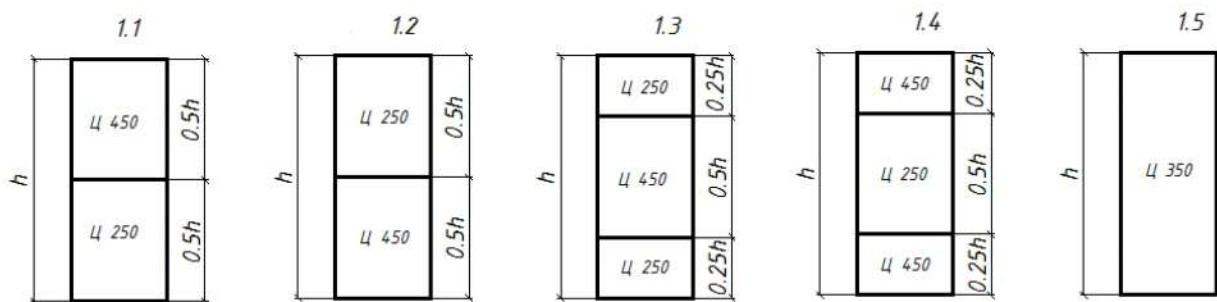


Рис. 3.2. Схема заповнення зразків бетоном по висоті.

### **3.2. Конструкція та технологія виготовлення дослідних зразків.**

Конструкція дослідних зразків та технологія їх виготовлення приймалися відповідно до вимог чинних нормативних документів щодо формування, ущільнення, витримування та догляду за бетонними зразками [26, 27, 28, 33, 47]. Спочатку відбувалося дозування вихідних компонентів (щебеню, цементу, піску та пластифікатору) на електронних лабораторних вагах відповідно до складів. Потім відбувалося приготування до замісу бетонозмішувача (був вибраний гравітаційний спосіб перемішування). Вологою ганчіркою протиралися його внутрішні поверхні для того, щоб нівелювати витрати води замішування на змочування стінок.

У працюючий змішувач всипалися сухі компоненти (щебінь попередньо був просушений, для відокремлення пиловидних домішок). Потім компоненти перемішувалися певний час, котрий був однаковим в усіх випадках, без присутності води.

Вода та пластифікатор вводилися сумісно. Після їх введення суміш перемішувалася до досягнення однорідної консистенції, котра отримувалася приблизно через 5 хв.

Зі свіже приготованої бетонної суміші формувалися зразки (форми для цього попередньо змащувались мастилом, а місця з'єднання стінок герметизувалися силіконовим герметиком). Потім зразки ущільнювалися на лабораторній віброплощадці. Час ущільнення варіювався відповідно до коефіцієнта ущільнення.

Зразки витримувалися протягом 1 доби у формах та 27 діб у камері нормального твердіння. Випробування проводилися на 2-й та 28- день. Зразки детально маркувалися, висушувалися, зважувалися та вимірювалися площа, на яку прикладалося навантаження, що відповідає стандартним методикам підготовки бетонних зразків до випробувань [29, 33, 48].

До випробувань зразки готувалися згідно вимог відповідних нормативних документів і методичних рекомендацій [12, 26, 29, 49].

### 3.3 Підготовка до випробувань

Зразки детально маркувалися, висушувалися, зважувалися та вимірювалася площа, на яку прикладалося навантаження, що відповідає стандартним методикам підготовки бетонних зразків до випробувань [29, 33, 48].

До випробувань зразки готувалися згідно вимог відповідних нормативних документів і методичних рекомендацій [12, 26, 29, 49].

### 3.4 Методика проведення експериментальних досліджень

Випробування зразків проводилися у віці 2 діб та 28 діб, що відповідає прийнятим термінам контролю ранньої та нормативної міцності бетону [16, 18, 19, 26].

Визначення міцності зразків здійснювалося двома методами:  
– **руйнівним** — шляхом випробування на стиск на гідравлічному пресі ПГ-100;  
– **неруйнівним** — із застосуванням ультразвуково-склерометричного приладу «ОНИКС-2.5», що відповідає рекомендаціям щодо комплексного контролю міцності бетону в конструкціях [29, 31, 45, 50].

Прилад «ОНИКС-2.5» складається з електронного блоку, пружинного датчика-склерометра та еталонного зразка з органічного скла (рис. 3.5) і застосовується для оперативної оцінки міцності бетону за відскоком ударника [45, 50].

За одиничне значення міцності бетону (матеріалу) прийнято середнє значення 10-ти окремих вимірювань на певній ділянці конструкції. Відстань між точками нанесення ударів повинна бути не менше 15 мм і не менше 20 мм від крайки куба.

При випробуванні на стиск був використаний перс ПГ 100.



Рис. 3.5. Вимірювач міцності будівельних матеріалів "ОНИКС - 2.5": а - електронний блок вимірювань; б - датчик-склерометр; в - еталон з органічного скла

## РОЗДІЛ 4

### ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 4.1 Цемент

Для проведення експерименту використовувався цемент ПЦ І-500.

Згідно даних виробника даний цемент відзначається високою ранньою міцністю, а високий вміст у клінкері  $C_3S$  і низький вміст  $C_3A$  свідчить про можливість отримання на основі такого цементу бетонів високої стійкості [11, 34, 51]..

#### Тонкість помелу

Тонкість помелу цементу визначалася згідно вимог нормативних документів ДСТУ EN 196-6:2007 (EN 196-6:1989, IDT) [15, 52], використовувався метод визначення вищевказаної характеристики за залишком на ситі. Нижче приведені результати, у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 Результати визначення тонкості помелу цементу

№ досліджу	Маса наважки, г	Залишок на ситі, г	Тонкість помелу, %
1	50	2,60	5,21

#### Нормальна густина

Нормальна густина визначалася згідно з ДСТУ Б В.2.7-185:2009 [13, 52].  
Результати наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Результати визначення нормальної густоти цементного тіста

№ досліджу	Кількість води замішування, мл	Показання приладу Віка, мм	Нормальна густина, %
1	110	4,1	26,6

Марка за міцністю на стиск

Марка за міцністю на стиск визначалася на зразках-балочках розмірами 40×40×160 мм згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-187:2009 [14, 35, 52]. Результати наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 Результати визначення марки цементу за міцністю на стиск

№	Вік зразка, діб	Руйнуюче зусилля, кН	Границя міцності, МПа	Марка
1	28	12589	51.3	500
2	28	13754	56.1	500
3	28	12365	50.4	500
4	28	12352	50.4	500
5	28	12998	53.0	500
6	28	12658	51.6	500

#### 4.2 Щебінь

Для випробувань використовувався щебінь з максимальним розміром зерен 20 мм. Перед початком випробувань він був просіяний через набір сит для перевірки фракції щебеню.

Також щебінь для випробування був висушений, для того щоб такі параметри, як вологість, не впливали на результати дослідів [9, 36]..

#### Насипна густина

Насипна густина визначалася згідно вимог [10] Результати наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 Результати визначення насипної густини лабораторного щебеню фракції 5 – 20

Фракція	Об'єм проби, см <sup>3</sup>	Маса проби, г	$\rho_m$ , (г/см <sup>3</sup> )
5 - 20	10000	13795	1,37

Насипна густина визначалася згідно вимог ДСТУ Б В.2.7-75-98 та EN 1097-3 [10, 53]. Результати наведені у таблиці 4.4.

### 4.3 Пісок

Пісок був використаний у якості дрібного заповнювача. Це – звичайний річковий пісок, характеристики якого наведені нижче.

#### Насипна густина

Насипна густина визначалася згідно з ДСТУ Б В.2.7-32-95 та EN 1097-3 [8, 53]. Результати випробувань наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 Результати визначення насипної густини піску

№ досліду	Об'єм циліндра, см <sup>3</sup>	Вага циліндра, г	Вага циліндр з піском, г	Вага піску, г	Густина, г/см <sup>3</sup>
1	995	274	1756,95	1480,95	1,48
2	995	274	1757,05	1485,05	1,485

За значення насипної густини піску приймалося середнє значення котре становить 1,4 г/см<sup>3</sup>.

#### Модуль крупності

Модуль крупності визначався згідно вимог ДСТУ Б В.2.7-32-95 та EN 933-1 [8, 54]. Результати його визначення наведені у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 Результати визначення модуля крупності піску

№ сит	Пісок		
	г	a <sub>i</sub> %	A <sub>i</sub> , %
5	0		0
2,5	11	1,10	1
1,25	18	1,80	3
0,63	12	1,20	4
0,315	57	5,71	10
0,16	722	72,27	82
Піддон	180	18,02	100
Σ	999		
Мкр	1		

### Істина густина

Істинна густина визначалася згідно з ДСТУ Б В.2.7-32-95 та EN 1097-6 [8, 55]. Але слід відзначити, що при підборі складу бетону було прийняте довідникове значення істинної густини  $2,62 \text{ г/см}^3$  [34].

### 4.4 Характеристики пластифікатору

Характеристики пластифікатору приймалися відповідно до технічних умов виробника та вимог ДСТУ Б В.2.7-171:2008 і EN 934-2 [56].

Для дослідів використовувалася також добавка-гіперпластифікатор BASF GLENIUM 51. Для отримання менш жорсткої суміші використано гіперпластифікатор полікарбосилат з густиною  $1,05 \pm 0,05 \text{ г/см}^3$ . Хімічні властивості наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 Хімічні властивості добавки-гіпер пластифікатора BASF GLENIUM 51

Показник	Значення показника
Вміст твердої речовини, %	$40,0 \pm 2,0$
РН (20°C)	6-8
Вміст хлоридів, %	$\leq 0,1$
Вміст сульфата натрію, %	$\leq 4,0$

Дана речовина дає можливість виготовити бетон високої міцності, використовуючи при цьому невелику кількість води. Наступною перевагою полікарбосилату є його мале дозування у відсотках від маси бетону.

### 4.5 Підбір складу бетону

Для виготовлення бетонних зразків як дрібний заповнювач застосовувався кварцовий пісок, що відповідає нормативним вимогам ДСТУ Б В.2.7-32-95 та EN 12620 [17, 54]. Пісок мав модуль крупності  $M_k = 1$ , насипну густина в сухому стані  $\rho_n = 1480 \text{ кг/м}^3$ , істинну густина  $\rho_a = 2620 \text{ кг/м}^3$  та вологість 2 %.

