

Міністерство освіти і науки України
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: **«Оптимізація складів бетонів тротуарних
виробів для Національного університету
«Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»**

Виконав:	В.В. Мелешко
студент групи 601-БТ	
спеціальності 192 – будівництво та цивільна інженерія, ОП «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів»	
Керівник	О. В. Демченко
Завідувач кафедри	О. В. Семко

Полтава 2026

Зміст

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	7
1.1. Технологія отримання тротуарної плитки литтєвим способом та оптимізація бетонних сумішей.....	7
1.2. Вплив заповнювачів на основні властивості бетонів.....	9
1.3. Властивості крупних та дрібних заповнювачів для бетонів	15
1.4. Вплив заповнювачів на міцність високоміцних бетонів	23
1.5. Оптимальний підбір складу заповнювачів для бетонів підвищеної міцності (поліфракційний).....	25
1.6. Одержання бетонів підвищеної міцності на місцевих заповнювачів	26
1.7. Вплив пористих заповнювачів на якість бетону	28
МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	37
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	38
3.1 Характеристика вихідних матеріалів.....	38
3.2. Підбір складу бетонної суміші	47
3.3. Методика виготовлення зразків - кубів.....	50
РОЗДІЛ 4 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ	58
4.1. Характеристика цементу	58
4.2. Характеристика піску	59
4.4. Характеристика піщано - гравійної суміші	63
4.5. Характеристика добавки «Fluid Premia 196»	64
РОЗДІЛ 5 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	66
5.1. Результати визначення середньої густини зразків - кубів.....	66
5.2. Результати визначення міцності на стиск зразків - кубів	72
5.3. Результати визначення міцності зразків - кубів (неруйнівним методом) електронного склерометра ОНІКС - 2.5.....	76
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	85

	4
6.1. Охорона природного довкілля.....	85
6.2. Охорона праці і техніка безпеки	85
6.3. Розрахункові інженерні рішення з охорони праці та техніки безпеки у цеху при виготовленні тротуарної плитки	88
ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	93

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку міської та транспортної інфраструктури України особливої актуальності набуває питання підвищення довговічності та експлуатаційної надійності елементів благоустрою, зокрема тротуарних покриттів. Тротуарна плитка широко застосовується при влаштуванні пішохідних зон, прибудинкових територій, громадських просторів і промислових майданчиків. Ефективність її використання значною мірою визначається фізико-механічними властивостями бетонів, з яких вона виготовляється. Особливого значення це набуває в контексті післявоєнної відбудови інфраструктури, де бетон виступає основним матеріалом для відновлення міського середовища, зокрема у виробництві тротуарної плитки. Якість цього дорожнього покриття безпосередньо залежить від характеристик сировини, оскільки лише використання високоякісних компонентів гарантує міцність, довговічність, морозостійкість та зносостійкість пішохідних зон. Таким чином, розробка бетонів нової генерації, що поєднують у собі екологічну безпеку та економічну ефективність, є пріоритетним напрямком для задоволення потреб сучасного будівництва.

Виробництво бетону дозволяє активно утилізувати техногенні відходи та використовувати місцеві ресурси, що знижує енергоємність галузі та підвищує екологічну безпеку. З огляду на експлуатаційну надійність, цей матеріал безумовно збереже статус ключового конструкційного засобу, особливо в контексті масштабного відновлення інфраструктури у післявоєнний період. Сучасні тенденції розвитку галузі протягом останніх десятиліть зосереджені на створенні бетонів нового покоління, що відповідають високим вимогам динамічного будівництва. Міцність, довговічність і інші характеристики бетону основним чином залежать від якості вихідних матеріалів.

Заповнювачам, що складають скелет конструкції, із зростанням міцності бетону їх механічні властивості відіграють все зростаючу роль. Тому треба приділяти до уваги форми і розміру зерен, кількісному співвідношенню змісту зерен різного

розміру, а також хімічній взаємодії між заповнювачем і цементною матрицею. Та якщо в нормальних стандартних бетонах заповнювач грає роль лише інертного матеріалу, то у високоміцних бетонах якості і властивості заповнювачів вносять значний вклад в досягнення бетоном можливої максимальної міцності. Зерна заповнювача повинні володіти міцністю і по можливості високим модулем крупності. Також необхідно дуже хороше зчеплення між зернами заповнювача і матрицею цементного каменя.

Особливу увагу при проектуванні складів бетонів слід приділяти якості та гранулометричному складу заповнювачів. Для Полтавської області характерним є використання місцевих пісків, які, як правило, мають малий модуль крупності та підвищений вміст дрібних фракцій. Такі особливості сировинної бази ускладнюють отримання бетонів із високими показниками міцності та щільності без застосування спеціальних технологічних прийомів, зокрема оптимізації зернового складу, коригування співвідношення компонентів та використання ефективних хімічних і мінеральних добавок.

У зв'язку з цим актуальним є науково обґрунтований підхід до оптимізації складів бетонів для тротуарних виробів з урахуванням регіональних особливостей сировини Полтавської області. Розв'язання цього завдання сприятиме підвищенню якості та довговічності тротуарної плитки, зниженню її собівартості, раціональному використанню місцевих матеріалів і впровадженню енерго- та ресурсозберігаючих технологій у виробництво бетонних виробів.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Технологія отримання тротуарної плитки литтєвим способом та оптимізація бетонних сумішей

1. Загальні положення виробництва тротуарної плитки

Сучасне виробництво тротуарної плитки базується на застосуванні високопродуктивних технологій виготовлення бетонних виробів, які забезпечують необхідні технічні характеристики, довговічність та привабливий зовнішній вигляд продукції. Одним із провідних способів формування бетонних елементів є литтєвий метод (вібролиття). Цей спосіб передбачає заповнення форм бетонною сумішшю під дією зовнішніх зусиль з одночасним ущільненням матеріалу. Такий підхід дозволяє досягати високої щільності та низької пористості виробів, що є критичними показниками для тротуарної плитки, яка експлуатується в умовах циклічних навантажень та змін температур.

2. Сутність литтєвого способу виробництва

Лиття тротуарної плитки полягає у внесенні попередньо дозованої бетонної суміші у стаціонарні або мобільні форми, де вона піддається механічним коливанням. Вібрація сприяє рівномірному розподілу складових та видаленню повітряних бульбашок, що значно підвищує щільність тіла бетону. У процесі формування важливу роль відіграють параметри вібраційних установок — частота, амплітуда, тривалість дії коливань, що визначають кінцеві властивості виробу.

Згідно з працями фахівців у галузі бетонних технологій, оптимальне ущільнення та формування досягається при поєднанні механічної вібрації і легкого тиску на суміш, що дозволяє отримати виріб з мінімальною кількістю капілярних пустот і максимальною механічною міцністю. Такі вироби характеризуються підвищеною зносостійкістю та підвищеною стійкістю до зовнішнього впливу середовища [4,55].

3. Компоненти бетонної суміші для тротуарної плитки

Якість та технологічність виготовлення бетонних виробів в головному залежать від складу бетонної суміші. Основними складовими є:

цемент — цементні в'язучі забезпечують міцність та зв'язність матеріалу; у більшості випадків використовується портландцемент марок 32,5–42,5;

заповнювачі — піски та щебені фракцій 2–8 мм забезпечують потрібну структуру тіла бетону. Вибір оптимальних фракцій дозволяє мінімізувати пустотність;

пластифікатори та модифікатори — добавки, що покращують реологічні властивості суміші, підвищують рухливість, зменшують водоцементне співвідношення, що веде до підвищення міцності та морозостійкості виробів.

Наукові джерела підкреслюють, що водоцементне співвідношення (В/Ц) є ключовим параметром, який впливає на міцнісні та експлуатаційні характеристики плитки. Зниження В/Ц дозволяє суттєво покращити показники щільності та морозостійкості, проте потребує застосування ефективних пластифікаторів для збереження технологічної рухливості суміші.

4. Питання оптимізації складів бетонів

Оптимізація бетонних сумішей для тротуарних виробів планомірна на досягнення балансу між технологічністю, економічністю та якістю кінцевого продукту. Основні напрямки оптимізації:

а) Застосування хімічних добавок

Широке використання суперпластифікаторів та спеціальних модифікаторів дозволяє досягати потрібної рухливості при зниженому вмісті води. Сучасні дослідження вказують, що правильний вибір типу та дози добавок забезпечує: зменшення В/Ц без втрати оброблюваності; підвищення ранньої міцності; збільшення морозостійкості.

б) Раціональний підбір заповнювачів

Вивчення властивостей різних фракцій щебеню та піску показує, що градація розмірів заповнювачів має істотний вплив на щільність бетону. Більш щільна

упаковка частинок зменшує кількість пустот, що на пряму підвищує міцнісні характеристики готових виробів [12].

в) Використання мінеральних добавок

Додавання летких домішок (наприклад, метакаоліну, золи-вугільної) може покращувати структуру міжфазної зони цементного каменю за рахунок модифікації кристалічної будови гідратних продуктів, що позитивно впливає на довговічність та морозостійкість плитки.

г) Оптимізація технологічних режимів лиття

Удосконалення параметрів вібропресування — амплітуди та частоти вібрації, часу впливу, режимів ущільнення — дозволяє збільшити щільність бетонної маси без додаткового підвищення витрат цементу. Це веде до підвищення міцності при одночасному зниженні собівартості.

1.2. Вплив заповнювачів на основні властивості бетонів

Заповнювачі бувають двох видів: крупний та дрібний. До крупних заповнювачів відносяться щебінь та гравій, це заповнювачі з крупністю зерен понад 5 мм. До дрібного заповнювача належать піски, природні чи штучні.

Так як різні заповнювачі в різних об'ємах по-різному впливають на всі властивості бетону, то до цих заповнювачів пред'являються такі вимоги, які повинні враховувати цей вплив. Будь-який заповнювач є зернистим матеріалом, який є сукупністю всіх зерен та для кожного із заповнювачів є низка загальних закономірностей.

Найбільший вплив на властивості бетону впливає зерновий склад, а також якість та міцність заповнювача.

Зерновий склад – це показник, який визначає вміст у заповнювачі зерен різного розміру. Для того щоб визначити зерновий склад заповнювача, потрібно взяти відповідний обсяг заповнювача для проби і просіяти через стандартні сита, величина отвору яких варіюється від 14 до 70 мм.

Порожнистість заповнювачів - сума обсягу порожніх місць у ситуації, коли наприклад крупний заповнювач насипаний у вільному падінні, без будь-яких

додаткових компонентів. Порожнистість при цьому може становити від 20% до 50%, що зі дуже багато для розрахунку якісного бетону. Тому у складі бетонної суміші використовують кілька видів наповнювачів з різною крупністю зерен.

Наприклад, при змішуванні піску з гравієм, можна з упевненістю сказати, що порожнистість в даному випадку мінімальна, тому що порожнечі, які утворюють зерна гравію, легко заповнюватися зернами піску.

Сучасні уявлення про вплив якості заповнювачів на структуру бетонів, його властивості та можливості їх регулювання у необхідних напрямках розвивалися у дослідженнях відомих учених І.М. Ахвердова, М.В. Зайченко, В.І. Гоца, Ю.М. Дворкін, Р.Ф. Рунова, О.Р. Позняк., В.С. Данюшевського та багатьох інших. Властивості бетонів досить часто залежить від властивостей заповнювачів, що пояснює підвищені вимоги до їх якісних характеристик [6, 12, 40,59].

Особливу увагу якості заповнювача потрібно приділяти при виготовленні високоміцних бетонів які вносять значний вклад в досягнення бетоном можливої максимальної міцності. Зерна заповнювача повинні володіти міцністю і по можливості високим модулем крупності. Також необхідно дуже хороше зчеплення між зернами заповнювача і матрицею цементного каменя.

Під високоміцним бетоном ми розуміємо щільні бетони класу міцності вище - С55 (ця цифра означає характерну міцність на стиск) [19].

На характеристики високоміцного бетону впливають наступні чинники:

- кількість і якість початкових матеріалів - цементу, заповнювачів, наповнювачів і води;

- спосіб приготування суміші;

- умови доквілля;

- умови тверднення бетону;

- дія суб'єктивних чинників (досвід і інтуїція людей).

При цьому практика показала, що при просуванні в екстремальні галузі науки про бетон деякі відомі із застосування нормальних бетонів залежності міняються, втрачаючи або ж, навпаки, придбаваючи в значенні.

Цемент - в якості в'язучих можуть використовуватись в принципі усі стандартні типи цементів. При виборі цементу слід звернути увагу на наступні пункти:

- сумісність цементу і пластифікатора;
- водопотреба або тонкість помелу;
- характер наростання міцності і потрібного значення кінцевої міцності;

Від використаних цементів безпосередньо залежать найважливіші характеристики бетону - міцність, легкоукладальність при низьких В/Ц стосунках, усадка або деформація під тривалим навантаженням.

Найважливішими характеристиками використовуваних у ВМБ цементів є:

- мінералогічний склад клінкеру;
- розмір і співвідношення зерен цементу.

Більшість звичайних цементів можуть бути використані при виробництві високоміцних бетонів. Це можуть бути як портландцементи, так і шлакопортландцементи або пуцоланові цементы. Проте у більшості випадків застосовуються портландцементи зважаючи на високу ранню і 28-добову міцність ВМБ на їх основі. Щоб зменшити тепловиділення при твердненні ВМБ і пов'язані з цим усадку, утворення тріщин, відлущування поверхневого шару, застосовують, особливо в жаркий період, суміш з портланд- і шлакопортландцементу. Хороший результат дає також заміна частини цементу меленими шлаками або золою-віднесенням. В якості мінеральних добавок що використовуються при виробництві високоміцних бетонів: мікрокремнезем, зола-віднесення кам'яного вугілля, метакаолин, нанокремнезем (кремнева кислота) і кам'яне борошно (кварцеве і вапнякове борошно). [38]

Активність цементу - при виробництві бетону основну роль грає активність цементу, або активність іншого використовуваного активного в'язучого компонента суміші. Активність цементу залежить від безлічі чинників. Терміни виготовлення цементу, умови зберігання цементу роблять помітний вплив на його активність. Проте основним чинником, що впливає на активність цементу, є показники його питомої поверхні. Чим вище показники питомої

поверхні, тим вище активність цементу. Спосіб активації цементу методом додаткового помелу базується саме на цьому принципі.

Збільшення питомої поверхні цементу всього на - 2.8 % (з 283 м² /кг до 291 м² /кг) збільшує його активність на - 5 %.

Збільшення активності цементу на - 5% дозволяє одержувати будівельні розчини і бетони, міцність яких в першу добу нормального тверднення збільшується на - 45% від міцності контрольних зразків.

Таким чином, відносно невелике збільшення активності цементу дає відчутний приріст міцності готового матеріалу.