У ролі крупного заповнювача використовувався щебінь фракції 5–20 мм з максимальною крупністю зерен  $D_{\max} = 20$  мм, який відповідав вимогам стандартів ДСТУ Б В.2.7-75-98 та EN 12620 [10, 54]. Показник пустотності щебеню становив 48,2 %, насипна густина —  $\rho_n = 1397$  кг/м<sup>3</sup>, а істинна густина —  $\rho_a = 2700$  кг/м<sup>3</sup>. Матеріал також був перевірений на наявність шкідливих домішок відповідно до ДСТУ Б В.2.7-32-95 [9].

В'язучим компонентом обрано портландцемент марки М500 з насипною густиною  $\rho_n = 1300$  кг/м<sup>3</sup> та істинною густиною  $\rho_a = 3100$  кг/м<sup>3</sup>. Початок тужавіння цементу відбувався через 60 хв, а завершення — через 10 годин після замішування. Тонкість помелу цементу відповідала вимогам ДСТУ EN 196-6:2007, за якими при просіюванні крізь сито №008 проходило не менше 85 % маси проби [15]. Рухливість цементно-піщаного розчину складу 1:3 при водоцементному відношенні 0,4 характеризувалась розпливом стандартного конуса 135 мм [34].

Вода, що використовувалась для приготування бетонної суміші та розчинів хімічних добавок, відповідала вимогам ДСТУ Б В.2.7-171:2008 та EN 1008 [24, 57]. Вміст органічних поверхнево-активних речовин, цукрів і фенолів у воді не перевищував 10 мг/л, також не допускалась наявність плівок нафтопродуктів, жирів або олій. Окислюваність води становила не більше 15 мг/л, а значення рН перебувало в межах від 4 до 12,5. Крім того, вода не містила домішок, здатних негативно впливати на процеси схоплювання, твердіння цементного тіста та експлуатаційні властивості бетону.

Підбір складу бетонної суміші здійснювався відповідно до рекомендацій ДСТУ Б В.2.7-176:2008 та EN 206 [17, 58]. Для експериментальних досліджень було задано постійну рухливість бетонної суміші П1. З урахуванням типу виробу та способу ущільнення суміш віднесено до класу легкоукладності Ж1, що відповідає рухливості П1.

Витрату води для приготування 1 м<sup>3</sup> бетонної суміші визначали залежно від виду крупного заповнювача (щебінь), його максимальної крупності (20 мм) та заданої легкоукладності відповідно до нормативних рекомендацій [19, 34].

Базова витрата води становила  $200 \text{ л/м}^3$ . З урахуванням модуля крупності піску  $M_k = 1$  було внесено поправку, що передбачала збільшення витрати води на  $10 \text{ л/м}^3$ . Таким чином, остаточна витрата води склала  $210 \text{ л/м}^3$  бетонної суміші.

Витрата цементу на  $1 \text{ м}^3$  приймається  $250 \text{ кг}$ , а за водоцементного відношення  $B/C = 0,6$  витрата води становить  $150 \text{ л}$  [34].

Знаходимо пустотність щебеню:

$$P_{\text{ш}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{а}}}\right) \cdot 100\% \quad (3.1)$$

де  $\rho_{\text{н}}$ - насипна густина щебеню;

$\rho_{\text{а}}$ - істина густина щебеню.

$$P_{\text{ш}} = \left(1 - \frac{1,490}{2,7}\right) \cdot 100\% = 48\% \quad (3.2)$$

Визначаємо за [19] коефіцієнт розсунення зерен крупного заповнювача:  $\alpha = 1,26$ .

Визначаємо витрати щебеню і піску методом абсолютних об'ємів за [19].

Витрата щебеню на  $1 \text{ м}^3$  бетону.

$$Ш = \frac{1000}{\frac{\alpha \cdot V_{\text{шц}}}{\rho_{\text{шц}}} + \frac{1}{\rho_{\text{ац}}}} = \frac{1000}{\frac{1,26 \cdot 0,48}{1,4} + \frac{1}{2,7}} = \frac{1000}{0,802} = 1246,98 \text{ кг/м}^3 \quad (3.3)$$

Витрата піску на  $1 \text{ м}^3$  бетону.

$$P = \left[100 - \left(\frac{C}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{B}{\rho_{\text{с}}} + \frac{Ш}{\rho_{\text{шц}}}\right)\right] \cdot \rho_{\text{н}} = \left[1 - \left(\frac{250}{3,1} + \frac{150}{1} + \frac{1246,88}{2,7}\right)\right] \cdot 2,62 = 805 \text{ кг/м}^3 \quad (3.4)$$

Для проведення експерименту матеріали висушуємо, тому склад згідно вологості матеріалів не корегуємо.

Визначаємо номінальний склад бетону за масою:

$$\frac{C_1}{C_1} : \frac{P_1^{\text{свх}}}{C_1} : \frac{Ш^{\text{свх}}}{C_1} : \frac{B_1}{C_1} = \frac{250}{250} : \frac{806}{250} : \frac{1247}{250} : \frac{150}{250} = 1 : 3,22 : 5 : 0,6. \quad (3.5)$$

Визначаємо коефіцієнт виходу бетонної суміші:

$$\beta = \frac{1000}{\frac{Ц_1}{\rho_{нц}} + \frac{П_1^{сух}}{\rho_{пн}} + \frac{Щ^{сух}}{\rho_{нщ}}} = \frac{1000}{\frac{250}{1,3} + \frac{805,76}{1,48} + \frac{1246,88}{1,45}} = 0,66. \quad (3.6)$$

Витрата пластифікатору становила 1 % від маси цементу, витрата пігменту — 1 % від маси цементу відповідно до **EN 934-2** та **ДСТУ Б В.2.7-171:2008** [56]. Інші склади бетону наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 Витрата матеріалів необхідна на об'єм 1000 л бетону

Склади на 1 м <sup>3</sup>						
№	Цемент, кг	Вода, л	Щебінь, кг	Пісок, кг	Пластифікатор, кг	Пігмент, кг
1	250	150	1247	806	2,5	2,5
2	350	170	1142	652	3,5	—
3	450	200	1191	517	4,5	—

## РОЗДІЛ 5

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Випробування зразків проводились згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-214:2009 та EN 12390-3 [61, 62]. Проведено випробування на стиск досліджуваних зразків у віці 2 та 28 діб..

#### 5.1. Проведення експериментальних досліджень

Випробування зразків проводились згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [16].

Проведено випробування на стиск досліджуваних зразків у віці 2 та 28 діб.

##### 5.1.1 Середня густина бетону

Визначення середньої густини зразків здійснювалося відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-170:2008 та EN 12390-7 [63, 64]. Зважування зразків проводили з відносною похибкою не більше 0,1 %. Лінійні розміри кубічних зразків вимірювали з точністю до 0,1 мм. Перед проведенням випробувань зразки висушували в сушильній шафі до досягнення постійної маси за температури ( $105 \pm 10$ ) °С.

Вихідні дані та результати випробувань зразків заношено у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1. Середня густина досліджуваних зразків бетону.

Порядковий номер зразка	Характеристика зразків				Середня густина, $\rho$ (г/см <sup>3</sup> )
	Ширина, a (мм)	Довжина, b(мм)	Висота, h (мм)	Маса, m (г)	
1	2	3	4	5	6
<b>Зразки з пігментом</b>					
1	102	104	103	2535	2,320
2	99	105	100	2110	2,030
3	101	98	99	2125	2,169
4	96	103	99	2460	2,513
5	100	97	99	2355	2,452
Середнє значення					2,29
<b>Зразки без пігменту</b>					
6	99	99	98	2160	2,249
7	101	99	102	2370	2,324

Продовження таблиці 5.1.

1	2	3	4	5	6
8	100	98	103	2210	2,189
9	100	98	101	2315	2,339
10	99	99	102	2245	2,246
Середнє значення					2,278

### 5.1.2. Міцність зразків циліндрів

Проведено випробування серії зразків-циліндрів при визначенні міцності на стиск, що мають висоту до 4 діаметрів, відповідно до **EN 12390-3** [62]. У таблиці 5.2 наведено результати випробувань зразків-циліндрів у віці 2 діб. Оскільки досліджувалась зміна міцності бетону по висоті зразків у віці 28 діб, у таблиці 5.3 наведено міцність зразків у віці 2 та 28 діб і порівняно з розрахунковим значенням, визначеним згідно з **EN 206** [65]. Співвідношення середньої міцності зразків при випробуванні двома методами зображено на рисунку 5.1.

Так як досліджувались зразки на зміну міцності бетону по висоті зразків у віці 28 діб, в таблиці 5.3. наведено міцність зразків у віці 2 та 28 діб та порівняно з розрахунковим значенням.

Таблиця 5.2. Результати випробувань зразків на стиск у віці 28 діб.

Серія	Результати випробувань зразків на стик					Результати випробувань зразків на стик не руйнівним методом	
	Характеристики зразків, мм		Руйнуюче навантаження, F кгс	Міцність, $R_6$ МПа	$f_{cm,cyl}$ , МПа	$R_{6,cyl}$ , МПа	Середнє значення, $f_{cm,cil}$ МПа
	d, мм	h, мм					
1	2	3	4	5	6	7	8
1.1.	10	39,8	13590	20,49	20,96	30,9	31,15
	10,1	39,5	14205	21,42		31,4	
1.2.	10	40	12184	18,37	19,22	29,1	30,35
	10	39,8	13306	20,06		31,6	
1.3.	10,1	39,9	20973	31,62	26,84	32,3	31,45
	10	40	14623	22,05		30,6	
1.4.	10	40,3	8919	13,45	19,58	33,8	34,40
	10	39,8	17052	25,71		35,0	
1.5.	10	38,5	16419	24,76	24,57	33,7	33,00
	10	40	16173	24,39		32,3	

Таблиця 5.3 Характеристика міцності зразків-циліндрів при стиску

№	Середнє значення границі міцності у віці 2 діб.	Міцністю на стиск, МПа	
		Середнє значення границі міцності у віці 28 діб.	Розрахункова середня міцність зразків
1	2	3	4
1.1.	6,55	20,96	33,2
1.2.	4,58	19,22	33,2
1.3.	9,95	26,84	33,2
1.4.	6,12	19,58	33,2
1.5.	7,68	24,57	33,2

Співвідношення середньої міцності зразків при випробуванні двома методами зображено на рисунку 5.1.