Мікрокремнезем має у даному випадку особливе значення: сферичні частки мікрокремнезема діаметром приблизно 0,2 мікрметра заповнюють порожечі між частками цементу і посилюють зчеплення між зернами заповнювача і цементним каменем за рахунок руйнування низькоміцних кристалів портландита. [

Заповнювачі - із зростанням міцності бетону механічні властивості заповнювачів грають все зростаючу роль. Також треба брати до уваги форму і розмір зерен, кількісне співвідношення змісту зерен різного розміру, а також хімічну взаємодію між заповнювачем і цементною матрицею. І якщо в нормальних бетонах заповнювач грає роль лише інертного матеріалу, то у ВМБ якості і властивості заповнювачів вносять значний вклад в досягнення бетоном можливої міцності. Зерна заповнювача повинні володіти міцністю і по можливості високим модулем крупності. Також необхідно дуже хороше зчеплення між зернами заповнювача і матрицею цементного каменя[5].

Вода для виготовлення бетонної суміші повинна бути звичайна питна вода. Якість води задовольняє вимогам "Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови".

Добавки регулюються ДСТУ б В.2.7-65-97. "Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Класифікація"[14]. З метою оптимізації фізико-механічних характеристик бетонів і розчинів, а також для підвищення техніко-економічної ефективності виробництва, у склад в'язучих систем

активно впроваджують різноманітні модифікуючі добавки. Залежно від призначення добавки ділять на:

- активні;
- мінеральні;
- добавки-наповнювачі;
- поверхнево-активні;
- піно- і газоутворювачі;
- прискорювачі тверднення і уповільнювачі схоплення;
- протиморозні.

Наповнювачі - в якості наповнювачів для ВМБ до сьогоднішнього дня застосовувалися мікрокремнезем у вигляді пилу або водної суспензії складу - 1:1, зола-віднесення, метакоалін. В деяких випадках застосовується кварцове або вапняне борошно, щоб підвищити щільність наповнення бетону.

Як наповнювач може використовуватися також:

- мелена слюда;
- мелені тальк;
- талькомагнезит ін.

Додавання цих наповнювачів у бетон викликає наступні ефекти, що ведуть до збільшення міцності і поліпшення властивостей бетону :

- зменшення пороутворення в цементному камені (завдяки своїм мікророзмірам зерна наповнювача проникають в простір між зернами цементу, що частково не вступив в реакцію, і значно підвищують щільність цементного каменю);

- утворення додаткових кальції - силікатогідратів як первинних носіїв міцності цементного каменю за допомогою пуцоланової реакції;

- зміцнення контактної зони між цементним каменем і заповнювачем внаслідок зменшення кількості і розмірів пір і утворення додатково кальції - силікатогідратів в цій зоні [42, 61].

Водоцементне відношення - для виробництва високоміцного бетону (відношення В/Ц) має бути значно нижче 0,4, за рахунок чого зменшується

пористість і підвищується міцність матриці цементного каменю. При мінімальному відношенні В/Ц і, отже, низькому вмісті води в суміші легкоукладальність бетону в реальних умовах досягається лише за рахунок збільшення змісту терпкого і особливо за рахунок додавання пластифікатора.

Орієнтовно оцінити величину водоцементного відношення, що забезпечує задану міцність бетону, можна з рівняння :

$$R_{28} = A_1 \times R_y \times \left(\frac{W}{B} - k \right),$$

де A_1 - коефіцієнт, залежний від виду і якості заповнювачів;

R_{28} - щільність бетону в протягом 28 діб;

R_y - міцність цементу, $кгс/м^2$;

k - розмір заповнювача, $мм$.

Таким чином виходить, що водоцементне відношення рівне:

$$\frac{B}{W} = \frac{A_1 \cdot R_y}{f_{cm} + 0,5 \cdot A_1 \cdot R_y}$$

де A_1 - коефіцієнти, що залежать від якості заповнювача (для щебеню він дорівнює - 0,4 за таблицею № 8);

R_y - міцність цементу, $кгс/м^2$;

f_{cm} - проекційна середня міцність, $кгс/м^2$;

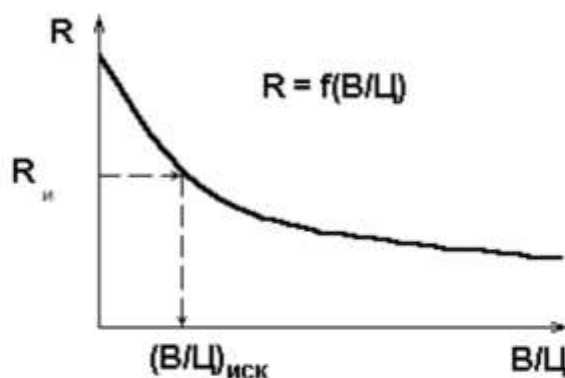


Рисунок 1.1. Залежність величини В/Ц від міцність бетону

Частенько на практиці вміст води в розчині багаторазово перевищує теоретичну норму, у такому разі міцність бетону зменшується, за рахунок того,

що вода в цьому випадку не вбирається, а залишається між частками суміші, утворюючи пори. Міцність цементної матриці зменшується [19].

Для зменшення початкового водовмісту і водопотреби бетонної суміші високоміцних бетонів слідуює:

- застосовувати жорсткі і помірно жорсткі бетонні суміші;
- застосовувати добре фракціонований заздалегідь промитий великий заповнювач;
- одночасно з цим зменшувати вміст піску в суміші заповнювачів, застосовуючи заздалегідь промитий крупнозернистий фракціонований пісок;
- у тих випадках, коли це допустимо, слід застосовувати пластифікуючі поверхнево-активні добавки[1, 3, 64].

1.2. Властивості крупних та дрібних заповнювачів для бетонів

Загальні закономірності, що показують залежність міцності бетону від різних факторів, розглянуті вище але на практиці склад і структура бетону можуть змінюватися в широких межах і в багатьох випадках на це необхідно зважати і вносити певні зміни в основні залежності при проектуванні складів бетону.

Матеріали складники бетону (цемент, пісок, гравій) можуть по-різному впливати на властивості бетонів, що відрізняються за складом і структурою. В одних складах найбільш кращим чином проявляються їх позитивні властивості, в інших—матеріали використовуються нерационально. По різному впливають міцність бетонів різні склади, структура і особливостей технологія виготовлення. При однакових умовах приготування і формування бетону розглянемо можливу зміну структури і властивостей бетону в двох випадках:

- при зміні цементно-водного співвідношення при постійному співвідношенні вмісту цементу і заповнювача в бетоні;
- при зміні співвідношення цементу і заповнювача при постійному значенні рухливості бетонної суміші або цементно- водного відношення.

Функціональні параметри бетону зумовлені специфічними закономірностями формування його внутрішньої будови. У структурах першого типу, де зерна

заповнювача просторово роз'єднані, домінуючу роль відіграють характеристики цементного каменю. Натомість у структурах другого типу, що мають жорсткий дискретний скелет із безпосереднім контактом зерен через тонкий прошарок в'язучого, кінцеві властивості композиту визначаються сукупним впливом показників як цементу, так і заповнювача. Ці властивості бетону залежать від структури і якості матеріалів та слід враховувати при проектуванні складу бетону [11].

Окремі фракції заповнювача по різному впливають на властивості бетону. Крупний щільний заповнювач помітно впливає на міцність бетону при стиску і в меншій мірі — на рухливість або водопотребу бетонної суміші.

Дрібний заповнювач, навпаки, значно змінюючи водопотребу бетонної суміші, що менше впливає на міцність бетону, (в оптимальних складах).

Різний вплив заповнювача на властивості бетону пояснюються їх роллю в структурі. Великий заповнювач створює кам'яний скелет у бетоні, що помітно впливає на характер напруженого стану та деформації і тріщиноутворення при навантаженні бетону. Дрібний заповнювач, розташовуючись між великими зернами, надає менший вплив на поведінку бетону під навантаженням і, отже, на його міцність [37].

Вплив великого заповнювача в бетоні зростає при зменшенні ступеня розсування його зерен розчином, хоч би яким шляхом це не досягалося: чи підвищенням жорсткості суміші і скороченням витрати цементу або зменшенням крупності піску. У бетоні великий заповнювач сприяє ущільненню прошарків розчину, ніби будучи своєрідним привантаженням, що має велике значення при використанні дрібних пісків. З іншого боку, регулюючи вологообмін розчинної частини, зокрема зменшуючи втрати вологи при витримуванні в несприятливих умовах, великий заповнювач помітно впливає на умови твердіння цементного каменю. В результаті властивості розчину в бетоні відрізняються від його властивостей у зразках розчину. Це також певною мірою пояснює менший вплив якості піску на міцність бетону. Наприклад, у наших дослідах при заміні крупного піску ($M_k = 2,79$) дрібним ($M_k = 0,69$) міцність розчину 1:2 знизилася

на 62%, а міцність бетону - всього на 5% - З іншого боку, водопотреба бетонної суміші сильно залежить від питомої поверхні заповнювачів і на цю характеристику дрібний заповнювач, питома поверхня якого в кілька разів більша, ніж великого, має більш помітний вплив[46].

Таким чином, основні залежності властивостей бетону від різних факторів, які використовують у технологічних розрахунках, зокрема щодо складу, носять середній статистичний характер. Тому технологічні розрахунки рекомендується перевіряти лабораторними дослідженнями.

Найкращими властивостями мають бетони оптимальних складів, у яких властивості матеріалів використовуються найповніше. Ці бетони мають підвищену щільність і міцність при стиску при заданому водоцементному співвідношенні.

Основні властивості бетонів також можна представити як функцію структурних характеристик-концентрації цементного каменю в бетоні та його справжнього водоцементного відношення. Ці характеристики враховують вплив як цементу, і заповнювача.

Для повнішої характеристики будови бетону необхідно оцінити не тільки його макроструктуру, а й мікроструктуру. Мікроструктуру можна оцінювати за характером пористості цементного каменю та заповнювача, а також пористості, одержуваної за рахунок повітровтягнення при введенні хімічних добавок.

Особливістю даного критерію є та обставина, що концентрація цементного каменю визначається на основі дійсного водоцементного відношення. Адже твердіння цементу відбувається в рамках сформованої структури і від її будови і властивостей багато в чому залежатимуть кінцеві властивості бетону. Якщо початкова структура слабка, з великою кількістю пор і дефектів, то й міцність бетону навіть після тривалого твердіння виявиться невисокою, тому що новоутворення цементного каменю не вистачить для виправлення дефектів початкової структури[51].

1.3. Вплив якості заповнювачів і міцності зчеплення компонентів на міцність бетонів

Усі емпіричні формули, якими визначається міцність бетону, містять коефіцієнти, залежні від якості заповнювачів.

Що означає «якість заповнювачів», які конкретні властивості, що визначають зчеплення цементного каменю з поверхнею зерен заповнювачів у бетоні, та власна міцність заповнювачів.

Зчеплення цементного каменю із поверхнею зерен заповнювачів. У звичайних важких бетонах міцність крупного заповнювача-гравію або щебеню - завжди вище міцності розчинної частини, а міцність дрібного заповнювача - піску (точніше, гірської породи або мінералів, що складають зерна піску) - більше міцності цементного каменю. І тим не менш, міцність розчину виявляється, як правило, менше міцності цементного каменю, а міцність бетону нерідко нижча за міцність розчинної його частини. Дослідження показали, що міцність бетону залежить не так від міцності заповнювачів, як від міцності зчеплення цементного каменю з поверхнею зерен заповнювачів [45].

У цьому можна переконатись, виконавши наступні дослідження. Використовуємо як «заповнювачі» гладкі сталеві кулі і такі ж за розміром кулі з парафіну. З цементного розчину виготовлені однакові зразки, в один із яких введені сталеві кулі, в інший парафінові. Міцність отриманих зразків приблизно однакова, незважаючи на те, що в одному «заповнювач» із високоміцної та жорсткої сталі, в іншому — із слабкого пластичного парафіну. В обох випадках міцність зразків буде значно нижчою за міцність вихідного розчину [67].

Недостатня адгезія між цементною матрицею та заповнювачем призводить до критичного зниження міцності бетону. Це зумовлено тим, що при стискальних навантаженнях матеріал руйнується через виникнення внутрішніх поперечних напружень розтягу. У разі повної відсутності зчеплення зерна заповнювача перестають працювати як підсилювальний компонент, перетворюючись на своєрідні пустоти, що послаблюють робочий переріз конструкції. Подібний

негативний ефект часто спостерігається при використанні морського гравію з гладкою поверхнею.

Застосовуючи замість чистого цементного каменю бетони з дрібним та великим заповнювачем, прагнуть того, щоб заміна заповнювачем цементного каменю в бетоні була ефективною в усіх відношеннях. Як зазначено вище, заповнювач займає до 80% обсягу бетону. Це заощаджує цемент.

Що стосується дрібного заповнювача - піску, то досліді показують, що міцність цементно-піщаного розчину на кварцовому піску нижче міцності цементного каменю. Зокрема, на звичайних цементах виходить цементний камінь, що перевищує в 2 рази марку (активність) цементу за міцністю, що визначається відповідно до стандарту шляхом випробування зразків цементно-піщаного розчину 1 :3. Стандартний (гусарський) пісок для випробування цементів вузькофракційний - не забезпечує міцного зчеплення з цементним каменем.

Якщо замість стандартного (гусарського) піску використовувати природний кварцовий з менш окатуваними (більш шорсткими) зерами, то міцність зразків підвищиться (за даними Ю. М. Баженова на 15. 25%), але все одно буде нижче за міцність цементного каменю.

Якщо замість природного піску використовувати подрібнений зі скельних порід, то можна домогтися деякого підвищення міцності бетону, хоча й у дробленому піску зерна часто мають гладкі грані, являючи собою окремі кристали мінералів.

Деякі кристалічні мінерали при дробленні руйнуються із розривом міжатомних зв'язків. Виявлено, що свіждроблені кварцові заповнювачі в силу іонізації поверхні зерен набувають на короткий час фізико-хімічної активності, що проявляється у підвищенні міцності бетону за рахунок кращого зчеплення. Однак міцність зчеплення цементного каменю з поверхнею зерен піску менша за міцність цементного каменю, тому остання в цементно-піщаному розчині недовикористовується [54].

Щебінь як великий заповнювач краще гравію, тому що має більш сприятливу для зчеплення форму зерен і розвинену шорстку поверхню. Його використовують для отримання високоміцних бетонів.

Гравій — найдешевший крупний заповнювач, при застосуванні гравію, як і піску, забезпечується більш менш надійне його зчеплення з цементним каменем, обумовлене лише фізико-хімічною взаємодією, то при використанні щебеню має місце і механічне зчеплення, подолання якого при руйнуванні бетону пов'язане з опором зрізу цементного каменю[39].

Крім форми зерен наповнювачів на міцність зчеплення цементного каменю впливає чистота поверхні. Природні наповнювачі нерідко бувають забруднені.

Глинисті домішки, що обволікають зерна тонкою плівкою, заважають зчепленню. Тому їх слід попередньо промивати. У разі застосування непромитих заповнювачів доцільно при приготуванні бетонної суміші в бетонозмішувачі спочатку їх перемішати з водою і потім додати цемент. У цьому випадку домішки, змиті з поверхні заповнювача, рівномірно розподіляться в цементному тесті і не чинитимуть такого шкідливого впливу.

Позитивний вплив на зчеплення має пористість зерен заповнювача. Завдяки відсмоктуванню води пористим заповнювачем в бетонній суміші цементне тісто проникає у відкриті пори, тобто має місце як би зрощення цементного каменю із заповнювачем. Крім того, водопоглинання усуває небезпеку утворення біля поверхні заповнювачів водних плівок, що заважають зчепленню.

На складні і не цілком вивчені фізико-хімічні процеси, що визначають міцність склеювання складових бетону, впливають хімічний та мінералогічний склад заповнювачів[42].

Якщо зчеплення цементного каменю із заповнювачами в бетоні невелике, то руйнування бетону під навантаженням починається із зони контакту, тріщини руйнування проходять по цементному каменю та поверхні зерен заповнювача, огинаючи їх. Якщо ж зчеплення надійне, то руйнування бетону відбувається по наскрізних тріщинах, що пронизують як цементний камінь, так і заповнювач.

Саме така картина руйнування спостерігається під час випробування високоміцного бетону.

Обов'язковими компонентами бетону, що формують його структуру, є крупні (щебінь та гравій) та дрібні (пісок) заповнювачі.

Відповідно, для забезпечення марочної міцності бетону необхідно:

гравійний щебінь з відповідною маркою за міцністю та розмірів мінеральних зерен; пісок кар'єрний, який спільно з великими заповнювачами бере участь у формуванні каменеподібної структури бетону.

Початкове призначення заповнювачів звичайного бетону зводилося до заповнення обсягу замісу, щоб зменшити витрати дорогого цементного в'язучого. Крупні та дрібні заповнювачі становлять до 80-85% від обсягу бетону, що сприяє приготуванню бетону з економною витратою цементу. Практика будівельних робіт та наукові дослідження показали, що мінеральні заповнювачі мають активний вплив на фізико-механічні властивості бетонної суміші та експлуатаційні властивості застиглого бетону.

Крупні заповнювачі створюють твердий каркас бетону, дрібний заповнювач рівномірно заповнює порожнечі між більшими фракціями щебеню або гравію. В ході реакції гідратації цементу при його замішуванні водою цементне тісто, що утворюється, поступово обволікає поверхню частинок заповнювачів і заповнює проміжки (порожнечі) між зернами. Характерною особливістю структуроутворення бетону є осадження цементних частинок на поверхні зерен заповнювача та прилипання до них за рахунок сил міжчасткової взаємодії. Витрата цементу безпосередньо залежить від сумарної площі поверхні частинок заповнювача та їх упаковки (щільна, не щільна) обсягом бетонної суміші. При мінімальній порожнечі зерен заповнювачів витрата цементу також мінімальна.

Оптимальна структура міцного бетону – тип II з мінімальною витратою цементу. Для типу I потрібна підвищена витрата цементу, для типу III характерна низька міцність та схильність до утворення тріщин.

Основним фактором, що визначає високу міцність бетону або бетонного розчину, є повноцінне зчеплення (адгезія) цементного тіста з поверхнею частинок крупного та дрібного заповнювачів, коли шаром цементного тіста покриті всі зерна. Експериментально доведено, що міцність бетону залежить від якості зчеплення заповнювача з цементним тістом, ніж від міцності заповнювача. Міцність зчеплення залежить від наступних характеристик заповнювача:

1. Зерновий склад – розмір фракції та конфігурація зерен – впливають на міцність наступним чином:

- експериментальні дані, показали, що до 40-50% міцності бетону формується за рахунок адгезійного зчеплення цементного каменю із заповнювачем. Відповідно до висновків вчених [38] оптимальна крупність заповнювачів перебуває у розмірному діапазоні 20-40 мм. При зменшенні крупності заповнювача покращується зчеплення із цементним каменем, але одночасно збільшується відносна площа руйнування в зоні контакту цементного каменю із зернами. При підвищенні великої кількості заповнювача починаються седиментаційні явища, що послаблюють бетон;

- мікрорельєф поверхні наповнювача дає близько 20% до сумарної міцності бетону за рахунок механічного зчеплення цементного розчину з частинками наповнювача. У бетоні з щобеневим шорстким заповнювачем міцність вища, ніж у бетоні з гладким гравієм. Зерна кубовидної форми повідомляють бетону більш високі характеристики міцності, ніж голчасті або пластинчасті частинки.

2. Пористість та чистота поверхні зерен. Надлишок заповнювача дрібних фракцій та наявність пилоподібних забруднень знижує міцність бетону. [52]

3. Мінералогічний та хімічний склад.

Міцність бетону не може перевищувати міцність заповнювача. Існують певні рекомендації:

- для бетону класу В40- В 50 використовується щебінь марки М1200;
- для бетонного розчину В25 необхідний щебінь М1000;
- для бетонів марки В20 та нижче використовують гравій; для бетонів вище В25 використовується гранітний щебінь.

Підбір наповнювачів для виготовлення бетону заданих параметрів – складне завдання, що вимагає ретельного аналізу характеристик вихідних матеріалів та врахування особливостей експлуатації бетонної конструкції.

1.4. Вплив заповнювачів на міцність високоміцних бетонів

Оскільки заповнювачі становлять до 80 % об'єму бетонної суміші, вони суттєво визначають експлуатаційну надійність, довговічність та економічну доцільність матеріалу. Використання інертних наповнювачів дозволяє значно оптимізувати витрати найбільш дороговартісного компонента — цементу. Крім економічного ефекту, вони формують міцний просторовий каркас, який мінімізує усадкові деформації бетону (приблизно вдесятеро порівняно з чистим цементним каменем). Створення такого жорсткого скелета з високоміцних заповнювачів сприяє підвищенню модуля пружності та загальної стійкості композиту до зовнішніх впливів [61].

В якості заповнювачів і наповнювачів у будівельних сумішах розчинів використовують мінеральні природні або штучно отримані зернисті матеріали певного гранулометричного складу. Склад бетонної суміші формується за допомогою різноманітних заповнювачів природного або техногенного походження (піску, щебеню, гравію). Відповідність цих компонентів вимогам надійності та безпеки визначається через дотримання встановлених норм ДСТУ та галузевих технічних регламентів. Залежно від великості часток заповнювачі підрозділяють на великі і дрібні. До великих заповнювачів відносять грубодисперсні матеріали з розміром зерен більше 5 мм - щебінь, продукт дроблення гірських порід з частками неправильної форми чи гравій, матеріал природного походження. Щебінь повинен відповідати вимогам ДСТУ Б.В.2.7-75-98 "Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови" [21].

В якості дрібного заповнювача застосовується кварцевий пісок, що задовольняє вимогам ДСТУ Б.В.2.7-32-95 "Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт" [15].

Дрібний заповнювач - пісок, характеризується максимальною крупністю зерен до 5 мм, він може мати як природне походження, так і виготовлятися штучно шляхом дроблення гірських порід або деяких промислових відходів, наприклад, шлаків і тому подібне. Заповнювачі відносять до щільних при щільності зерен більше - 2 г/см^3 і до пористих при менших значеннях щільності. Характеристикою пористих пісків може служити така величина їх насипної щільності, яка для пористих пісків не повинна перевищувати - 1400 кг/м^3 .

З метою корекції фракційного складу заповнювача, а також для надання сумішам розчинів:

- легкоукладуваності;
- підвищення водоутримуючої здатності;
- зниження деформацій усадки, а також для зниження не в усіх випадках високої міцності, що вимагається, розчинів, частина терпкого в сумішах замінюють тонкодисперсним порошкоподібним матеріалом - наповнювачем, що характеризується розміром часток - $0,05 - 0,16 \text{ мм}$.

До такого матеріалу відноситься:

- тонкомелені (кварцевий пісок);
- пилоподібний природний кварц (маршалит);
- мікрокальцій, вапняковий і доломітовий борошно та ін.

Основними характеристиками заповнювачів і наповнювачів, що визначають їх вплив на технологічні і будівельно-технічні властивості сумішей розчинів і розчинів являються: зерновий склад, граничний розмір часток, форма і характер поверхні зерен, міжзернова пустотність і водопотреба. Важливе значення мають також мінералогічний склад, наявність пилоподібних і глинистих часток, зміст глини в грудках і присутність різних домішок.

У складах сухих будівельних сумішей в основному використовується кварцеві піски хоча придатні також і інші види пісків - польовошпатові, вапнякові, доломітові, гранітні, діоритові та ін. Також важливим фактором є оптимальний гранулометричний склад дрібного заповнювача.

У найзагальнішому наближенні пісок для будівельних сумішей розчинів повинен мати найменший об'єм порожнеч і тому у зв'язку з цим перевагу слід віддавати піскам змішаного (безперервного) зернового складу.

Залежно від гранулометричного складу заповнювачі поділяють на рядові, що складаються із зерен різних габаритів, та фракціоновані. Останні проходять процес сортування на окремі групи з вузьким діапазоном розмірів (наприклад, фракції 5–10 мм або 20–40 мм). Ключовими характеристиками таких матеріалів є їхній мінімальний та максимальний розмір зерен, що визначають граничні параметри величності заповнювача.

1.5. Оптимальний підбір складу заповнювачів для бетонів підвищеної міцності (поліфракційний)

Широкий спектр складів високоміцних бетонів, в тому числі з бетонних сумішей високої пластичності, обумовлений в значній мірі розмаїттям заповнювачів, що використовуються, зважаючи на доступну сировинну базу. Істотний вклад таких факторів, як міцність та розміри заповнювачів у формування структури високоміцних бетонів, обумовлює наступні сучасні підходи до їх проектування [7]:

- при збільшенні вмісту заповнювачів крупних фракцій підсилюється вклад міцності породи заповнювача у формування міцності бетону, що обумовлює необхідність використання заповнювача з міцністю в 1,5-2 рази вище ніж проектна міцність бетону;
- при збільшенні вмісту заповнювачів дрібних фракцій зменшується вклад міцності заповнювача у формування міцності бетону, яка може досягати міцності заповнювача і навіть перевищувати її; це супроводжується необхідністю збільшення витрати цементу з відповідними негативними наслідками щодо деформативних властивостей бетону;
- збільшення частини заповнювачів з активною поверхнею дозволяє знизити витрату (марку) цементу або збільшити міцність бетону.

Ці підходи передбачають використання суміші заповнювачів як перервного, так і безперервного зернового складу. До переваг перервного зернового складу можна віднести меншу пористість суміші зерен заповнювачів та більшу рухомість бетонної суміші. Натомість заповнювачі з безперервною гранулометриєю вимагають, при однаковій рухомості сумішей, меншого об'єму дрібних фракцій і, відповідно, більшої витрати цементу на заповнення міжзернового простору. При цьому бетонні суміші на основі таких заповнювачів менш схильні до розшарування.

Отже можна передбачити, що регулювання умовами формування макроструктури високоміцного бетону підпорядковане певним закономірностям за участю такого фактору, як фракційний склад заповнювачів. Визначенню таких закономірностей присвячений напрямок досліджень [10, 12, 13], зокрема це є метою даної роботи.

1.6. Одержання бетонів підвищеної міцності на місцевих заповнювачів

В сучасних умовах міцність бетону на щільних заповнювачах і високоактивних гідравлічних в'язучих досягає 60-150 МПа і більше. Для одержання таких бетонів потрібно створити особливу щільну, міцну і монолітну структуру бетону шляхом [37]:

- Застосуванням високоактивних цементів і заповнювачів високої міцності;
- Забезпечення граничного зменшення $V\backslash Q$, що дає високу щільність і міцність цементного каменю в бетоні;
- Застосування суперпластифікаторів і комплексних добавок для підвищення щільності структури бетону;
- Особливо ретельного змішування і ущільнення бетонної суміші та створення найбільш сприятливих умов структуроутворення і тверднення бетону.

Оптимізація роботи конструктивних елементів на осьовий стиск досягається шляхом трансформації структури бетонного ядра та корегування його

композиційної матриці, що зумовлює суттєві зміни деформативних характеристик матеріалу [2].

Впровадження у склад суміші модифікуючих добавок та суперпластифікаторів у малих дозах радикально впливає на процеси структуроутворення. Завдяки їх дії спостерігається зростання щільності та міцності композиту, покращуються показники тріщиностійкості та водонепроникності, а також збільшується частка замкнутої пористості. Крім того, застосування таких компонентів сприяє підвищенню адгезії між бетоном і сталевую арматурою.

У процесі розробки оптимальних рецептур високоміцних бетонів особлива увага приділяється підбору гранулометричного складу. Для цього досліджуються поліфракційні заповнювачі, криві просіву яких знаходяться в межах нормованих областей. Такий підхід дозволяє отримати матеріал із мінімальною пористістю, що забезпечує низьку витрату в'язучого та суттєве зменшення усадкових деформацій. При підборі такого складу зручним з позицій візуалізації та аналізу є представлення зернового складу заповнювача у вигляді кривих розсіву, та їх порівняння з граничними ситовими лініями за DIN 1045 [27], які отримано в результаті аналізу значного об'єму експериментального матеріалу.

За допомогою графіків зернового складу (рис. 3) визначено діапазони варіювання фракційного співвідношення поліфракційного заповнювача. Це дозволяє сформувати структуру бетону, що за показниками міцності є максимально наближеною до оптимальної.

Область сприятливих складів (3) відповідає оптимальному значенням поверхні зерен поліфракційного заповнювача та обсягом пустот. Потреба в цементному тісті знаходиться в допустимих межах. В допустимій області (4) обсяг порожнеч і питома поверхня зерен заповнювача збільшується, відповідно Область (1) характеризується надмірним вмістом великих зерен поліфракційного заповнювача, їх недостатньою питомою поверхнею, що може супроводжуватися розшаруванням бетонної суміші.

Сучасний етап розвитку технології високоміцних бетонів зумовлює необхідність впровадження інноваційних технічних рішень та прогресивних

методів виробництва. Завдяки комбінуванню специфічних видів в'язучих матеріалів, селективних заповнювачів та багатофункціональних модифікуючих добавок стає можливим проектування бетонних систем із заздалегідь заданими технічними характеристиками. Такий диференційований підхід до формування структури матеріалу дозволяє успішно зводити об'єкти складної конфігурації та споруди різноманітного функціонального призначення, забезпечуючи їх високу надійність в експлуатації.