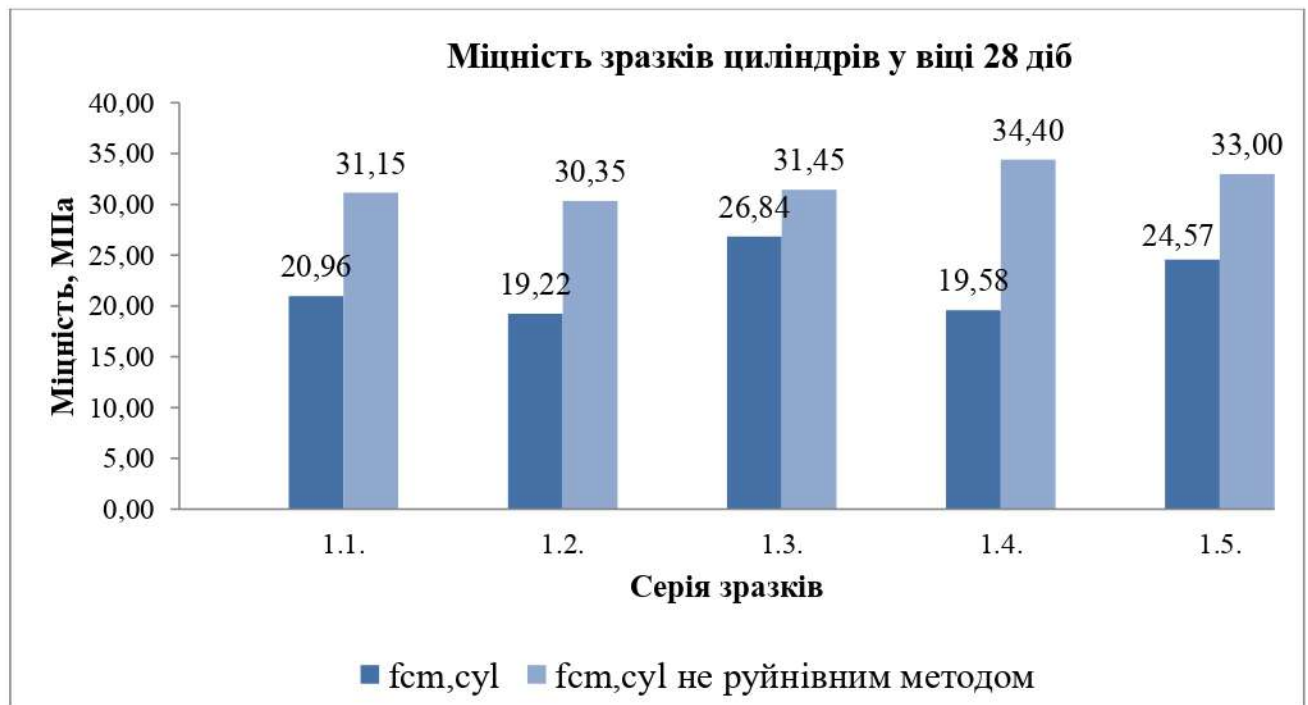


Рис. 5.1. Співвідношення середньої міцності зразків

Проведено випробування на стиск серії зразків-призм розмірами 100×100×400 мм відповідно до ДСТУ Б В.2.7-214:2009 та EN 12390-3 [61, 62].

У таблиці 5.4 наведено результати випробувань та характеристики зразків у віці 28 діб.

Оскільки досліджувалась мінливість міцності зразків у віці 28 діб, у таблиці 5.5 наведено міцність зразків у віці 2 та 28 діб і порівняно з розрахунковим значенням згідно з [65].

Співвідношення середньої міцності зразків при випробуванні двома методами зображено на рисунку 5.2.

### 5.1.3. Міцність зразків-призм з висотою ребра 400 мм

Проведено випробування на стиск серії зразків призм розмірами 100×100×400 мм.

В таблиці 5.4. наведено результати випробувань та характеристики зразків кубиків у віці 28 діб.

Таблиця 5.4. Результати випробувань зразків на стиск у віці 28 діб.

Серія	Характеристики зразків, мм			Результати випробувань зразків на стик			Результати випробувань зразків на стик не руйнівним методом	
	a, см	b, см	h, см	Руйнуюче навантаження, F кгс	Міцність, R <sub>b</sub> МПа	f <sub>ck,prism</sub> , МПа	f <sub>ck,prism</sub> , МПа	Середнє значення, f <sub>ck,prism</sub> , МПа
1.1.	9,8	9,8	42	15378	16,21	15,96	31,65	31,56
	10	9,9	37,5	15378	15,72		31,47	
1.2.	9,9	9,7	39,5	18200	19,18	18,99	30,72	31,10
	9,9	9,9	39,9	18200	18,79		31,47	
1.3.	9,9	9,8	39,8	19722	20,57	20,47	33,51	33,17
	9,8	10	39,9	19722	20,37		32,82	
1.4.	9,9	10,1	39,6	22485	22,76	22,80	36,42	35,58
	9,9	10	39,6	22344	22,84		34,73	
1.5.	10	10	40	22243	22,51	22,53	33,5	33,75
	9,9	10,2	39,8	22485	22,54		34	

Так як досліджувалась мінливість міцності зразків у віці 28 діб, в таблиці 5.5. наведено міцність зразків у віці 2 та 28 діб та порівняно з розрахунковим значенням.

Таблиця 5.5 Характеристика міцності при стиску зразків призм висотою 400 мм

№ серії	Середнє значення границі міцності у віці 2 діб.	Міцністю на стиск, МПа	
		Середнє значення границі міцності у віці 28 діб	Розрахункова середня міцність зразків
1	2	3	4
2.1.	15,96	31,56	33,2
2.2.	18,99	31,10	33,2
2.3.	20,47	33,17	33,2
2.4.	22,80	35,58	33,2
2.5.	22,53	33,75	33,2

Співвідношення середньої міцності зразків при випробуванні двома

Співвідношення середньої міцності зразків при випробуванні двома методами зображено на рисунку 5.2.



Рисунок 5.2. Графічне зображення міцності серії зразків призм.

Аналіз даних, наведених на рисунку 5.2, свідчить про наявність значної різниці між середніми показниками міцності зразків. Найбільша розбіжність, що

перевищує 49 %, характерна для зразків серії 2.1, у яких знижені значення міцності бетону спостерігалися в нижній частині зразка.

Результати дослідження міцності бетону за допомогою неруйнівного методу по висоті зразків показали, що найбільш рівномірні та високі показники отримано для зразків серії 2.4, у яких підвищена міцність бетону зосереджена в центральній частині зразка [67].

## **5.2. Характер руйнування та мінливість міцності експериментальних зразків**

За результатами випробувань бетонних зразків побудовано діаграми, що відображають мінливість міцності серій зразків відповідно до методичних рекомендацій з аналізу експериментальних даних [68].

### **5.2.1. Результати експериментальних досліджень зразків циліндрів**

Дослідження проводились на зразках-циліндрах з важкого бетону висотою 4d (рис. 5.4), випробування здійснювались відповідно до EN 12390-3 [62].



Рис. 5.4. Серія зразків циліндрів бетонних висотою 4d

Для більш чіткого виділення шарів у бетоні було введено 1 % пігменту від маси цементу, що відповідає вимогам EN 12878 [69].

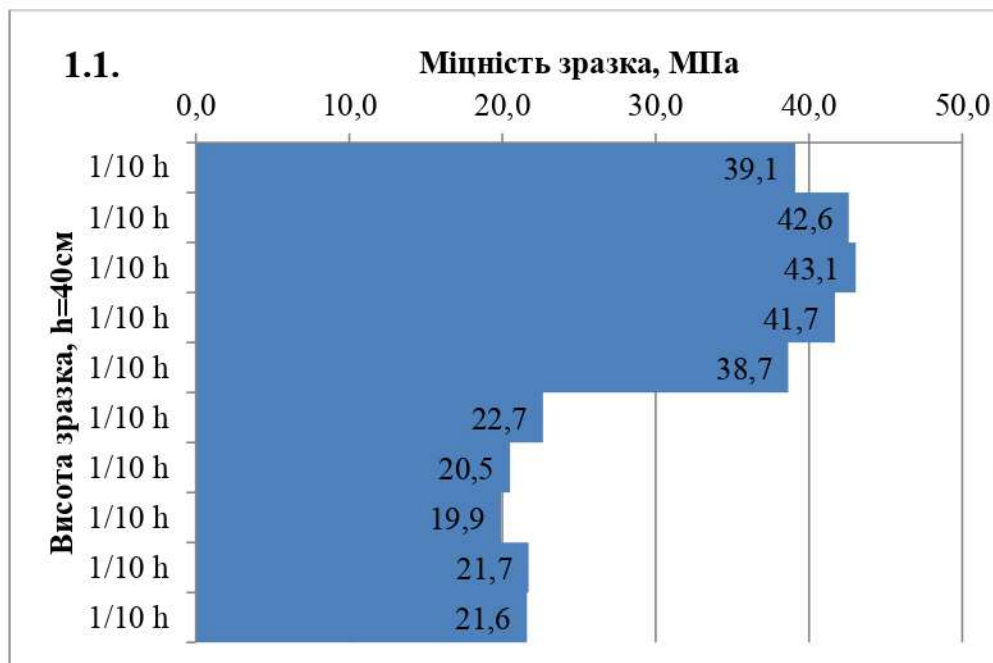


Рис. 5.5. Серія зразків циліндрів бетонних висотою 4d з введенням пігменту

Для визначення мінливості міцності по висоті зразка, неруйнівним методом, виготовлено по 2 зразки кожного виду, досліджено та знайдено середнє значення. Розглянемо характер руйнування та результати випробувань зразків циліндрів серії 1.1. таблиця 5.6. та на рисунку 5.6 [66, 70].