1.7. Вплив пористих заповнювачів на якість бетону

Бетон на пористих наповнювачах. Матеріали виготовлення легкого бетону Матеріалами виготовлення легкого бетону служать портландцементи, як звичайні, і швидкозастійні. У конструкції використовують у більшості випадків неорганічні пористі заповнювачі. Органічні заповнювачі використовуються у випадках, коли виготовлення легкого бетону має на увазі його високу теплоізоляцію. Як органічні наповнювачі використовують склади з деревини, бавовнику та деякі інші матеріали. Неорганічних заповнювачів набагато більше, вони поділяються на натуральні (природні) та штучні. Натуральні заповнювачі одержують із гірських порід (пемзи, вапняку – черепашника тощо) за допомогою їх дроблення та розсіву. Штучні ж наповнювачі одержують у результаті термообробки мінеральної сировини, і, при цьому, вони поділяються на виготовлені спеціально та в результаті діяльності промислових підприємств (шлаки та зола, відвальні шлаки металургійних виробництв тощо). Керамзитовий гравій виготовляють шляхом випалу гранул, які, у свою чергу, отримують з глини, що спучилися. Такий гравій відрізняється легкістю та міцністю при щільності 250-800 кг/м³. Гранули керамзити мають структуру, що нагадує застиглу піну, при цьому оболонка у вигляді кірки, що спеклася, надає гранулам високу міцність. Керамзитовий пісок, при зерні від 0,5 мм, одержують у процесі виробництва керамзитового гравію, а також за допомогою випалу глиняних гранул у завислому стані. Також керамзитовий пісок одержують шляхом дроблення гравію. Шлакова пемза виготовляється з

металургійних (доменних) шлаків за допомогою їхнього швидкого охолодження. Шматки шлакової пемзи, що вийшла, піддають дробленню, в результаті чого з'являється пористий щебінь. Через специфіку виготовлення, виробництво шлакової пемзи найбільше поширене в районах з розвинутою металургійною галуззю. Гранульований шлак, як побічні продукти металургії, виходить у вигляді крупнозернистого піску розмірів від 5 до 7мм, а іноді і до 10мм. Спучений перліт отримують в результаті випалу водомістких вулканічних гірських порід (перлітів або обсидіанів). При підвищенні температури випалу до 1200 градусів вода активно виділяється і при цьому порода, що обжигана, збільшується в розмірах в 10 - 20 разів. Спучений перліт застосовується в таких областях, як одержання легких бетонів або виробів для теплоізоляції.

Спучений вермикуліт є сипучим матеріалом з високою пористістю, виходить він у результаті випалу водомістких слюдових порід. Застосовується як заповнювач у легких бетонах. Паливні відходи (шлаки чи золи) – це побічний продукт металургійних підприємств при спалюванні антрациту, бурого вугілля, кам'яного вугілля чи інших видів твердого палива. Із золи також одержують зольний гравій. Паливні шлаки отримують в результаті спікання та спучування різних неорганічних сполук, які містяться у бурому або кам'яному куті. При цьому шлаки піддаються подрібненню та розсіву, а також вони збагачуються з метою виключення зі складу шкідливих домішок. На основі таких шлаків випускають глинозольний та зольний гравій. Аглопорит виготовляється шляхом випалу будь-якої глиновмісної сировини. Випал відбувається на решітках агломераційних машин, в результаті якого вугілля згоряє, і виходять частинки потрібної сировини, що спеклися. Для виробництва аглопориту застосовують такі види сировини, як: глинисті та лесові породи та відходи промислових виробництв (золи, шлаки та вуглесодержачі шахтні породи). Аглопорит може мати вигляд пористого піску, гравію або щебеню. Шунгізит провадиться в результаті випалу шунгітових сланцевих порід.

Пористі заповнювачі, подібно до щільних заповнювачів, поділяються на великі (наприклад, гравій або щебінь), що мають розмір від 5 до 40 мм, і дрібні

(наприклад, пористий пісок), розмір яких не перевищує 5 мм. Пористий пісок також поділяється на два типи: до першого відноситься пісок з розміром частинок до 1,2 мм, а до другого – розміром частинок від 1,2 до 5мм. Пористі наповнювачі по насипній щільності речовини в сухому стані поділяються на марки від 250 до 1000.

При визначенні якості виробленого легкого бетону оцінюють такі показники, як клас міцності і марка середньої щільності. За міцністю на стиск легкий бетон підрозділяється на класи від В2, В3 і до В40, міцність осьового розтягування характеризують класи від В0,8 до В3,2. Крім того, легкий бетон, без урахування класів, характеризується за показниками міцності (кг/см^2) та ділиться на марки від В5 до М30. Щоб виготовити легкі бетони підвищеної міцності (щільністю $1600 - 1800 \text{ кг/м}^3$), слід використовувати більш міцний заповнювач (з щільністю $600-800 \text{ кг/м}^3$), при цьому пористий пісок також замінюється щільнішим. Щільність взагалі одна з найважливіших характеристик будь-якого бетону. Залежно від щільності та призначення легкі бетони поділяються на такі групи: теплоізоляційні (щільність до 500 кг/м^3), конструкційно-теплоізоляційні, що використовуються для виготовлення зовнішніх стін будівель (щільність від 500 до 1400 кг/м^3) та чисто конструкційні (щільність від 1400 до 1800 кг/м^3). У деяких випадках потрібно зменшити щільність бетону, і ця операція проводиться шляхом утворення в моноліті бетону дрібних замкнутих пор, для чого використовують піноутворюючі або газоутворюючі речовини. Від щільності та вологості бетону залежить і його теплопровідність. При цьому підвищення вологості бетону на 1%, у свою чергу, підвищує теплопровідність на $0,016-0,035 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Теплопровідність впливає на товщину стін, які в залежності від цього параметра можуть бути від 20 до 40 см. Зовнішні бетонні конструкції піддаються агресивному впливу зовнішнього середовища, відповідно, легкі бетони, що застосовуються у виробництві зовнішніх стін будівель, для будівництва мостів та гідротехнічних споруд з урахуванням їхньої опірності морозам. За показником морозостійкості легкі бетони поділяються на марки від F25 до F500. При зведенні зовнішніх стінок зазвичай застосовуються бетони, показник морозостійкості

яких не менше 15-25 циклів заморожування та подальшого відтавання. Легкі бетони з високою морозостійкістю і гарною водонепроникністю знаходять все більше застосування в будівництві при зведенні мостів, наприклад, або гідротехнічних споруд. Водонепроникність легких бетонів може бути дуже високою. Наприклад, керамзитобетон, що виготовляється з витратою цементу 200-350 кг/м³, не пропускатиме воду навіть при високому рівні тиску в 2 МПа. Саме з цієї причини легкі бетони особливо потрібні при зведенні гідротехнічних споруд та при виготовленні напірних залізобетонних труб.

На основі будівельного гіпсу та гіпсоцементно-пуцоланового в'язучого виготовляють гіпсобетон, який використовується при виготовленні водостійких виробів. Щоб зменшити його пористість до складу вводяться пористі замітники (шлаки, гравій або пемза), а, крім того, кварцовий пісок і тирсу. Також щільність гіпсобетону знижується за рахунок введення добавок породоутворюючих. А для міцності до складу додають волокнисті наповнювачі. При виробництві великих виробів використовують метод вібропрокату спеціально розроблених при цьому станах. Формовані вироби після цього потрібно висушити. Області застосування гіпсобетону є виготовлення суцільних і порожнистих плит з армуванням штукатурною дранню, очеретом і т.д. Армуючий дріт повинен пройти антикорозійну обробку за допомогою спеціальної обмазки. Їхні гіпсобетони виготовляють стіни житлових будинків та сільськогосподарські будівлі.

Вертикальне розтріскування у зразку під дією одновісного стиску починається при навантаженні 50-75% граничної. Це було встановлено за вимірами швидкості звуку в бетоні, а також у результаті застосування ультразвукового імпульсного методу. Напруга, при якому утворюються тріщини, залежить насамперед від властивостей великого заповнювача: застосування гравію з гладкою поверхнею веде до появи тріщин при більш низьких напругах у порівнянні з бетоном на щебені. Ймовірно, це пов'язано з тим, що механічне зчеплення залежить від властивостей поверхні і певною мірою від форми зерен великого заповнювача [39].

Властивості заповнювача впливають на тиск, при якому починається утворення тріщин при стисканні в тій же мірі, як і на межу міцності при згинанні, так що відношення між цими двома величинами не залежить від властивостей заповнювача. За винятком високоміцного бетону, властивості заповнювача, особливо структура його поверхні, впливають на межу міцності при стисканні набагато менше, ніж на межу міцності при розтягуванні або напругу тріщинопристисненні.

Вплив виду крупного наповнювача на міцність бетону залежить від водоцементного відношення. Для В/Ц нижче 0,4 застосування щебеню призвело до отримання міцності на 38% вище, ніж при застосуванні гравію. З підвищенням В/Ц вплив виду заповнювача на міцність зводиться нанівець, тому що міцність цементного каменю, мабуть, стає визначальною, і при В/Ц, що дорівнює 0,65, не спостерігалось відмінностей у міцності бетонів, виготовлених на гравії або щебені .

Вплив виду заповнювача на міцність при згині, ймовірно, залежить і від вологості бетону під час випробувань.

Форма і структура поверхні крупного заповнювача впливає також на опір бетону удару, причому характер впливу такий самий, як і на опір вигину.

Дані досліджень вказують, що міцність бетону на вигин переважно нижче міцності на вигин відповідного цементного розчину. Таким чином, цементний розчин, що входить до складу бетону, визначає його верхню межу міцності при згинанні, присутність великого заповнювача знижує цю міцність. З іншого боку, міцність бетону на стиск вище міцності цементного розчину; отже, згідно з [7], механічне зчеплення великого заповнювача збільшує міцність бетону на стиск. Викладені вище положення не отримали достатнього підтвердження, і проблема міцності цементу та бетону потребує подальшого вивчення.

Заповнювачі у складі бетонної суміші займають близько 80% обсягу і тим самим впливають на всі властивості бетону, а також на його вартість і довговічність.

Використання заповнювачів у бетонній суміші дозволяє не тільки покращувати технічні властивості бетону, але й економити на витраті цементу, а цемент у свою чергу є одним з найдефіцитніших і найдорожчих компонентів.

При використанні високоміцного наповнювача в бетоні утворюється жорсткий скелет, який збільшує його міцність і зменшує величину деформації під навантаженням. Так само зменшується і повзучість бетону - це такий вид деформації, який виникає при високому та тривалому навантаженні бетонної конструкції.

Крім того, заповнювачі дозволяють збільшити довговічність бетонної конструкції шляхом зменшення усадки готового бетону. При твердінні цементного каменю відбувається його усадка, яка досягає 2 мм на метр товщини бетонної конструкції. І найнебезпечніше в таких деформаціях це те, що при виникненні нерівномірної усадки різко зростає внутрішня напруга бетонної конструкції, яка в майбутньому може викликати мікротріщини.

Застосування заповнювачів у бетоні дозволяє зменшити його усадку в кілька разів у порівнянні з усадкою цементу. У момент твердіння бетону і набору міцності, заповнювачі, що входять до його складу, сприймають на себе напругу усадки, тим самим дозволяючи їх зменшити.

Будь-які види пористих заповнювачів дозволяють поліпшити теплотехнічні властивості бетону. Такі заповнювачі частіше приймають у складі легких бетонів, так як сам заповнювач має малу щільність, тим самим зменшує щільність легкого бетону і збільшує його пористість, що дозволяє зменшити теплопровідність готової бетонної конструкції.

А в спеціальних видах бетону заповнювачі є необхідним компонентом, тому що надають таким бетонам їх спеціальні властивості. До спеціальних видів бетонів відносяться жаростійкі, кислотостійкі, морозостійкі, для радіаційного захисту та інші.

Але ще більшу роль заповнювачі грають у силікатних бетонах. Вся справа в тому, що зерна наповнювача вступають у безпосередню взаємодію з в'язучою

речовиною і тому властивості кінцевого бетону багато в чому залежать від мінералогічного складу та питомої поверхні зерен наповнювача.

Враховуючи всі ті переваги та покращення властивостей, які заповнювач надає бетону, не дивно, що загальна вартість заповнювачів становить від 30% до 50% від загальної вартості бетонної чи залізобетонної конструкції. Тому в деяких ситуаціях намагаються використовувати більш дешеві та легкодоступні заповнювачі для того, щоб знизити загальну вартість будівництва. Крім того, більш доступні місцеві заповнювачі в районі будівництва дозволяють знизити кількість транспортних перевезень і тим самим прискорити процес будівництва об'єкта. Тому найважливішим завданням технології бетону є правильний підбір заповнювачів та їх розумне використання.

Зміни в процесі утворення структури бетонів та їх сумішей у тому числі відбуваються через наявність забруднюючих домішок (часток пилу, глини та мулу) [12]. У нормативній документації, що регламентує якісні показники застосовуваних заповнювачів для бетонів різного призначення, встановлені допустимі значення вмісту забруднюючих домішок, тому що їх наявність значною мірою погіршує адгезію між цементним каменем та заповнювачем [3]. Для бетонів всіх класів допустима кількість домішкових частинок у щебені не повинна перевищувати 1 % за масою; у піску 2-5% для бетонів різного призначення [4]. Вимоги ДСТУ допускають у піску з відсіву дроблення наявність пилоподібних та глинистих частинок до 10 % за масою [5]. Взагалі вміст домішок у вигляді пилоподібних, мулистих і глинистих частинок у бетонній суміші може змінюватись у досить широкому діапазоні в залежності від кількості в суміші піску та щебеню, що, безумовно, позначиться на властивостях бетонних сумішей та бетонів. Частинки мулу, глини та аналогічні їм знижують міцність бетону особливо, якщо вони контактують з поверхнею частинок дрібного та великого заповнювача [56]. А у разі рівномірного розподілу цих домішок у масі піску та відсутності зчеплення із зернами їх наявність не шкодить якості бетонів. Більшість дослідників [9, 44] допускають, що сукупність домішок, що забруднюють пісок, не може повністю охарактеризувати його якість. Цілоком

припустима ймовірність того, що 3–5 % домішок одного складу можуть бути набагато шкідливішими, ніж 10–15 % домішок іншого складу. З практики відомо, що додавання до цементу глини або глинистих гірських порід практично не впливає на його якість. Загальновідомо, що раніше при виготовленні будівельних матеріалів та виробів різного призначення використовувалися ґрунто-бетонні суміші або піщано-ґрунто-цементні суміші, в яких вміст глинистих та мулистих речовин доходив до 40–45 % [50]. Останні десятиліття ознаменовані новітніми розробками та прийомами збільшення міцності та морозостійкості бетонів за рахунок впровадження розроблених повітровтягуючих, пластифікуючих та іншого виду добавок. Фізико-механічні властивості бетонів із зазначеними добавками у складі з [37] забруднюючими домішками у заповнювачі маловивчені. Без сумніву, нормовані межі за кількісним вмістом забруднюючих домішок у заповнювачах для бетонів можуть бути вищими при кожному конкретному вивченні їх впливу на [45] якісні показники бетонів у присутності добавок [7, 11]. Глинисті, глисті і пілоподібні домішки, що опинилися в заповнювачі, утворюють на поверхні заповнювача моноліт, який знижує адгезію цементного каменю з заповнювачем, а також міцність і морозостійкість бетонів. Звичайні розрахунки дають можливість стверджувати, що при 10% вмісту домішок вони можуть утворювати поверхневий шар на частинках заповнювача близько 8-10 мкм у тонкодисперсних бетонах та 12-14 мкм у звичайних бетонах. Звичайно, при перемішуванні бетонних сумішей шари цих частинок у водному середовищі зсуваються з поверхні заповнювача, розподіляючись у водоцементній частині бетонної суміші. Саме це дозволить дещо підвищити контакт та зчеплення цементного каменю з поверхнею заповнювача [42]. Наявність забруднюючих частинок може сприяти збереженню досить високих показників міцності при випробуванні водонасичених бетонів, створюючи перешкоду проникненню води зверху тріщини та її зростання [10]. Відповідно можна допустити, наявність забруднюючі частинки в порах бетонів у разі їх взаємодії з водою будуть набухати і тим самим зменшувати водопоглинання бетону. При заморожуванні адсорбована на поверхні тонкодисперсних домішок

вода перетворюється на лід при температурах вкрай нижче 0 °С, що може вплинути [2] на збереження морозостійкості та тріщиностійкості бетонів.

У безщебневих бетонних сумішах максимальний ефект, що розріджує, дає наявність у складі суміші тонкодисперсних забруднюючих домішок Надзорненського кар'єру. Забруднюючі домішки Старомар'євського та Невинномиського кар'єрів у кількості від 0 до приблизно 4 % мають пластифікуючу дію, але при подальшому збільшенні до 10 % їх вміст у суміші викликає підвищення жорсткості бетонної суміші. Проводячи аналіз фракційного складу тонкодисперсних фракцій забруднюючих домішок заповнювачів, можна зробити висновок: пластифікуючу дію надають домішки, що містять більшу кількість фракцій розміром більше 0,01 мм, а знижують удобоукладываемість сумішей домішки, що містять більшу кількість фракцій розміром менше [52].

При введенні тонкодисперсних забруднюючих домішок у важку бетонну суміш їх зручноукладальність, що оцінюється по осаді конуса (ОК), погіршується, проте домішки різного зернового складу по-різному впливають на зміну осаду конуса. Вміст домішок у кількості 1 % у бетонній суміші призводить до зниження ОК до 0, тоді як на чистому заповнювачі ОК дорівнювала 4 см. У той же час зниження ОК до 0 у бетонній суміші з домішками спостерігається при їх вмісті в суміші у кількості 2,1 %

У результаті проведені дослідження дозволяють стверджувати, що, підбираючи склад бетонних сумішей з використанням заповнювачів, що містять забруднюючі домішки, зручноукладальність необхідно характеризувати не тільки по осаді конуса, але і по жорсткості. Наявність тонкодисперсних забруднюючих домішок підвищує водопотребу бетонної суміші при її оцінці по осаді конуса, а при оцінці зручності бетонної суміші за її жорсткістю водопотреба може бути знижена. Як видно, в безщебневих бетонних сумішах, так само як і в звичайних важких, тонкодисперсні частинки надають незначну пластифікуючу дію на бетонну суміш [14] при оцінці зручності укладення по жорсткості бетонної суміші, як з введенням пластифікатора, так і без нього.

РОЗДІЛ 2

МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основна мета даної роботи – оптимізувати склади та дослідити вплив гранулометричного складу дрібного заповнювача на міцність важкого бетону тротуарних виробів для Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Об’єкт дослідження – важкий бетон для виробництва тротуарних виробів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Предмет дослідження – міцнісні характеристики високоміцного бетону в залежності від гранулометричного складу та якості дрібного заповнювача.

Задачі досліджень:

- ◆ оптимізувати склади високоміцного бетону класів – C45/55, C55/65 за міцністю з використанням дрібного заповнювача різної якості;
- ◆ експериментально встановити вплив якості дрібного заповнювача на наборів міцності високоміцного бетону;
- ◆ провести порівняльний аналіз результатів визначення міцності бетону руйнівним та неруйнівним методами.

Методи дослідження: Визначення міцнісних характеристик бетону для виробництва тротуарних виробів, що проводилися за стандартними методиками дослідження. Експерименти проводилися комп’ютерною обробкою результатів дослідження.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Методи дослідження: Визначення міцнісних характеристик бетону що проводилися за стандартними методиками дослідження. Експерименти проводилися з використанням математико-статистичних методів та комп'ютерною обробкою результатів дослідження.

3.1 Характеристика вихідних матеріалів

3.1.1 Цемент

В якості в'язучого звстосовано портландцемент СЕМ І (42,5R) портландцемент загально-будівельного призначення ПАТ "ХайдельбергЦемент Україна" ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови..

У придбаного цементу визначалися наступні параметри:

- тонкість помелу [18];
- нормальну густоту [17];
- марку [19].

3.1.1. 1 Визначення марки цементу

Визначення границі міцності на згин

Границю міцності при згині визначаємо згідно ДСТУ Б В.2.7-187:2009 Процес випробування передбачає застосування навантаження на зразок із середньою швидкістю 0,05-0,01 кН/с. Для фіксації зразка слід використовувати захват, оснащений циліндричними елементами, наприклад, роликами. Конструкція нижніх опорних елементів повинна забезпечувати їх вільний поворот відносно горизонтальної осі. Ця вісь має співпадати з нижньою опорною площиною зразка та віссю його поздовжньої симетрії. Кінцевий результат визначення міцності на згин розраховується як середнє арифметичне значення показників, отриманих під час випробування трьох зразків-балочок. При цьому кожен індивідуальний результат фіксується з точністю не менше ніж

0,1 МПа, і середнє арифметичне значення також округлюється до вказаної точності. Результати випробувань заносимо у таблицю № 1.

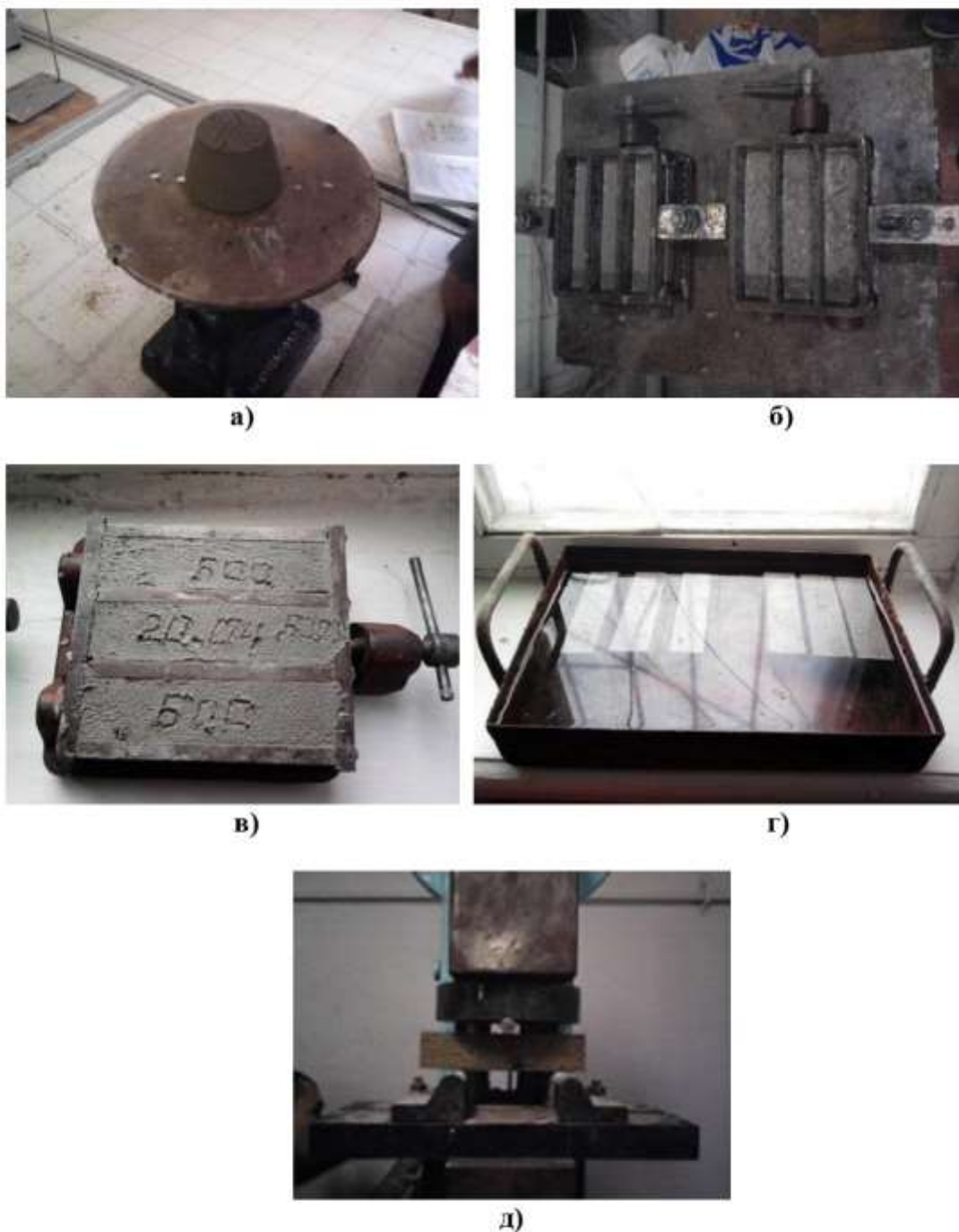


Рисунок 3.10. Етапи проведення визначення границі міцності на згин
а) розплив конуса цементного зразка після струшування - 30 разів на столику;

- б) встановлення на вібромайданчик та вібрування цементних зразків - 3 хв. ;
- в) цементні зразки після ущільнення на вібромайданчику; г) розпалубка та збереження цементних зразків протягом - 28 діб у воді при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$;
- д) встановлення на прес та випробування цементних зразків на згин.

3.1.1.2. Визначення межі міцності при стиску

Межа міцності при стиску визначаємо згідно ДСТУ Б В.2.7-187:2009 "Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск" [19].

Для випробувань на стиск застосовують шість фрагментів зразків-елементів, отриманих після проведення тестів на вигин. Прикладання навантаження до цих фрагментів виконується за допомогою двох опорних пластин із нержавіючої сталі розмірами $40 \times 62,5$ мм. Кожен фрагмент зразка поміщають між пластинами таким чином, щоб бічні поверхні, які в процесі виготовлення контактували зі стінками форми, розташовувалися на площинах пластин. Опорні поверхні пластин мають щільно прилягати до гладких торцевих поверхонь зразків. За цих умов площа контакту зразка з пластиною дорівнює 25 см^2 . Для визначення межі міцності на стиск використовується прес із граничним навантаженням у діапазоні від 200 до 250 кН. Середня швидкість підвищення навантаження під час випробувань має підтримуватися на рівні $2 \pm 0,5 \text{ МПа/с}$. Зразок, змонтований з пластин, розміщують на опорній плиті преса, після чого його навантажують до моменту руйнування. Значення руйнівного навантаження фіксують за шкалою вимірювального приладу. Міцність на стиск для кожного окремого зразка розраховують як відношення величини руйнівного навантаження в Ньютонах (Н) до робочої площі пластини, яка дорівнює 2500 мм^2 . Підсумковий результат випробування міцності на стиск визначають як середнє арифметичне значення чотирьох найвищих показників, отриманих при тестуванні всіх складових елементів. Кожен окремий показник, а також середнє значення, зазначають з точністю що є не меншою ніж $0,1 \text{ МПа}$.

3.1.2 Щебінь

Для приготування бетону використовувався щебінь, що був у наявності лабораторії кафедри будівельних матеріалів що відповідає фракції 5-10. Для нього визначалися такі параметри як:

- насипна густина;
- істина густина;
- зерновий склад;
- дробимість;
- пустотність

Вищевказані характеристики визначалися згідно з [21];

Визначення дробимості щебеня

Дробимість щебеня (гравію) по мірі руйнування зерен мінералу при роздавлюванні в циліндрі визначають згідно ДСТУ Б.В.2.7-71-98 [20].

Для досліджень використовуємо таке обладнання та засоби контролю:

- Прес гідравлічний ПСУ-250 з максимальним зусиллям до 250 тс;
- Циліндр сталевий з внутрішнім діаметром - 150 мм і заввишки - 150 мм зі знімним дном і плунжером (Рисунок 3).

Обробка результатів випробування

Дробимість D_p , %, розраховують з точністю до 1 % по формулі:

$$D_p = \frac{m - m_1}{m} \cdot 100$$

де m - маса даної проби щебеня (гравію), г;

m_1 - маса залишку зважена на контрольному ситі після просіювання роздавленої в циліндрі проби щебеню, г.



Рисунок. 3.1 Визначення дробимості пресом гідравлічним ПСУ-250

3.2. Визначення зернового складу щебеня

Проведення досліджень гранулометричного складу щебеню (гравію) здійснюється шляхом механічного розсіювання наважки матеріалу через набір стандартних сит. Методика проведення аналізу та параметри обладнання регламентуються вимогами ДСТУ Б В.2.7-71-98, що поширюється на матеріали із щільних гірських порід та промислових відходів для будівельної галузі. [20].

Засобів контролю і допоміжне обладнання:

- Ваги лабораторні
- Шафа сушильна.
- Сита з отворами, які потрібні для розмірів зерен даної фракції : 1,25 Д; Д; 0,5 (Д+d); d, а також 2,5 і 1,25 мм.

Порядок підготовки і проведення випробування:

При ручному просіюванні допускається визначати закінчення просіювання наступним способом: кожне сито добре трясуть-просіюють над аркушем паперу. Обробка результатів випробування. За результатами просіювання визначають частковий залишок на кожному ситі a_i %, за масою по формулі:

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100$$

де m_i - маса залишку на цьому ситі, g ;

m - маса проби, g .

Визначення повних залишків на кожному контрольному ситі виконується у відсотках від загальної маси досліджуваної проби. Величина повного залишку обчислюється як сума часткових залишків, отриманих на поточному ситі, та на всіх ситах із більшим розміром вічок. Повний залишок на кожному ситі A_i %, за масою по формулі:

$$A_i = a_{12,5} + a_{10} + \dots + a_i$$

де $a_{12,5}, a_{10}, a_i$ - частковий залишок на відповідних ситах, g .

Результати випробувань заносимо у таблицю № 6.



а)

б)

Рисунок 3.2. Просіювання зернового складу щебеня

а) Щебінь попередньо промитий та висушений;

б) стандартний набір сит для (ручного просіювання).