Таблиця 5.6. Міцнісні характеристики зразків серії 1.1.

Висота досліджуваного шару зразка	Результати випробувань зразків неруйнівним методом, МПа		
	Зразок №1	Зразок №2	Середня міцність досліджуваного шару зразка
1	2	3	4
від 1 до 4 см	39,8	38,4	39,1
від 5 до 8 см	42,5	42,7	42,6
від 9 до 12 см	43,2	42,9	43,1
від 13 до 16 см	40,8	42,6	41,7
від 17 до 20 см	39,0	38,3	38,7
від 21 до 24 см	22,9	22,4	22,7
від 25 до 28 см	20,5	20,5	20,5
від 39 до 32 см	19,8	20,0	19,9
від 33 до 36 см	20,0	23,4	21,7
від 37 до 40 см	20,3	22,9	21,6
Середнє значення міцності зразків	30,9	31,4	



а)

б)

Рисунок 5.6. Характер руйнування зразків серії 1.2.

а) графік коливання міцності по висоті зразка; б) характер руйнування зразка після випробування на стиск.

Характер руйнування зразків очікуваний, адже зразок зруйнувався в місці штучного ослаблення. Тип руйнування – косий зріз. Верхня половина зразка залишилася ціла. Середнє значення несучої міцності бетону відповідає середній міцності контрольних однорідних зразків і дорівнює 20,96 МПа.

Розглянемо характер руйнування та результати випробувань зразків циліндрів серії 1.2., з ослаблення міцності бетону в верхній половині зразка, результати наведені в таблиця 5.7. та на рисунку 5.7.

Таблиця 5.7. Міцнісні характеристика зразків серії 1.2.

Висота досліджуваного шару зразка	Результати випробувань зразків неруйнівним методом, МПа		
	Зразок №1	Зразок №2	Середня міцніс досліджуваног шару зразка
1	2	3	4
від 1 до 4 см	19,9	22,4	21,2
від 5 до 8 см	21,2	23,2	22,2
від 9 до 12 см	20,0	20,6	20,3
від 13 до 16 см	20,0	22,1	21,1
від 17 до 20 см	22,0	22,9	22,5
від 21 до 24 см	21,6	23,0	22,3
від 25 до 28 см	38,5	43,4	41,0
від 39 до 32 см	38,0	44,1	41,1
від 33 до 36 см	44,2	45,4	44,8
від 37 до 40 см	45,1	49,2	47,2
Середнє значення міцності зразків	29,1	31,6	

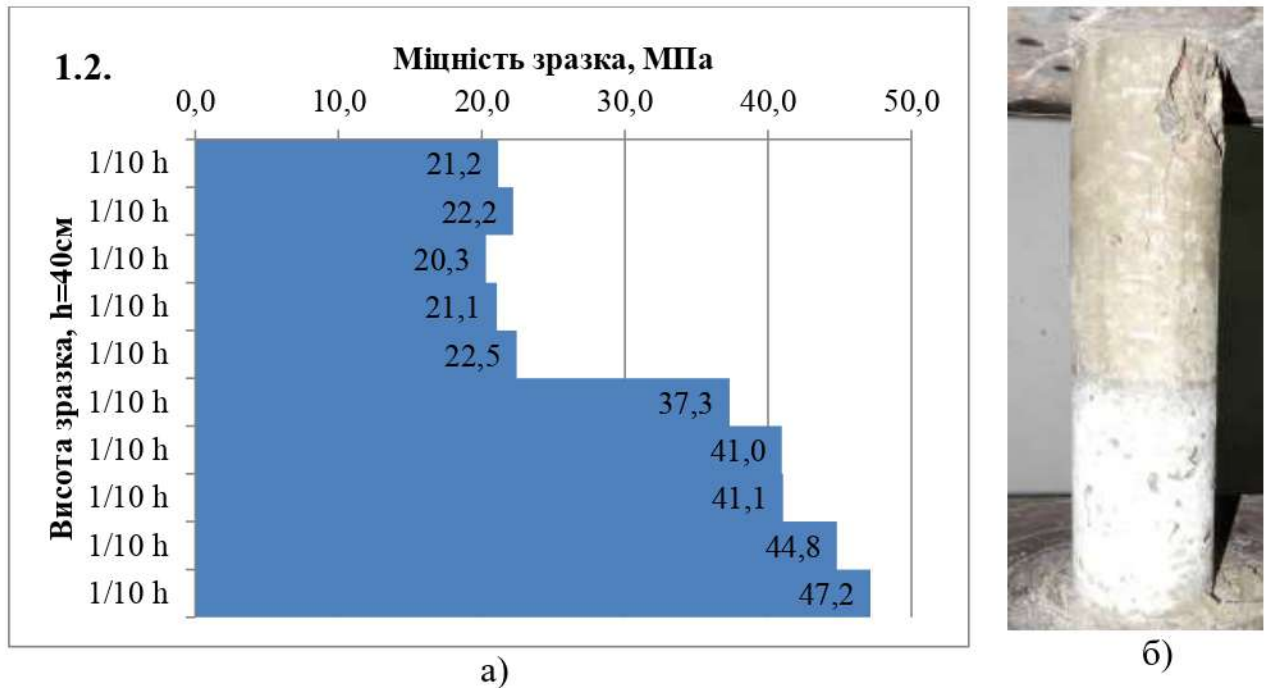


Рисунок 5.7. Характер руйнування зразків циліндрів серії 1.2.

а) графік коливання міцності по висоті зразка; б) характер руйнування зразка після випробування на стиск.

Характер руйнування зразка обернено пропорційний зразкам 1.1., він також зруйнувався в місці ослаблення міцності, а середнє значення несучої міцності бетону мінімальне в порівнянні з іншими зразками серії і дорівнює 19,22 МПа.

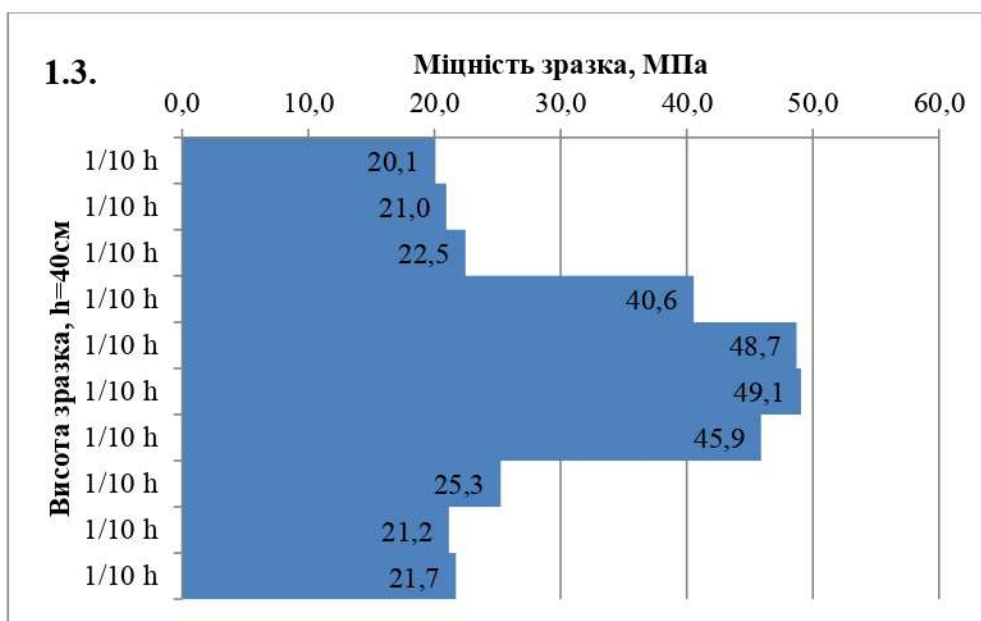
Результати випробувань зразків циліндрів серії 1.3., з ослаблення міцності бетону у верхній та нижній частині зразка на 1/4 висоти, характер руйнування та результати наведені в таблиця 5.8. та на рисунку 5.8.

Продовження таблиці 5.8.

1	2	3	4
від 13 до 16 см	40,7	40,4	40,6
від 17 до 20 см	48,5	48,9	48,7
від 21 до 24 см	48,3	49,8	49,1
від 25 до 28 см	47,2	44,6	45,9
від 39 до 32 см	23,4	27,1	25,3
від 33 до 36 см	22,1	20,2	21,2
від 37 до 40 см	22,7	20,7	21,7
Середнє значення міцності зразків	31,9	31,0	

Таблиця 5.8. Міцнісні характеристики зразків серії 1.3.

Висота досліджуваного шару зразка	Результати випробувань зразків неруйнівним методом, МПа		
	Зразок №1	Зразок №2	Середня міцність досліджуваного шару зразка
1	2	3	4
від 1 до 4 см	20,2	19,9	20,1
від 5 до 8 см	20,1	21,8	21,0
від 9 до 12 см	22,3	22,6	22,5



а)



б)

Рисунок 5.8. Характер руйнування зразків циліндрів серії 1.3.

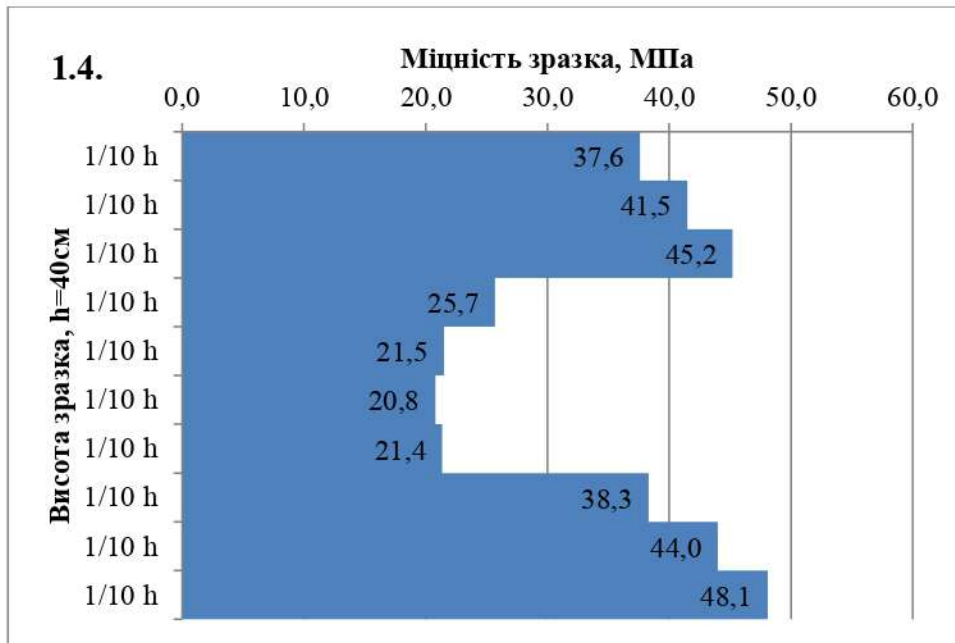
а) графік коливання міцності по висоті зразка; б) характер руйнування зразка після випробування на стиск.

Зразок 1.3 зруйнувався зверху, в місці штучного ослаблення, та середнє значення несучої міцності дорівнює 26,84 МПа.

Результати випробувань зразків-циліндрів серії 1.4., тобто останніх зразків з послабленням міцності по висоті, нижча якість бетону висотою  $1/2 h$ , що розташована всередині зразка, характер руйнування та результати наведені в таблиця 5.9. та на рисунку 5.9.

Таблиця 5.9. Міцнісні характеристика зразків серії 1.4.

Висота досліджуваного шару зразка	Результати випробувань зразків неруйнівним методом, МПа		
	Зразок №1	Зразок №2	Середня міцність досліджуваного шару зразка
1	2	3	4
від 1 до 4 см	37,7	37,5	37,6
від 5 до 8 см	44,0	39,0	41,5
від 9 до 12 см	44,7	45,7	45,2
від 13 до 16 см	25,2	26,2	25,7
від 17 до 20 см	20,0	23,0	21,5
від 21 до 24 см	20,5	21,1	20,8
від 25 до 28 см	21,3	21,4	21,4
від 30 до 32 см	38,3	38,3	38,3
від 33 до 36 см	39,0	49,0	44,0
від 37 до 40 см	47,6	48,6	48,1
Середнє значення міцності зразків	33,8	35,0	



а)

б)

Рисунок 5.9. Характер руйнування зразків циліндрів серії 1.4.

а) графік коливання міцності по висоті зразка; б) характер руйнування зразка після випробування на стиск.

Зразок 1.4 втратив несучу здатність при навантаженні 19,58 МПа. Характер руйнування – косий зріз в центральній частині зразка, в межах ослаблення міцності бетону.

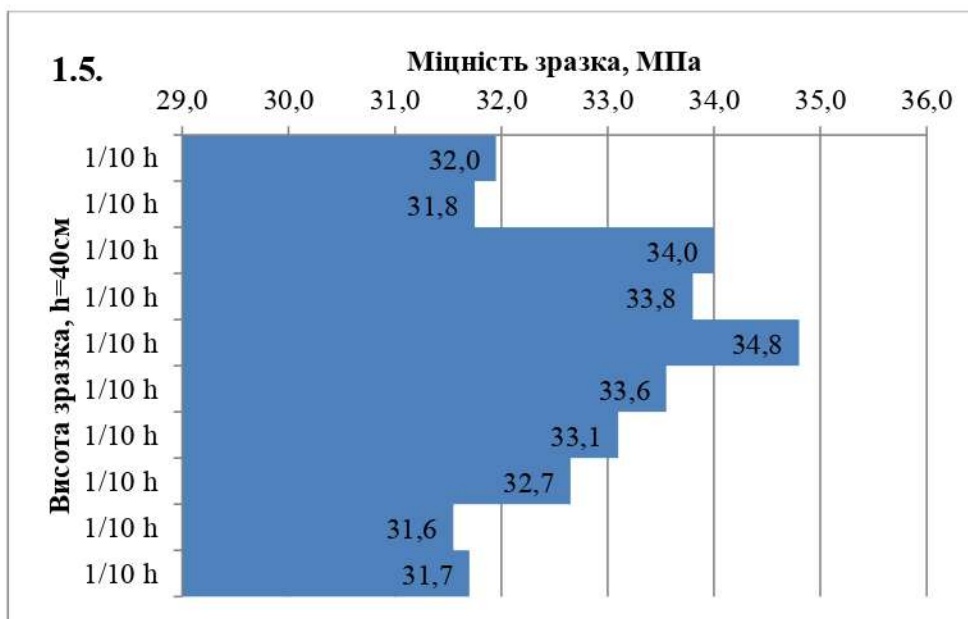
Результати випробувань контрольних зразків циліндрів 1.5., з однорідною міцністю по висоті зразка, наведені в таблиця 5.10. та на рисунку 5.10.

Таблиця 5.10. Міцнісні характеристики зразків серії 1.5.

Висота досліджуваного шару зразка	Результати випробувань зразків неруйнівним методом, МПа		
	Зразок №1	Зразок №2	Середня міцність досліджуваного шару зразка
1	2	3	4
від 1 до 4 см	32,5	31,4	32,0
від 5 до 8 см	31,8	31,7	31,8
від 9 до 12 см	35,1	32,9	34,0
від 13 до 16 см	35,3	32,3	33,8
від 17 до 20 см	36,8	32,8	34,8
від 21 до 24 см	34,4	32,7	33,6
від 25 до 28 см	35,1	31,1	33,1
від 39 до 32 см	32,6	32,7	32,7
від 33 до 36 см	31,5	31,6	31,6
від 37 до 40 см	31,6	31,8	31,7
Середнє значення міцності зразків	33,7	32,1	

Таблиця 5.10. Міцнісні характеристика зразків серії 1.5.

Висота досліджуваного шару зразка	Результати випробувань зразків неруйнівним методом, МПа		
	Зразок №1	Зразок №2	Середня міцність досліджуваного шару зразка
1	2	3	4
від 1 до 4 см	32,5	31,4	32,0
від 5 до 8 см	31,8	31,7	31,8
від 9 до 12 см	35,1	32,9	34,0
від 13 до 16 см	35,3	32,3	33,8
від 17 до 20 см	36,8	32,8	34,8
від 21 до 24 см	34,4	32,7	33,6
від 25 до 28 см	35,1	31,1	33,1
від 39 до 32 см	32,6	32,7	32,7
від 33 до 36 см	31,5	31,6	31,6
від 37 до 40 см	31,6	31,8	31,7
Середнє значення міцності зразків	33,7	32,1	



а)

б)

Рисунок 5.10. Характер руйнування зразків циліндрів серії 1.5.

а) графік коливання міцності по висоті зразка; б) характер руйнування зразка після випробування на стиск.

Зразок 1.5. втратив несучу здатність при навантаженні 24,57 МПа, зразок не зруйнувався повністю, утворилась тріщина косою зрізу.

Отже, з результатів випробувань серії зразків циліндрів можна зробити висновок, що при пошаровому бетонуванні чітко виражені шари, це і підкреслює введення пігменту. Це підтверджує введений пігмент. Але неочікуваним є кращий результат за міцністю який показали зразки серії 1.3., що перевершує за міцністю на 9,3 % контрольні зразки серії 1.5. Така ж тенденція спостерігається для зразків випробуваних як в 2 доби так і в 28 діб.

### 5.2.2. Результати експериментальних досліджень зразків-призм висотою 400 мм

Дослідження проводились на зразках-призмах з важкого бетону відповідно до ДСТУ Б В.2.7-214:2009 та EN 12390-3 [61, 62].



Рис. 5.11. Серія досліджуваних зразків призм

Для виділення шарів, було введено 1% від маси цементу пігменту, зразки призми зображено на рисунку 5.12.

Для визначення мінливості міцності по висоті зразків, неруйнівним методом, виготовлено по 2 зразки кожного виду, досліджено та знайдено середнє значення. Розглянемо характер руйнування та результати випробувань зразків призм серії 2.1. таблиця 5.11. та на рисунку 5.13 [71, 72].



Рис. 5.12. Серія зразків призм бетонних висотою 400 мм з введенням пігменту

Таблиця 5.11. Міцнісні характеристики зразків серії 2.1.

Висота досліджуваного шару зразка	Результати випробувань зразків неруйнівним методом, МПа		
	Зразок №1	Зразок №2	Середня міцність досліджуваного шару зразка
1	2	3	4
від 1 до 4 см	38,20	33	35,60
від 5 до 8 см	41,20	41,7	41,45
від 9 до 12 см	42,50	46	44,25
від 13 до 16 см	44,30	41,6	42,95
від 17 до 20 см	40,70	37,4	39,05
від 21 до 24 см	23,20	22,3	22,75
від 25 до 28 см	20,40	22	21,20
від 39 до 32 см	21,50	23,1	22,30
від 33 до 36 см	21,70	24,1	22,90
від 37 до 40 см	22,80	23,5	23,15
Середнє значення міцності зразків	31,65	31,47	