3.1.3 Пісок

Для приготування серії зразків був використаний пісок кварцовий миколаївського родовища, полтавський річковий пісок та піщаногравійна суміш для якого були визначені такі характеристики:

- істина густина;

- насипна густина;
- модуль крупності;
- вміст у піску пиловидних і глинистих часток;
- наявність органічних домішок у піску.

Вищевказані характеристики визначалися згідно з [22];

Результати усіх випробувань вихідних матеріалів наведені у розділі 4.

Визначення зернового складу та крупності піску

Зерновий склад визначаємо шляхом просівання проби на стандартному наборі сит згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010 "Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань" [23].

Підготовлену наважку піску просіюють крізь сита з круглими отворами діаметром - 2,5 мм із сітками - № 1,25; 0,63; 0,315 і 0,16.

Просіювання здійснюють механічним або ручним способами. При ручному просіюванні допускається встановлювати закінчення просіювання після інтенсивного струшування-просіювання кожного сита над аркушем паперу.

Просіювання вважають закінченим, якщо при цьому практично не відбувається падіння зерен піску.

За результатами просіювання розраховують:

- частковий залишок на кожному ситі a_i , %, за масою по формулі:

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100$$

де m_i - маса залишку на цьому ситі, г;

m - маса проби, г.

- повний залишок на кожному ситі A_i , %, за масою по формулі:

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,25} + \dots + a_i$$

де $a_{2,5}, a_{1,25}, a_i$ - частковий залишок на відповідних ситах, г.

- модуль крупності піску M_x без зерен розміром понад 5 мм згідно з формулою:

$$M_x = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}}{100}$$

де $A_{2,5}, A_{1,25}, A_{0,63}, A_{0,315}, A_{0,16}$ - повний залишок на відповідних ситах, %.

Результати випробувань заносимо у таблицю № 7-8.



а)



б)

Рисунок 3.3. Просіювання зернового складу піску та визначення модуля крупності а) посудина з піском для просіювання;

б) контрольні сита з піском для просіювання (механічним способом).

3.4. Визначення зернового складу та крупності піщано - гравійної суміші

Зерновий склад визначаємо шляхом просіювання проби на стандартному наборі сит згідно ДСТУ Б В.2.7-71-98 "Щебінь і гравій із щільних гірських порід

і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико - механічних випробувань"[20].

Підготовлену наважку піщано - гравійної суміші просіюють крізь сита з круглими отворами діаметром - 7,5 мм, 5 мм, 3 мм, а потім залишок що пройшов крізь сита на підоні просіюють крізь сита діаметром - 2,5 мм із сітками - № 1,25; 0,63; 0,315 і 0,16.

Просіювання здійснюють механічним або ручним способами. При ручному просіюванні допускається встановлювати закінчення просіювання після інтенсивного струшування кожного сита над аркушем паперу.

Просіювання вважають закінченим, якщо при цьому практично не спостерігається падіння зерен піску.

Результати випробувань заносимо у таблицю № 11-12.

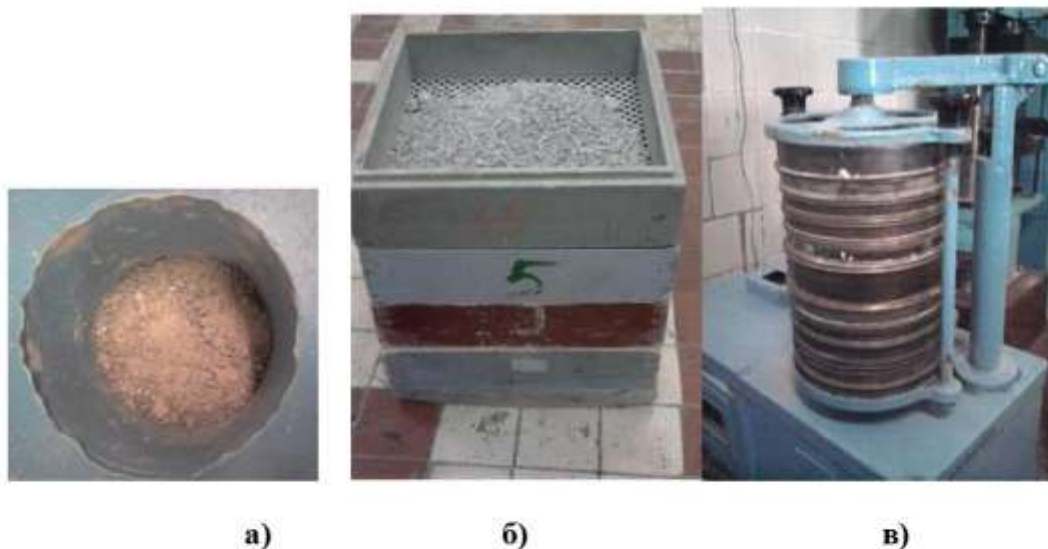


Рисунок 3.4. Просіювання зернового складу піщано - гравійної суміші та визначення модуля крупності

- а) посудина з піщано - гравійної суміші для просіювання;
- б) контрольні сита з піщано - гравійної суміші для просіювання (ручним способом).
- в) контрольні сита з піщано - гравійної суміші для просіювання (механічним способом)

3.1.4 Вода

Вода, що застосовується для приготування бетонних сумішей та розведення хімічних добавок, повинна відповідати встановленим нормативним вимогам. Зокрема, максимально допустимий вміст органічних поверхнево-активних речовин (ПАР), цукрів та фенолів у воді не повинен перевищувати 10 мг/л для кожного компонента окремо. Не допускається також наявність на водній поверхні слідів нафтопродуктів, мастильних матеріалів, жирових речовин або інших олійних домішок.

3.1.5 Добавка

Добавка для виготовлення зразків використовувалася пластифікатор на основі ефірів полікарбоксилатів пластифікатор.

3.2. Підбір складу бетонної суміші

Підбір складу бетонної суміші для виробництва тротуарних виробів відбувався згідно ДСТУ Б В.2.7-215:2009 [25] та ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013[24].

Підбираємо склад важкого бетону по масі та об'єму (Ц:П:Щ при В/Ц) на 1 м^3 бетонної суміші при таких вихідних даних:

- клас бетону за міцністю: $C45/55,720\text{ кгс/см}^2$;
- марка цементу: $M_n = 500$;
- легкоукладність бетонної суміші: 10 – 15с (жорсткі суміші);

В якості крупного заповнювача використовуємо щебінь.

- найбільша крупність куска щебеня: $D_{\text{макс}} = 10\text{ мм}$;
- пісок: $M_{sp} = 1$;
- насипна густина щебеню: $\rho_{nz}^m = 1345\text{ кг/м}^3$;
- істинна густина щебеню: $\rho_{iz}^m = 2750\text{ кг/м}^3$;
- істинна густина піску: $\rho_{iz}^n = 2500\text{ кг/м}^3$;
- насипна густина піску: $\rho_{nz}^n = 1420\text{ кг/м}^3$;
- істинна густина цементу: $\rho_{iz}^n = 3095\text{ кг/м}^3$;

- насипна густина цементу : $\rho_{н.с.}^н = 1322 \text{ кг} / \text{м}^3$;

Марка щебеню за міцністю на стиск (у циліндрі) - 1000

Підбір складу важкого бетону за методом абсолютних об'ємів.

Існує багато методів розрахунку складу бетону, але в основу кожного з них покладено принцип "абсолютних об'ємів". Абсолютно щільну суміш практично одержати неможливо, у ній завжди лишається деяка частина повітря. Суть принципу полягає в припущенні, що сума абсолютних об'ємів компонентів ущільненої суміші справді становить 1 м^3 . Виражається це припущення рівнянням:

$$\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} + \frac{В}{\rho_{в}} = 1,$$

де Ц, П, Щ, В – витрати відповідно цементу, піску, щебеню, води, кг на 1 кг^3 бетонної суміші;

$\rho_{ц}, \rho_{п}, \rho_{щ}, \rho_{в}$ - істинна густина цих матеріалів, $\text{кг}/\text{м}^3$;

Завдання розрахунку полягає в тому, щоб визначити кожне з чотирьох невідомих цього рівняння, тобто знайти витрати кожного компоненту в кілограмах на 1 м^3 бетонної суміші.

Витрату води (водопотребу) визначають орієнтовно за заданою легкоукладністю суміші та видом і крупністю заповнювача.

Так як суміш жорстка - 10-15с, а крупність щебеня $D_{\text{маб.}} = 10 \text{ мм}$, витрата води становить $-185 \text{ л} / \text{м}^3$. Враховуючи модуль крупності піску вносимо поправку на витрату води: $B = 185 - 10 = 175 \text{ л} / \text{м}^3$.

Розраховуємо витрату матеріалів для класу бетону за міцністю на стиск – С45/55:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{A_1 \cdot R_{п}}{f_{cm} + 0,5 \cdot A_1 \cdot R_{п}} = \frac{0,4 \cdot 500}{720,3 + 0,5 \cdot 0,4 \cdot 500} = 0,32.$$

Витрата цементу (в кг на 1 м^3 бетонної суміші) розраховуємо за вже відомими величинами витрати води (В) та водоцементного відношення (В/Ц) за формулою:

$$Ц = \frac{B}{B/Ц} = \frac{175}{0,32} = 545 \text{ кг/м}^3$$

Пустотність щебню $V_{н.щ.}$, % за об'ємом визначаємо за формулою:

$$V_{н.щ.} = \left(1 - \frac{\rho_{н.г.}^m}{\rho_{i.г.}^m \cdot 1000}\right) \cdot 100$$

де $\rho_{н.г.}^m$ - насипна густина щебню, кг/см^3 ;

$\rho_{i.г.}^m$ - істинна густина зерен щебню, кг/см^3 ;

$$V_{н.щ.} = \left(1 - \frac{\rho_{н.г.}^m}{\rho_{i.г.}^m \cdot 1000}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{1345}{2750 \cdot 1000}\right) \cdot 100 = 51\%$$

Витрата крупного заповнювача - щебню (в кг на 1 м^3 бетону) визначається за формулою:

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{i.г.}^m} + \alpha \frac{1}{\rho_{н.г.}^m} \cdot V_{н.щ.}}$$

де $\rho_{i.г.}^m$ - істинна густина зерен щебню, г/см^3 ; $\rho_{н.г.}^m$ - насипна густина щебню, г/см^3 ; $V_{н.щ.}$ - пустотність щебню, частки одиниці;

α - коефіцієнт розсування зерен (приймають за таблицею № 10).

$$Щ = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{i.г.}^m} + \alpha \frac{1}{\rho_{н.г.}^m} \cdot V_{н.щ.}} = \frac{1000}{\frac{1}{2,750} + 1,20 \cdot \frac{1}{1,345} \cdot 0,51} = 1210 \text{ кг/м}^3$$

Витрата піску (в кг на 1 м^3 бетону) визначається за формулою:

$$П = \left[1 - \left(\frac{Ц}{\rho_{i.г.}^n} + \frac{Щ}{\rho_{i.г.}^m} + B\right)\right] \cdot \rho_{i.г.}^n$$

$Ц, Щ, B$ - витрата цементу, щебню та води, кг ;

$\rho_{i.г.}^n, \rho_{i.г.}^m, \rho_{i.г.}^n$ - істинна густина цементу, щебню та піску, г/см^3 .

$$П = \left[1 - \left(\frac{Ц}{\rho_{i.г.}^n} + \frac{Щ}{\rho_{i.г.}^m} + B\right)\right] \cdot \rho_{i.г.}^n = \left[1 - \left(\frac{545}{3,095} + \frac{1209,77}{2,750} + 175\right)\right] \cdot 2,500 = 525 \text{ кг/м}^3$$

Розраховуємо витрату матеріалів для класу бетону за міцністю на стиск - C55/65:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{A_1 \cdot R_H}{f_{cm} + 0,5 \cdot A_1 \cdot R_H} = \frac{0,4 \cdot 500}{982,5 + 0,5 \cdot 0,4 \cdot 500} = 0,23.$$

Витрата цементу (в кг на 1 м^3 бетонної суміші) розраховуємо за вже відомими величинами витрати води (B) та водоцементного відношення (B/C) за

$$\text{формулою: } C = \frac{B}{B/C} = \frac{175}{0,22} = 760\text{ кг} / \text{ м}^3$$

Пустотність щебню: $V_{\text{п.щ.}} = 51\%$

Витрата крупного заповнювача - щебню (в кг на 1 м^3 бетону) визначається за формулою:

$$\text{Щ} = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{\text{н.г.}}} + \alpha \frac{1}{\rho_{\text{п.г.}}} \cdot V_{\text{п.щ.}}} = \frac{1000}{\frac{1}{2,750} + 1,20 \cdot \frac{1}{1,345} \cdot 0,51} = 1210\text{ кг} / \text{ м}^3$$

Витрата піску (в кг на 1 м^3 бетону) визначається за формулою:

$$П = \left[1 - \left(\frac{C}{\rho_{\text{н.г.}}} + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{п.г.}}} + B \right) \right] \cdot \rho_{\text{н.г.}} = \left[1 - \left(\frac{795}{3,095} + \frac{1209,77}{2,750} + 175 \right) \right] \cdot 2,500 = 320\text{ кг} / \text{ м}^3$$

Таблиця 4.6. - Склад витрат матеріалу для класу бетону за міцністю на стиск

Клас бетону за міцністю	Витрата матеріалів на 1 м^3 бетоної суміші				
	Цемент, кг	Пісок, кг	Щебню, кг	Вода, л	Добавка, л
C45/55	545	522	1210	175	5,5
C55/65	795	320	1210	175	8

3.3. Методика виготовлення зразків - кубів

На початковому етапі проводилося дозування вихідних матеріалів (цементу, піску та щебеню) з використанням електронних лабораторних ваг відповідно до розрахованих складів. Підготовка бетонозмішувача до роботи включала очищення його внутрішніх поверхонь вологою тканиною для мінімізації втрат води замішування на змочування стінок обладнання. Враховуючи прийняте водоцементне відношення В/Ц, було обрано примусовий спосіб перемішування компонентів. Процес приготування суміші розпочинався із завантаження сухих складників у працюючий змішувач. Варто зазначити, що щебінь попередньо проходив підготовку: його просіювали крізь дрібне сито та промивали для повного видалення пилоподібних і глинистих часток. Первинне перемішування сухих компонентів тривало протягом 3 хвилин, що було незмінним часовим

регламентом для всіх дослідних замісів. Вода та пластифікатор вводилися сумісно. Після їх введення суміш перемішувалася до досягнення необхідної консистенції, протягом - 5 хвилин.