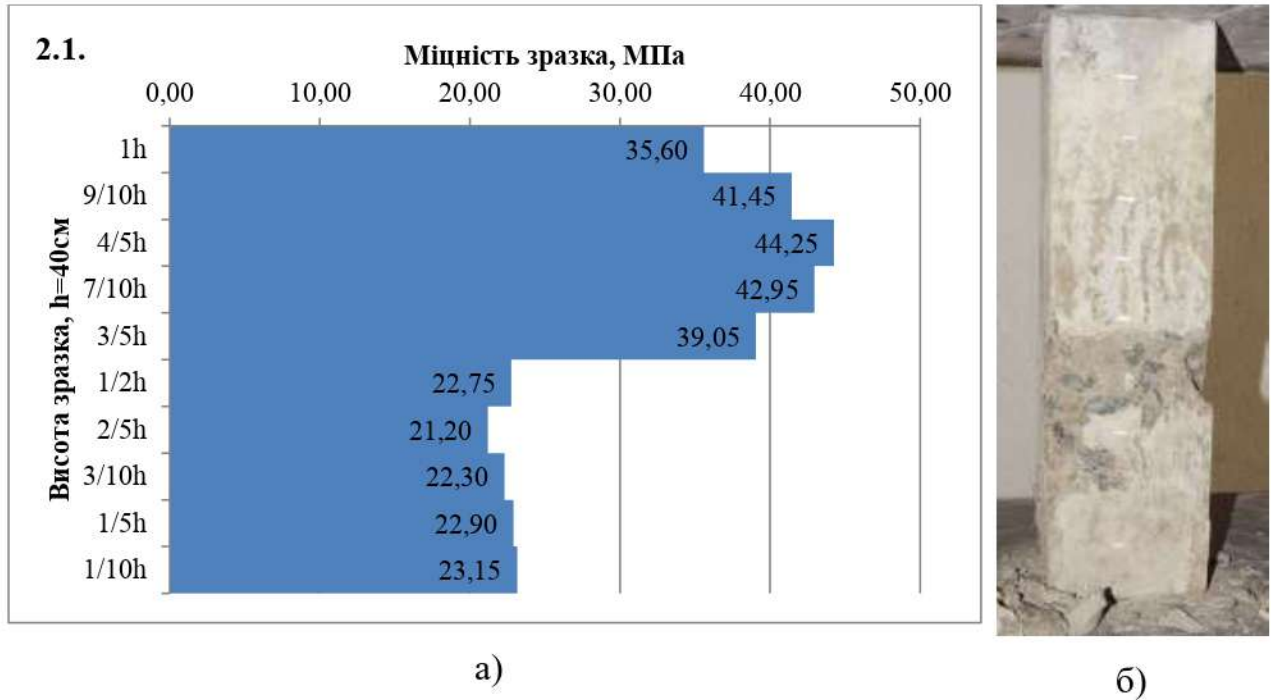


Рисунок 5.13. Характер руйнування зразків.

а) графік коливання міцності по висоті зразка; б) характер руйнування зразка після випробування на стиск.

Зразок зруйнувався в місці штучного ослаблення. Верхня частина зразка залишилась не ушкоджена. Середнє значення міцності бетону мінімальне серед серії зразків-призм у віці 28 діб 15,96 МПа. Неруйнівним методом випробування показали різку зміну міцності в місці розмежування бетонів.

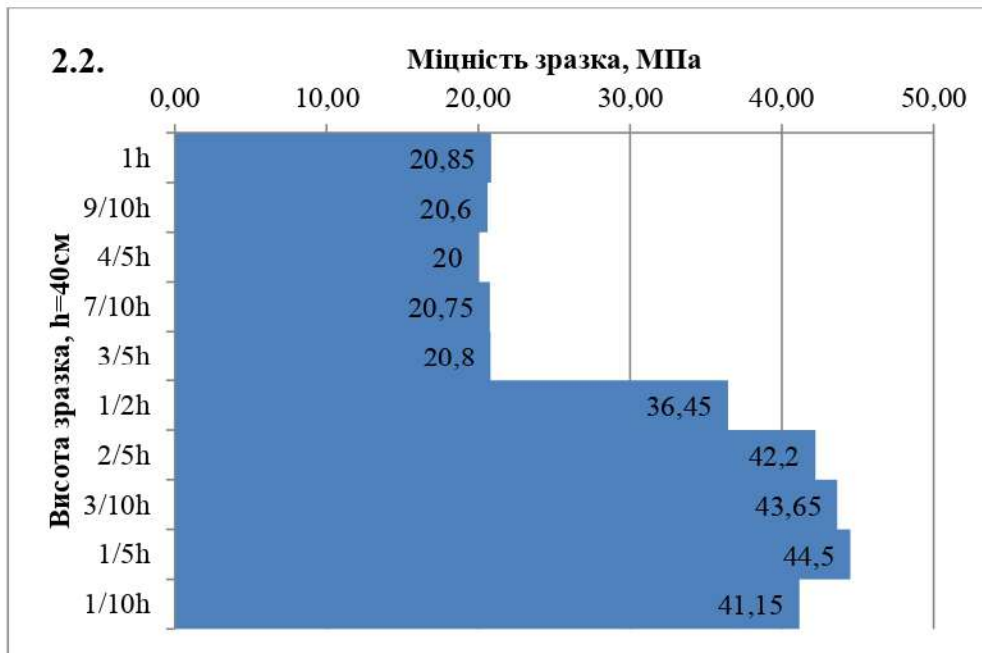
Розглянемо характер руйнування та результати випробувань зразків циліндрів серії 2.2., з ослаблення міцності бетону в верхній половині зразка, результати наведені в таблиця 5.12. та на рисунку 5.14.

Таблиця 5.12. Результати випробувань зразків-серії 2.2.

Висота досліджуваного шару зразка	Результати випробувань зразків неруйнівним методом, МПа		
	Зразок №1	Зразок №2	Середня міцність досліджуваного шару зразка
1	2	3	4
від 1 до 4 см	21,3	20,4	20,85
від 5 до 8 см	21,4	19,8	20,6

## Продовження таблиці 5.12

1	2	3	4
від 9 до 12 см	22,9	17,1	20
від 13 до 16 см	22,2	19,3	20,75
від 17 до 20 см	19,8	21,8	20,8
від 21 до 24 см	30,9	42	36,45
від 25 до 28 см	41,4	43	42,2
від 39 до 32 см	42,3	45	43,65
від 33 до 36 см	43,6	45,4	44,5
від 37 до 40 см	41,4	40,9	41,15
Середнє значення міцності зразків	30,72	31,47	



а)

б)

Рисунок 5.14. Характер руйнування зразків призм серії 2.2.

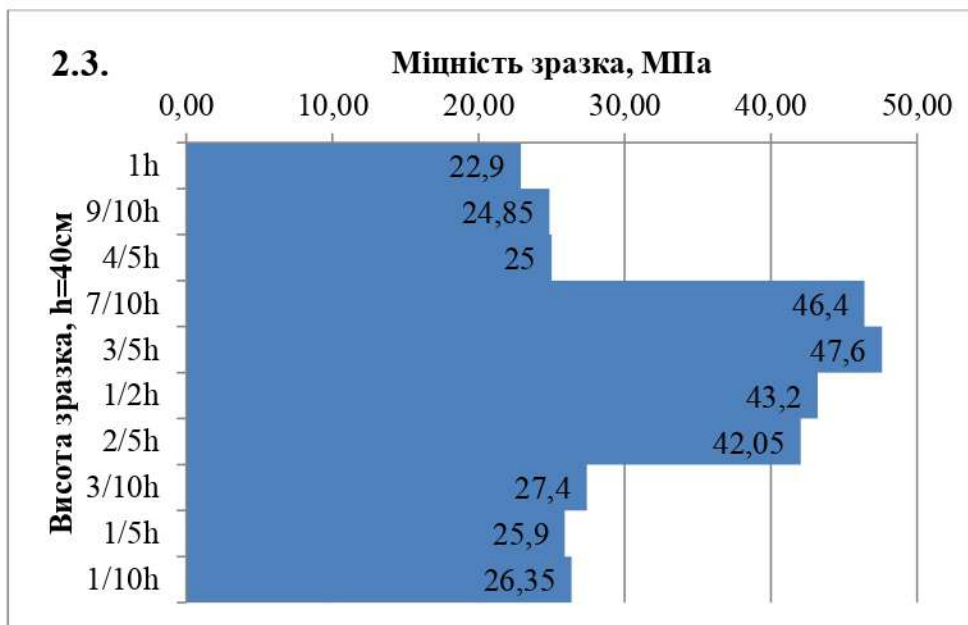
а) графік коливання міцності по висоті зразка; б) характер руйнування зразка після випробування на стиск.

Зразки руйнувалися в місці ослаблення міцності, характер руйнування – косий зріз. Середнє значення міцності бетону у віці 28 діб становить 18,99 МПа.

Результати випробувань зразків циліндрів серії 2.3., з ослаблення міцності бетону у верхній та нижній частині зразка на 1/4 висоти, характер руйнування та результати наведені в таблиця 5.13. та на рисунку 5.15.

Таблиця 5.13. Міцнісні характеристики зразків серії 2.3.

Висота досліджуваного шару зразка	Результати випробувань зразків неруйнівним методом, МПа		
	Зразок №1	Зразок №2	Середня міцність досліджуваного шару зразка
1	2	3	4
від 1 до 4 см	23,5	22,3	22,9
від 5 до 8 см	25,6	24,1	24,85
від 9 до 12 см	24,6	25,4	25
від 13 до 16 см	47,9	44,9	46,4
від 17 до 20 см	46,1	49,1	47,6
від 21 до 24 см	43	43,4	43,2
від 25 до 28 см	39,5	44,6	42,05
від 29 до 32 см	28,7	26,1	27,4
від 33 до 36 см	27,6	24,2	25,9
від 37 до 40 см	28,6	24,1	26,35
Середнє значення міцності зразків	33,51	32,82	



а)

б)

Рисунок 5.15. Характер руйнування зразків призми серії 2.3.

а) графік коливання міцності по висоті зразка; б) характер руйнування зразка після випробування на стиск.

Зразки серії 2.3 зруйнувався зверху, в місці штучного ослаблення, характер руйнування схожий на руйнування кубика. Середнє значення несучої міцності бетону у 2 доби 6,6 МПа та 20,47 МПа у віці 28 діб.

Результати випробувань зразків призм останніх в серії з послабленням міцності по висоті 1.4., з слабша якість бетону висотою  $1/2 h$ , що розташована всередині зразка, характер руйнування та результати наведені в таблиця 5.14. та на рисунку 5.16.