На основі щойно приготовленої бетонної суміші здійснювалося формування контрольних зразків-кубів із розмірами 100x100 x100 мм. Внутрішні поверхні форм попередньо оброблялися тонким шаром спеціального мастила, яке не залишає слідів і не чинить негативного впливу на властивості поверхневого шару бетону. Після заповнення форм та завершення процесу ущільнення верхня грань кожного зразка ретельно вирівнювалася за допомогою кельми. Для досягнення необхідної щільності суміші використовувався лабораторний вібромайданчик, при цьому тривалість вібрування варіювалася відповідно до прийнятого плану експерименту. Початкове тверднення зразків високоміцного бетону відбувалося протягом 24 годин безпосередньо у формах за температури- $t \pm 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ та відносної вологості повітря 95–97%. Надалі зразки витягувалися з форм і зберігалися у водному середовищі впродовж наступних 27 діб до моменту проведення випробувань.

3.4. Підготовка до випробувань зразків - кубів

Перед початком випробувань проводився візуальний контроль зразків з метою виявлення можливих дефектів: раковин, сколів ребер або сторонніх включень. Згідно з методикою, відбраковуванню підлягали вироби з тріщинами, сколами глибиною понад 10 мм, а також раковинами, діаметр яких перевищував 10 мм, а глибина — 5 мм. Крім того, до випробувань не допускалися зразки з ознаками розшарування або недостатнього ущільнення бетонної суміші. Наявні на ребрах опорних граней напливи бетону видалялися механічним способом за допомогою напилка для забезпечення щільного прилягання до плит преса.

3.5. Випробування зразків - кубів

У кожній серії зразків визначалися такі характеристики, як середня густина (згідно з [30]), межа міцності при стиску (згідно з [31]). Для визначення міцнісних і деформаційних характеристик бетону були проведені випробування

контрольних зразків - кубів у віці 28 діб відповідно до ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [31].

Вибір опорних поверхонь зразків-кубів для подальших випробувань на стиск здійснювався з урахуванням того, щоб вектор прикладеного навантаження був орієнтований паралельно напрямку пошарового укладання бетонної суміші у форми. Перед початком тестів було проведено контроль перпендикулярності суміжних граней; виявлені відхилення від геометричних параметрів усувалися шляхом прецизійного шліфування опорних площин. Загальний рівень виготовлення контрольних зразків оцінено як задовільний, що підтверджується стабільністю площі їхнього поперечного перерізу та мінімальною мінливістю геометричних розмірів

3.6. Визначення жорсткості бетонної суміші

Визначення жорсткості бетонної суміші відбувалося приладом Красного що встановлюють у форму згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002 "Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань" [29]

Методика проведення випробувань. Процес визначення показника жорсткості розпочинається із заповнення встановленої на вібромайданчик форми бетонною сумішшю без попереднього ущільнення. Надлишок матеріалу видаляється кельмою врівень із верхньою гранню бортів форми. Після цього у суміш занурюють прилад Красного, встановлюючи його ніжками донизу до моменту повного контакту диска з поверхнею матеріалу.

Визначення показника полягає в одночасному ввімкненні вібромайданчика та секундоміра. Процес вібрування триває до появи цементного тіста у будь-яких двох технологічних отворах диска приладу, після чого роботу обладнання припиняють. Тривалість цього процесу, зафіксована у секундах, є кількісною характеристикою жорсткості бетонної суміші.

Аналіз та обробка результатів. Показник жорсткості встановлюється як середнє значення за результатами двох послідовних випробувань. Для забезпечення точності та збереження властивостей суміші регламентовано, що сумарний час

проведення обох циклів — від моменту заповнення форми для першого тесту до завершення вібрування у другому — не повинен перевищувати 10 хвилин.



а)

б)



Рисунок 3.8. Випробування жорсткості бетонної суміші методом Красного

- а) перевірка осадка конуса на жорсткість суміші;
 б) встановлення на вібромайданчик та ущільнення до появи виділення цементного тіста з будь яких отворів диска.

3.7. Визначення середньої густини зразків - кубів

Густину визначаємо згідно ДСТУ Б.В.2.7-170:2008, випробуванням зразків кубічної форми з ребром 100 мм, призначених для визначення міцності [30].

Для проведення випробування застосовуємо ваги лабораторні, штангенциркуль, сталеву лінійку.

Густину визначаємо випробуванням зразків у стані природної вологості відразу ж після їх відбору. Об'єм зразків обраховуємо за їх геометричними

розмірами. Розміри зразків бетону визначаємо штангенциркулем з похибкою не більше 0,1 мм.

Густина зразка ρ_m обчислюємо з похибкою до 1 кг/м³ формулою:

$$\rho_m = \frac{m}{V} \cdot 1000,$$

де m - маса зразка, висушеного до постійної маси, г;

V - об'єм зразка, см³.

Результати випробувань заносимо у таблицю № 14-20.

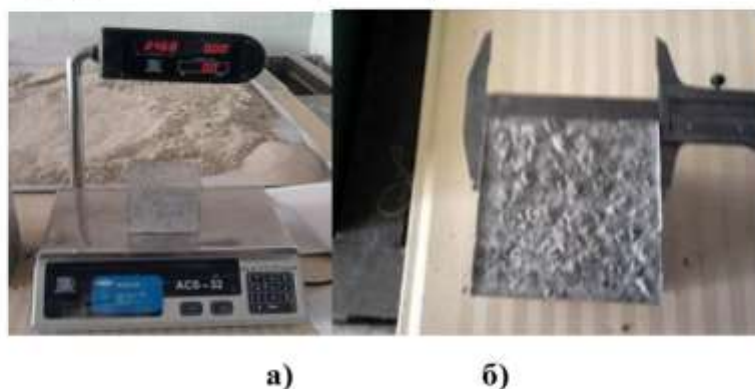


Рисунок 3.9. Вимірювання розмірів зразка - куба

а) визначення маси зразка; б) визначення об'єму зразка штангенциркулем.

3.8. Визначення міцності на стиск зразків - кубів (руйнівним методом)

ПГ - 100 і ПСУ - 250

Міцність на стиск зразків-кубів визначаємо згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 "Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками", розмірами - 100x100 x100 мм у віці 2,7 і 28 діб [31].

Під час проведення випробувань на стиск зразки-куби розміщують на нижній опорній плиті преса, орієнтуючи їх обраною гранню суворо по центру відносно поздовжньої осі обладнання. Центрування здійснюється за допомогою нанесених на плиту розмічальних рисок або спеціалізованих пристроїв.

Методика передбачає можливість використання додаткових сталевих опорних плит, що встановлюються між робочими поверхнями преса та зразком.

На початковому етапі навантаження верхню плиту преса приводять у контакт із верхньою гранню зразка (або додатковою плитою), забезпечуючи їхнє повне та

рівномірне прилягання по всій площині. Після перевірки щільності контакту розпочинають процес силового навантаження до моменту руйнування зразка.

Міцність на стиск зразків - кубів обчислюємо для кожного зразка з похибкою до 0,01 МПа (0,1 кгс/см²) за формулою:

$$\sigma_{cm} = \frac{F}{A}$$

де F - руйнівне навантаження, кгс ;

A - робоча площа перерізу зразка, см².

Результати випробувань заносимо у таблицю № 21-23.



а)



б)



в)



г)





Рисунок 3.11. Етапи проведення визначення міцності стиск зразків - кубів
 а) встановлення зразків - кубів в металевих формах на віброплощадку для ущільнення; б) зразки - куби в металевих формах після ущільнення;
 в) зразки - куби після розпалубки; г) встановлення на прес зразка - куба на стиск;
 д),е) зразки - куби після випробування на пресі.

3.9. Визначення границі міцності зразків - кубів (неруйнівним методом) електронного склерометра ОНІКС - 2.5

Міцність бетону (неруйнівними методами) визначаємо згідно ДСТУ Б В.2.7-220:2009 "Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю" [32].

Електронний склерометр ОНІКС-2.5 є портативним приладом, призначеним для оперативного неруйнівного контролю міцнісних характеристик, класу та однорідності бетонів різних типів (легкого, важкого, високоміцного). Пристрій використовує метод ударного імпульсу і застосовується як під час поточних технологічних випробувань, так і при обстеженні існуючих будівельних об'єктів. Окрім бетону, склерометр може використовуватись для оцінки міцності цегли, будівельних розчинів та інших матеріалів.

Методика оцінки міцності бетону передбачає виконання серії до 10 ударних впливів на визначеній контрольній ділянці конструкції. На основі отриманих від датчика характеристик ударного імпульсу, електронний модуль приладу аналізує твердість та пружно-пластичні властивості досліджуваного об'єкта. Шляхом автоматичної обробки та перетворення параметрів динамічного

імпульсу система розраховує міцність матеріалу на стиск та встановлює його відповідний клас.

Результати випробувань заносимо у таблицю № 24-29.



Рисунок 3.12. Електронний склерометр (вимірювач міцності бетону)

ОНІКС - 2.5

РОЗДІЛ 4

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1. Характеристика цементу

4.1 Цемент

Для проведення експериментальних досліджень використано цемент марки СЕМ І (42,5R). Виробник ПАТ "ХайдельбергЦемент Україна".

За технічними характеристиками виробника, обраний цемент характеризується інтенсивним набором міцності на початкових етапах тверднення. Специфіка його мінералогічного складу, а саме підвищена концентрація трикальцієвого силікату C_3S у поєднанні з низьким вмістом трикальцієвого алюмінату C_3A , створює передумови для проектування на його основі бетонних композитів із високими показниками довговічності та стійкості до зовнішніх впливів

Згідно даних виробника даний цемент відзначається високою ранньою міцністю, а високий вміст у клінкері і низький вміст свідчить про можливість отримання на основі такого цементу бетонів високої стійкості.

4.1.1 Тонкість помелу цементу

Тонкість помелу цементу перевірялася згідно з вимогами нормативних документів EN 197-1 та ДСТУ Б В.2.7-188:2009 [18], використаний метод визначення даної характеристики за залишком на стандартному ситі. Нижче приведені результати, у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 Результати визначення тонкості помелу цементу

№ дослід	Маса наважки, г	Залишок на ситі, г	Тонкість помелу, %
1	50	2,61	5,22

4.1.2 Нормальна густина

Нормальна густина визначалася згідно EN 197-1 з ДСТУ Б В.2.7-185:2009 [16]. Результати наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Результати випробування нормальної густини цементного тіста

№ досліду	Кількість води замішування, мл	Показання приладу Віка, мм	Нормальна густота, %
1	110	4,1	26

4.1.3 Марка за міцністю на стиск

Марка за міцністю при стиску цементу випробувалась на зразках-балочках що мають розміри 40x40x160 мм згідно із вимогами EN 197-1 та ДСТУ Б В.2.7-187 [19]. 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
1	28	12352	42,1
2	28	12998	44,1
3	28	12365	42,2
4	28	13754	45,4
5	28	12658	42,6
6	28	12589	42,5

4.2. Характеристика піску

Пісок перевіряємо на відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.7- 32- 95 "Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів конструкції і виробів. Технічні умови" [22].

На всі види піску поширюється ДСТУ Б В.2.7-232:2010 [23], який встановлює загальні положення при випробуванні пісків для визначення показників:

- зерновий склад і модуль крупності піску;
- вміст пиловидних та глинистих часток у піску;
- істинна густина піску;
- насипна густина піску;
- пустотність піску.

Результати випробувань, що порівняні з вимогами, наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. - Характеристика піску

Найменування показників	Вимоги нормативних документів	Результати випробувань
Модуль крупності	до 2,2	1,00
Вміст пиловидних і глинистих часток	до 7 %	6,5 %
Істинна густина	2,0...2,8 г/см ³	2,55 г/см ³
Насипна густина	не менше 1100 кг/см ³	1415 кг/см ³
Пустотність	-	42 %

4.2.1. Результати визначення зернового складу піску $M_{кр} = 1$

Зерновий склад піску визначалася за методикою, наведеною у розділі 3.3.

Результати визначення зернового складу піску наведені у таблиці 4.2.1

Таблиця 4.2.1. - Результати визначення зернового складу піску $M_x = 1$

Найменування залишку	Залишки, % за масою, на ситах				
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16
Частковий	0,5	0,5	1,7	5,1	80,8
Повний	0,5	1,0	2,7	7,8	87,8

4.2.2. Результати визначення зернового складу підбраного піску

$M_{кр} = 2,2$

Таблиця 4.2.2. - Визначення зернового складу підбраного піску $M_x = 2,29$

Найменування залишку	Залишки, % за масою, на ситах				
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16
Частковий	4,3	12,1	34,1	11,8	35,6
Повний	4,3	16,4	50,5	62,2	97,8

4.2.3. Результати визначення зернового складу піску гранітного

Зерновий склад піску гранітного визначалася за методикою, наведеною у розділі 3.4. Результати визначення зернового складу піску гранітного наведені у таблиці № 9.

Таблиця 4.2.3. - Визначення зернового складу піску гранітного

Найменування залишку	Залишки, % за масою, на ситах				
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16
Частковий	23	15,8	20,2	8,5	29
Повний	23	38	58	65	94

4.2.4. Результати визначення зернового складу гранвідсіву

Зерновий склад гранвідсіву визначалася за методикою, наведеною у розділі 3.2.

Результати визначення зернового складу гранвідсіву наведені у таблиці № 10.

Таблиця 4.2.4. - Визначення зернового складу гранвідсіву

Найменування залишку	Залишки, % за масою, на ситах	
	5	3
Частковий	8,1	70,5
Повний	8,5	79

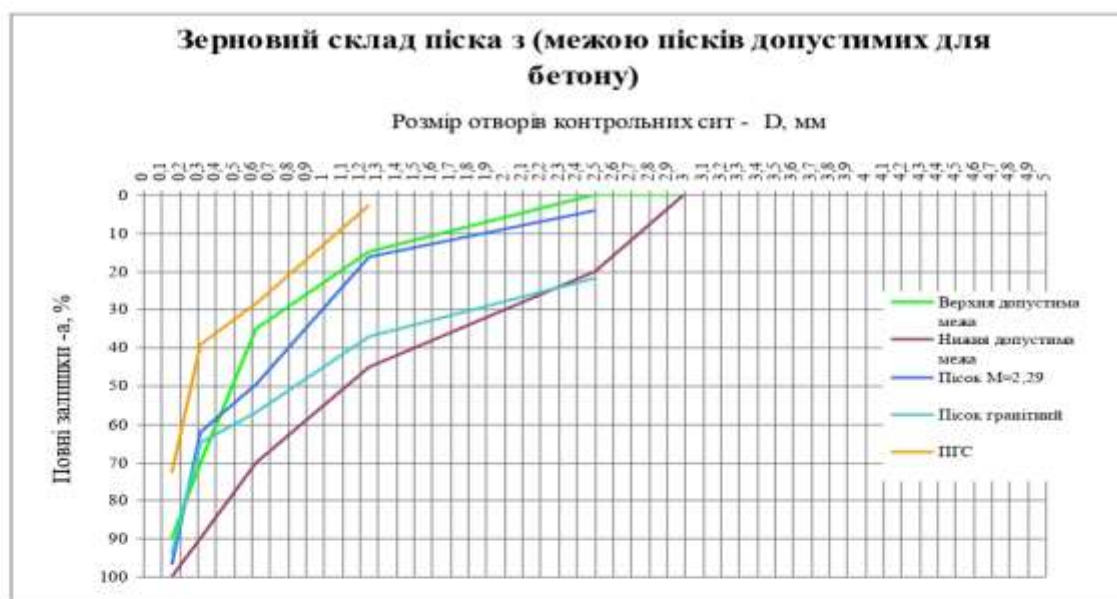


Рис. 4.1 Графік зернового складу пісків з (повними залишками та розмірами контрольних сит) та їх попадання в межі пісків допустимих для бетону

Крива, що характеризує зерновий склад підбраного піску $M_{кр} = 2,2$, розміщена у допустимій області, то цей пісок найефективніший для виготовлення важкого бетону.