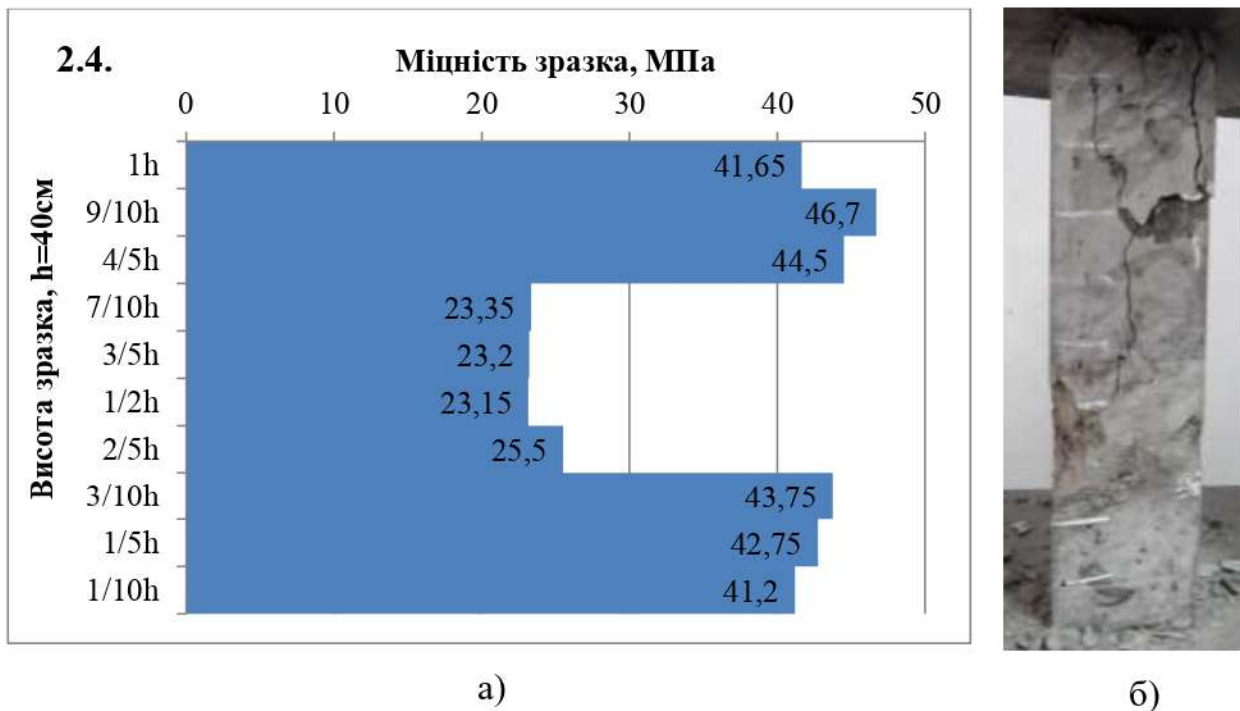


Рисунок 5.16. Характер руйнування зразків циліндрів серії 2.4.

а) графік коливання міцності по висоті зразка; б) характер руйнування зразка після випробування на стиск.

Таблиця 5.14. Міцнісні характеристика зразків серії 2.4.

Висота досліджуваного шару зразка	Результати випробувань зразків неруйнівним методом, МПа		
	Зразок №1	Зразок №2	Середня міцність досліджуваного шару зразка
1	2	3	4
від 1 до 4 см	40,1	43,2	41,65
від 5 до 8 см	44,1	49,3	46,7
від 9 до 12 см	48,9	40,1	44,5
від 13 до 16 см	22,4	24,3	23,35
від 17 до 20 см	22,1	24,3	23,2
від 21 до 24 см	21,4	24,9	23,15
від 25 до 28 см	25,5	25,5	25,5
від 39 до 32 см	47,1	40,4	43,75
від 33 до 36 см	48,4	37,1	42,75
від 37 до 40 см	44,2	38,2	41,2
Середнє значення міцності зразків	36,42	34,73	

Зразки серії 2.4 витримали максимальне руйнуюче навантаження в порівнянні з іншими зразками серії у 2 доби 10,86 МПа та у 28 діб 22,80 МПа. Характер руйнування – тріщина з верху зразка до нижнього шару.

Зразки серії 2.5., контрольні зразки, втратив несучу здатність при навантаженні 10,72 МПа у віці 2 доби та 22,53 МПа у віці 28 діб, зразок не зруйнувався повністю, утворилась тріщина косого зрізу.

Отже, з результатів випробувань серії зразків призм можна зробити висновок, що при пошаровому бетонуванні чітко виражені шари, що чітко підкреслило введення пігменту та характер руйнування зразків. Але неочікуваним є кращий результат за міцністю який показали зразки серії 2.4 на 1,2 % у порівнянні з контрольними зразками. Тенденція мінливості міцності по висоті зразків однакова для зразків випробуваних у віці 2 доби та 28 діб.

### 5.3. Співвідношення міцності зразків циліндрів та зразків призм

Основною метою роботи було знайти переваги та недоліки при пошаровому бетонуванні зразків. Виконано серію експериментів в результаті якої бажаним результатом є отримання певної залежності.

Не беручи до уваги переріз зразків, висота зразків рівна, розраховуємо співвідношення міцності зразків циліндрів та зразків призм після випробування у віці 28 діб. Розраховано середнє значення з 2-х випробуваних зразків у кожній серії. Узагальнені результати випробувань зразків на міцність в таблиці 5.15.

Розрахунок співвідношення міцності виконано відповідно до рекомендацій EN 206 та fib Model Code 2010 [65, 73].

Таблиця 5.15. Середні результати випробувань трьох серій зразків на стиск к віці 28 діб

№ серії	Міцність зразків-циліндрів, МПа	Міцність зразків призм, МПа
1	2	4
1.	20,96	15,96
2.	19,22	18,99
3.	26,84	20,47
4.	19,58	22,80
5.	24,57	22,53

Так як витрата цементу для бетонування кожного з зразків серії однакова, а міцність у віці 28 діб суттєво відрізняється це дасть можливість знайти співвідношення міцності бетону зразків різного перерізу.

Результати розрахунку наведено у таблиці 5.16.

Таблиця 5.16. Співвідношення міцності

№ серії	Співвідношення міцності зразків циліндрів до міцності зразків призм				
Серії	1.	2.	3.	4.	5.
Значення співвідношення	0,76	0,99	0,76	1,16	0,92

Так як, розбіжність даних занадто велика, прийти до одного значення, яке підійшло б всій серії зразків важко, так як на міцність зразків в цілому суттєво впливала висота та спосіб заповнення бетоном. Але беручи до уваги що зразки-призми та зразки-циліндри серії 5 однорідної міцності, то приймаємо співвідношення міцності рівне 0,92 для важких бетонів[73, 74].

## РОЗДІЛ 6

### ОХОРОНА ПРАЦІ

#### 6.1. Бетонні роботи

Під час виконання робіт з приготування, транспортування, укладання та догляду за бетоном і будівельними розчинами, а також при заготівлі, монтажі арматурних конструкцій та встановленні чи демонтажі опалубних систем, необхідно передбачати заходи з мінімізації ризиків для персоналу від впливу виробничих факторів підвищеної небезпеки та шкідливості [75–77]. До переліку цих ризиків відносяться [76, 78]:

- розташування робочих зон поблизу перепадів висоти, що перевищують 1,3 м;
- рух технологічного обладнання та операції з переміщення вантажів;
- потенційна загроза обвалення елементів будівельних конструкцій та опалубки;
- екстремально підвищена температура арматури під час робіт з попереднім термонапруженням;
- підвищений рівень шуму, вібрації та незадовільне освітлення робочих просторів;
- несприятливі кліматичні умови;
- імовірність ураження персоналу електричним струмом через підвищену напругу в електромережі.

Гарантування безпеки при здійсненні бетонних робіт повинно бути забезпечено відповідно до положень проектної та технологічної документації [75, 76]. При цьому обов'язково передбачити:

- ідентифікацію небезпечних зон та методикау їх маркування (наприклад, шляхом огороження) [77];
- безпечні та ефективні способи механізації процесів приготування, транспортування, подачі та укладання бетонної суміші [79];

- параметри несучої здатності, міцності та стійкості опалубних систем, а також регламент їхнього монтажу та демонтажу [80];
- оптимальну послідовність монтажу арматурних конструкцій [76];
- комплекс заходів та засобів безпеки при виконанні робіт на висоті [78];
- організацію безпечного догляду за бетоном впродовж усього календарного року [75].

Зберігання цементу необхідно організовувати в закритих резервуарах (силосах, бункерах, ларях або інших відповідних ємностях) з метою запобігання розпиленню матеріалу під час завантажувально-розвантажувальних операцій [81]. Завантажувальні прорізи слід оснащувати захисними ґратами, що блокуються за допомогою замків.

При застосуванні парового обігріву заповнювачів у бункерах або інших спеціалізованих ємностях, слід унеможливити проникнення пари до робочих приміщень [82]. Допуск персоналу до парових камер допускається виключно після повного припинення подачі пари, а також охолодження камери та розміщених у ній матеріалів до температури, що не перевищує +40 °С [76, 83].

## **6.2. Виконання будівельних робіт**

### **• Підготовчий етап та обов'язки керівника**

До того як приступити до бетонування, відповідальна особа має переконатися у безпеці майданчика [84]:

- **Інспекція конструкцій:** Перевірити надійність та цілісність опалубки, стійкість риштувань та наявність захисних бар'єрів на робочих рівнях [85].
- **Справність техніки:** Проконтролювати робочий стан бетононасосів, маніпуляторів, а також цілісність тари й бункерів [86].
- **Екіпірування:** Видати персоналу необхідні засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) [87].

### **• Експлуатація змішувального обладнання**

Під час роботи з бетонозмішувачами діють суворі правила очищення [88]:

- Прямки дозволяється чистити лише за умови, що ківш надійно зафіксований [89].

- Будь-які маніпуляції всередині барабанів чи корит можливі тільки після повної зупинки агрегату та знеструмлення мережі [90].

- **Робота з арматурою**

Для безпечної заготівлі та монтажу металевих елементів необхідно [91]:

- **Зонування:** Огороджувати ділянки, де розмотують бухти або вирівнюють пруту [92].

- **Захист від уламків:** Під час нарізання дрібних деталей (менше 30 см) використовувати спеціальні захисні пристрої [93].

- **Безпека на верстатах:** Відокремлювати робочі зони двобічних верстатів сіткою (від 1 м заввишки) та ізолювати виступаючі частини стержнів [94].

- **Логістика:** Зберігати арматуру виключно у визначених зонах, а в місцях проходів (шириною понад 1 м) обов'язково закривати торці прутів [95].

- **Транспортування:** Кріплення та підйом арматурних конструкцій краном мають здійснювати лише кваліфіковані стропальники [96].

- **Монтаж та висотні роботи**

- **Робочі зони:** Встановлення каркасів для стін чи колон проводиться з огорожених помостів (ширина  $\geq 0,8$  м), розташованих із кроком по висоті не більше 2 м [97].

- **Страховання:** При роботі висоті робоче повинно бути огороженим. Якщо це неможливо або поверхня має ухил понад  $20^\circ$ , обов'язковим є використання страховальних поясів і канатів, закріплених згідно з техкартою [98].

- **Спеціальні умови та завершення монтажу**

- **Зварювання:** У приміщеннях де проводять зварювальні роботи, робочі місця повинні бути захищені вогнетривкими перегородками [99].

- **Фіксація:** Арматурні блоки формують у пакети, зручні для підйому та перевезення [100].

- **Заборона доступу:** Поки арматурні блоки не будуть остаточно закріплені, перебувати на них або поблизу них суворо заборонено [101].

Пересування територією, де покладена арматура, дозволяється винятково по спеціально змонтованих міцних настилах завширшки від 0,6 метра, які мають бути надійно зафіксовані на самому каркасі [102]. Для запобігання випадковим травмам усі арматурні випуски з плит, що підіймаються над бетоном на висоту до одного метра, обов'язково захищаються м'якими трубками або іншими пристосуваннями [103]. Під час встановлення фіксаторів чи підкладок під арматурні сітки слід використовувати спеціальні подовжувачі, що гарантує стабільність конструкції та безпеку працівника [104].

Процес зведення монолітних споруд планується таким чином, щоб монтаж сходових кліток не відставав від основних робіт більше ніж на один поверх [105]. Усі шляхи підйому персоналу на робочі яруси мають бути чітко прописані у Проекті виконання робіт [106]. При цьому опалубка для вертикальних елементів обладнується надійними площадками та драбинами для зручного доступу, а алгоритми захисту від падіння людей чи елементів конструкцій під час їх монтажу та демонтажу детально фіксуються в технологічних картах [107].

Робота з бетонною сумішшю також вимагає суворої дисципліни [108]: переміщувати бункери в будь-якому стані можна лише з щільно закритим затвором [109]. Під час вивантаження суміші важливо тримати край бункера на відстані не більше одного метра від поверхні, якщо інше не обумовлено проектною документацією [110]. Експлуатація бетононасосів дозволяється лише за умови справної сигналізації та після перевірки міцності всіх замкових з'єднань системи [111].

Перед початком бетонування з використанням віброхобота обов'язково перевіряється надійність кріплення його секцій та стан страхувального каната [112]. До всіх вертикальних ділянок бетоноводів має бути забезпечений вільний доступ для огляду [113]. Важливо пам'ятати, що будь-які роботи з розбирання магістралей можливі лише після повного скидання тиску всередині них [114]. Під час фінального продування системи персонал повинен відійти на безпечну

відстань від 10 метрів, а самі труби мають лежати на спеціальних підкладках для амортизації динамічних ударів [115].

Процес усунення заторів у бетоноводі за допомогою стисненого повітря вимагає особливої обережності [116]: використання захисного щита, відведення людей на відстань понад 10 метрів та суворого контролю за тиском. У разі невдалої спроби продування тиск негайно скидають до нуля, після чого вручну роз'єднують секції для очищення або заміни пошкодженої ділянки [117]. Будь-які маніпуляції з обладнанням, ремонт або перевірка з'єднань під час роботи системи суворо заборонені [118].

Зведення багатоярусної опалубки має відбуватися виключно за інструкціями заводу-виробника, а її демонтаж розпочинають лише після того, як бетон набере не менше 70% своєї міцності [119]. Під час розбирання конструкцій критично важливо забезпечити захист персоналу від падіння та унеможливити обвалення елементів риштувань [120]. Аналогічно, використання самопідіймальної чи ковзної опалубки регулюється технічними приписами виробника, при цьому під час руху секцій на них заборонено перебувати будь-кому, крім відповідального персоналу [121].

Під час безпосередньої роботи з бетоном переміщення електровібраторів дозволяється лише за допомогою спеціальних тяг [122]. При кожному переході з місця на місце або під час паузи в роботі пристрої слід вимикати [123]. Окрему увагу приділяють стану електрокабелів, оскільки експлуатація обладнання з пошкодженою ізоляцією є неприпустимою та небезпечною для життя [124].

Процедура електропрогрівання бетону вимагає найвищого рівня обережності, тому до монтажу та підключення обладнання допускаються лише кваліфіковані фахівці з групою електробезпеки не нижче III [126]. Територія робіт обов'язково обноситься захисним бар'єром із попереджувальними знаками та червоними лампами, які мають бути синхронізовані з системою автоматичного відключення напруги у разі їх несправності. Для живлення використовують виключно цілісні ізольовані кабелі у захисних шлангах, які заборонено класти безпосередньо на землю чи легкозаймисті матеріали. Весь

процес проходить під цілодобовим наглядом чергових електромонтерів, а доступ іншого персоналу можливий лише за спеціальним нарядом-допуском. Вимірювати температуру бетону дозволяється тільки після повного знеструмлення або зниження напруги до безпечного рівня 25 В, при цьому всі відкриті металеві частини арматури мають бути [126]. Після кожного переміщення техніки стан мережі та опір ізоляції підлягають обов'язковій перевірці [127].

Погодні умови також суттєво впливають на безпеку: виконання будь-яких бетонних робіт на рихтуваннях забороняється під час грози, ожеледиці, сильного туману або при вітрі, швидкість якого перевищує 12 м/с [128]. При проведенні супутніх робіт, наприклад, свердлінні отворів алмазними коронками, необхідно заздалегідь огорожувати небезпечні зони, де можливе падіння відпрацьованого керна [129].

Особливі правила діють для роботи з гідравлічними маніпуляторами стріло-розподільників [130]. Персоналу категорично заборонено перебувати під стрілою або в радіусі 4 метрів від шланга. Роботи не проводяться в охоронних зонах ЛЕП, при критично низьких температурах або сильному вітрі, що виходить за межі паспортних даних обладнання. Також неприпустимо перевищувати встановлені норми навантаження чи наближатися до рухомих частин механізму ближче ніж на 1 метр. До керування такою технікою залучаються лише особи, які пройшли спеціалізоване навчання та детальний інструктаж [131].

### **6.3. Вимоги до робочих місць**

При бетонуванні перекриттів обов'язковою умовою є встановлення захисних огорожень по всьому периметру опалубки [87, 108]. Будь-які технологічні отвори в настилі мають бути щільно закриті щитами, а ті, що потребують постійного доступу повітря чи світла, — міцними ґратами [90, 110]. Зони, де розташовані опорні стійки опалубки, позначаються заборонними знаками, а доступ сторонніх осіб до них суворо обмежується [107, 115].

Якщо монтаж стін, колон або ригелів вимагає перебування працівника поза основною підлогою, необхідно заздалегідь облаштувати робочі помости шириною не менше 0,8 м [90, 110]. Такі конструкції повинні мати суцільне огороження та бути розрахованими на специфічні навантаження, визначені проектною документацією [84, 85]. При роботі з ковзною опалубкою важливо захистити торцеві сторони після демонтажу її частин, а для безпеки людей на підвісних риштуваннях — встановити захисні козирки, що повністю перекривають ширину робочої зони [108, 110].

Усі процеси, пов'язані з переміщенням вантажів, використанням строп та тари для бетону, мають суворо відповідати державним нормам безпеки [87, 89, 95, 96]. На ділянках, де відбувається натягування арматури, встановлюються високі захисні бар'єри заввишки не менше 1,8 м, а обладнання оснащується звуковою або світловою сигналізацією [87, 112]. Під час термічного нагріву стержнів заборонено наближатися до них на відстань менше одного метра [104, 105].

Збирання великих арматурних каркасів має відбуватися виключно на спеціально підготовлених майданчиках [84, 87]. Якщо до складу бетонної суміші входять хімічні добавки, персонал зобов'язаний використовувати засоби індивідуального захисту, зокрема захисні окуляри та рукавички [119, 121]. Окремі вимоги діють для естакад: вони обладнуються відбійними брусами з обов'язковими проходами для людей шириною не менше 0,6 м, а на тушкових ділянках — поперечними стопорами [87, 110]. Під час очищення кузовів автосамоскидів від залишків бетону працівникам категорично заборонено перебувати безпосередньо в кузові або на ньому [87, 117].

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В магістерській кваліфікаційній роботі досліджувались міцнісні характеристик 2 серії зразків важких бетонів з використанням пігментів на зразках різної форми, тобто призмах та циліндрах висотою 400 мм, отримані результати дають можливість зробити висновки:

- При випробуванні зразків-циліндрів на стиск кращий результат за міцністю показали зразки серії 1.3., що перевершує за міцністю на 9,2 % контрольні зразки серії 1.5. а кращий результат за міцністю який показали зразки-призми серії 2.4 на 1,2 % у порівнянні з контрольними зразками; ця тенденція спостерігається для зразків випробуваних в 2 та 28 діб.

- При випробуванні зразків неруйнівним методом кращий результат за середньою міцністю показали зразки-циліндри серії 1.4. 34,40 МПа, що перевершує за міцністю на 4,25 % контрольні зразки серії 1.5. а кращий результат серед зразків-призм показали серії 2.4 35,48 Мпа, що на 5,42 % більше міцності контрольних зразків.

- Приймаємо співвідношення міцності для важких бетонів зразків-циліндрів та зразків-призми для серії 1.5 та 2.5 однорідної міцності, яке рівне 0,92;

- Введення пігменту показало межі розділення бетонів при пошаровому бетонуванні, що обґрунтувало мінливість міцності зразків по висоті. Також кількість введеного пігменту не мала вплив на міцність.

Із цього можна зробити висновок, що для підвищення несучої здатності зразків циліндрів або призм можна та збереженні витрати бетону можна їх підситити по краях зразка, або в середині.