4.3. Характеристика щебня

Щебінь перевіряємо на відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.7.-75-98 "Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкції і робіт. Технічні умови" [20].

На всі види щебеню поширюється ДСТУ Б В.2.7-71-98 [21], який встановлює загальні положення при випробуванні пісків для визначення показників:

- вміст пиловидних та глинистих часток у щебені;
- істинна густина щебеня;
- насипна густина щебеня;
- пустотність щебеня;
- дробимість щебеня.

Результати випробувань, порівняні з вимогами, наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. - Характеристика щебеня

Найменування показників	Результати випробувань
Вміст пиловидних і глинистих часток	5,1 %
Істинна густина	2,7 г/см ³
Насипна густина	1350 кг/см ³
Пустотність	50 %
Дробимість щебеня	76 %

4.3.1. Результати визначення зернового складу щебня

Зерновий склад щебеня визначалася за методикою, наведеною у розділі 3.2.

Результати визначення зернового складу щебеня наведені у таблиці 4.3.1.

Таблиця 4.3.1. - Визначення зернового складу щебеня

Найменування залишку	Залишки, % за масою, на ситах				
	12,5	10	7,5	5	2,5
Частковий	0,15	0,61	75,35	15,95	0,21
Повний	0,15	0,76	76,11	92,06	92,27

Лінія зернового складу розміщується в допустимій області, тому щебінь придатний для бетону.

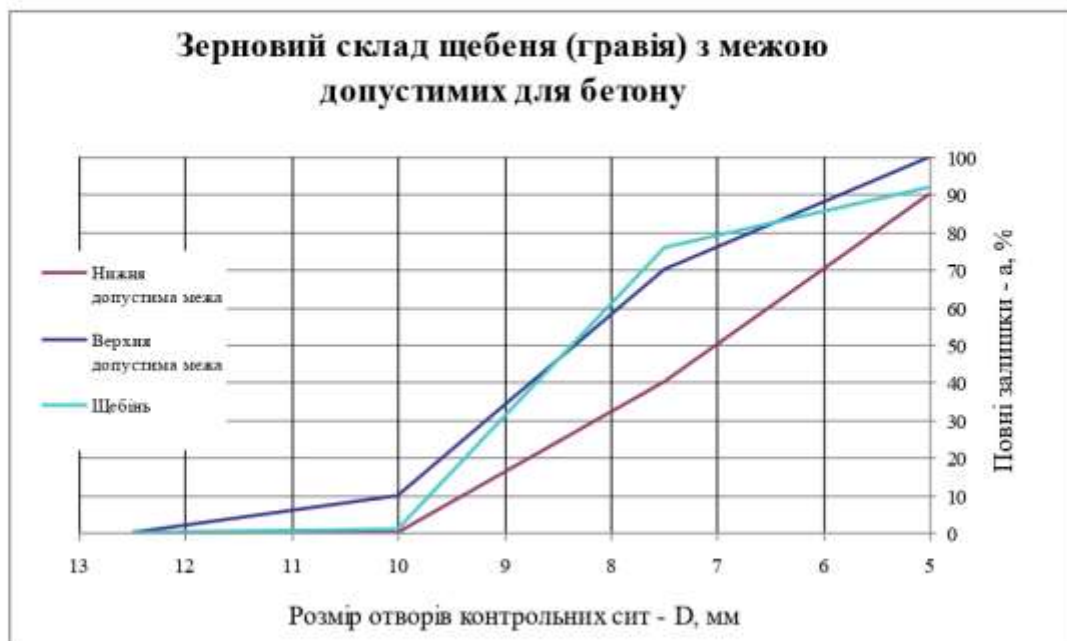


Рисунок 4.2. Графік зернового складу щебеня з (повними залишками та розмірами контрольних сит) та їх попадання в межі допустимих для бетону

4.4. Характеристика піщано - гравійної суміші

Піщано - гравійну суміш перевіряємо на відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.7-203:2009 "Будівельні матеріали. Суміші піщано-гравійні для будівельних робіт. Технічні умови" [28]. На всі види піщано - гравійної суміші поширюється ДСТУ Б В.2.7-71-98 [21], який встановлює загальні положення при випробуванні піщано - гравійної суміші для визначення показників:

- зерновий склад і модуль крупності піщано - гравійної суміші;
- вміст пиловидних та глинистих часток у піщано - гравійної суміші;
- істинна густина піщано - гравійної суміші;
- насипна густина піщано - гравійної суміші;
- пористість піщано - гравійної суміші.

Результати випробувань, порівняні з вимогами, наведені у таблиці 4.4.1.

Таблиця 4.4. - Характеристика піщано - гравійної суміші

Найменування показників	Вимоги нормативних документів	Результати випробувань
Модуль крупності	-	1,44
Вміст пиловидних і глинистих часток	до 5 %	4 %
Істинна густина	-	2,6 г/см ³
Насипна густина	-	1415 кг/см ³
Пустотність	-	44 %

4.4.1. Результати визначення зернового складу піщано - гравійної суміші

Зерновий склад піщано - гравійної суміші визначалася за методикою, наведеною у розділі 3.4. Результати визначення зернового складу піщано - гравійної суміші наведені у таблиці № 11.

Таблиця 4.4.1. - Визначення зернового складу піщано - гравійної суміші

Найменування залишку	Залишки, % за масою, на ситах		
	7,5	5	3
Частковий	13,2	21	25,7
Повний	13,2	34,2	59,9

Таблиця 4.4.2. - Визначення зернового складу піщано - гравійної суміші

Найменування залишку	Залишки, % за масою, на ситах				
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16
Частковий	0	2,8	26	10,6	33,7
Повний	0	2,8	28,5	39,1	72,8

4.5. Характеристика добавки «Fluid Premia 196»

Fluid Premia 196 - суперпластифікатор нового покоління водоредукуюча добавка широкого спектру дії на основі модифікованого полікарбоксилату, рекомендується для бетонів, що характеризуються короткотерміною або довготерміною міцністю на стискання особливо рекомендується для бетону, що має здатність самовирівнюватись.

Властивості добавки «Fluid Premia 196»:

- дозволяє досягати дуже низьких пропорцій вода/цемент
- дозволяє скоротити час до виймання з форм або зекономити електроенергію шляхом зниження температури або часу обробки парою.

Таблиця 4.5. - Технічні характеристики добавки «Fluid Premia 196»

Найменування показників	Значення
Основа	рідина модифікованого полікарбоксилату
Зовнішній вигляд	молочно - зелений/сірий
Густина	1.055 ± 0.010 г/см ³

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Оброблення результатів дослідження проводилось з використанням програми MS Office Excel. У підрозділах 5.1 - 5.3 наведені результати проведених експериментів, що заплановані в розділі 3 роботи.

Проведено випробування на стиск досліджуваних зразків у віці 28 діб [31].

5.1. Результати визначення середньої густини зразків - кубів

Середню густину зразків визначено у відповідності до методики наведеною у розділі 3.9. [30]. Масу зразків визначаємо із похибкою не більше 0,1 %. Лінійні розміри зразків-кубів, перевіряємо із похибкою не більше 0,1 мм.

Вихідні дані та результати випробувань зразків занесено у таблицю 5.1.

Результати визначення густини зразків - кубів наведені в таблиці 5.1 - 5.6.

Таблиця 5.1. - Густина випробовуваних зразків (C45/55+ пісок $M_{sp} = 1$)

Клас бетону за міцністю C45/55	Середня густина зразків, кг/м ³
1	2350
2	2341
3	2432
4	2400
5	2438
6	2376

Таблиця 5.2. - Густина випробовуваних зразків (C55/65 + пісок $M_{sp} = 1$)

Клас бетону за міцністю	Середня густина зразків, кг/м ³
1	2413
2	2302
3	2365
4	2344
5	2390
6	2354

Таблиця 5.3. - Густина випробовуваних зразків (C45/55 + ПГС)

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Середня густина зразків, кг/м ³
C C45/55+ ПГС	2402
C45/55+ ПГС	2410
C45/55+ ПГС	2290
C45/55+ ПГС	2263
C45/55+ ПГС	2276
C45/55+ ПГС	2423

Таблиця 5.4. - Густина випробовуваних зразків (C55/65 + ПГС)

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Середня густина зразків, кг/м ³
C55/65 + ПГС	2422
C55/65+ ПГС	2477
C55/65 + ПГС	2358
C55/65+ ПГС	2452
C55/65+ ПГС	2422
C55/65+ ПГС	2396

Таблиця 5.5. - Густина випробовуваних зразків (C45/55 + пісок $M_{sp} = 2,2$)

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Середня густина зразків, кг/м ³
1	2502
2	2557
3	2426
4	2432
5	2417
6	2385

Таблиця 5.6. - Густина випробовуваних зразків (C55/65 + пісок $M_{sp} = 2,2$)

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Середня густина зразків, кг/м ³
1	2357
2	2360
3	2330
4	2370
5	2403
6	2345

Рисунок 5.1. Гістограма залежності середньої густини бетону класу C45/55 з піскоком $M_k = 1$

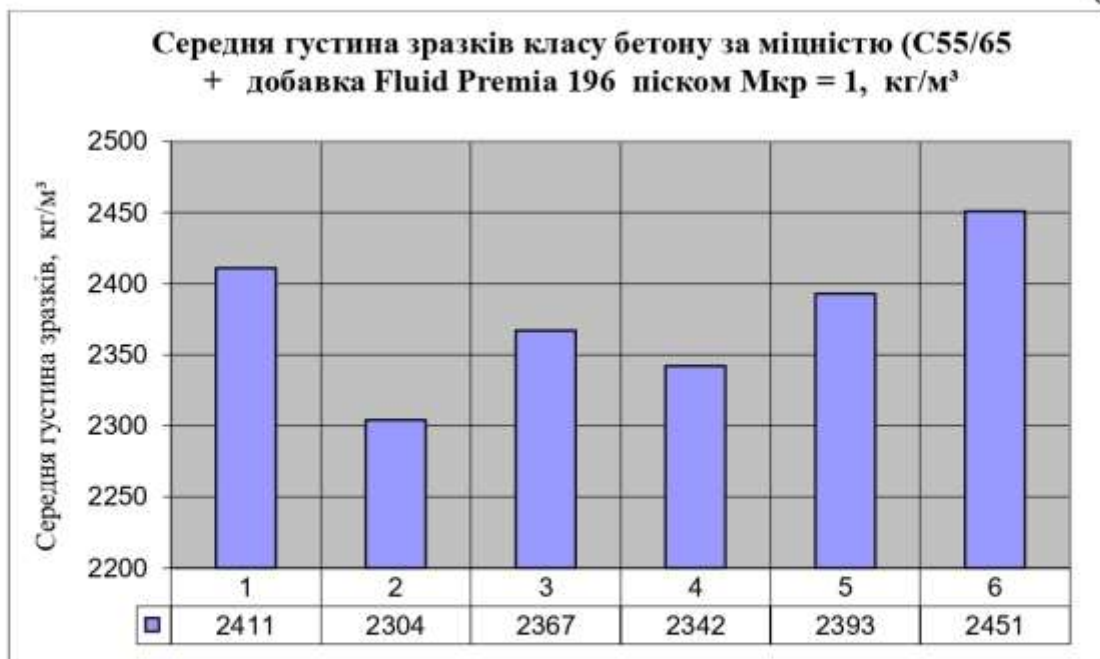


Рисунок 5.2. Гістограма залежності середньої густини бетону класу C55/65 з піском $M_{кр} = 1$



Рисунок 5.3. Гістограма залежності середньої густини бетону класу C45/55з піщано гравійною сумішшю

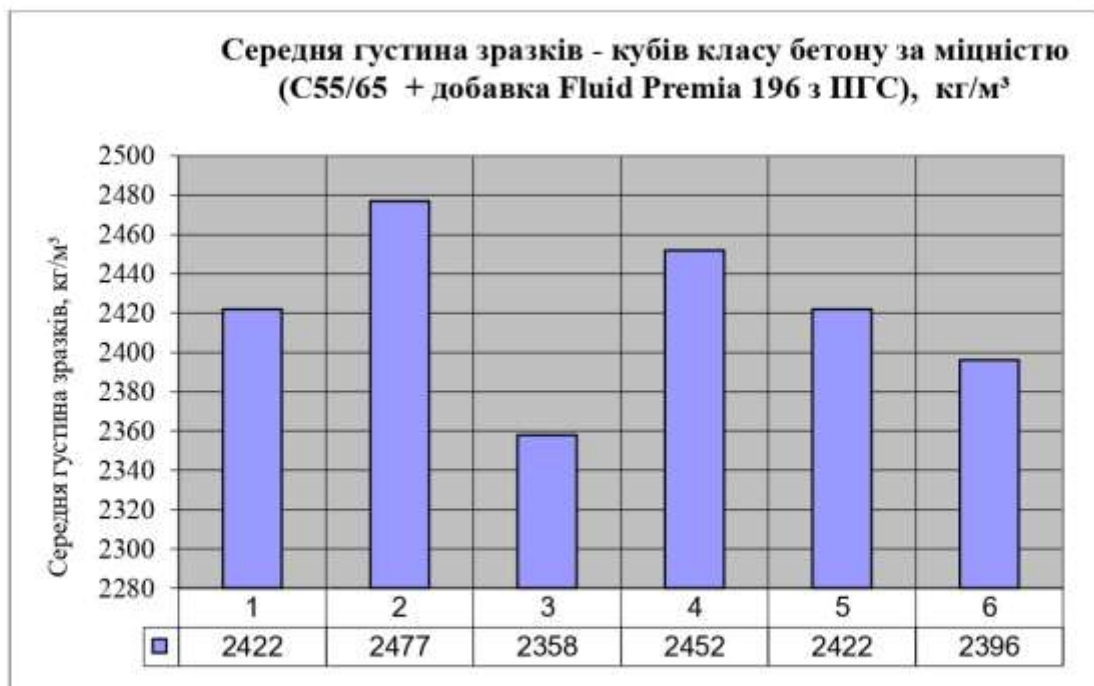


Рисунок 5.4. Гістограма залежності середньої густини класу C55/65 з піщано гравійною сумішшю

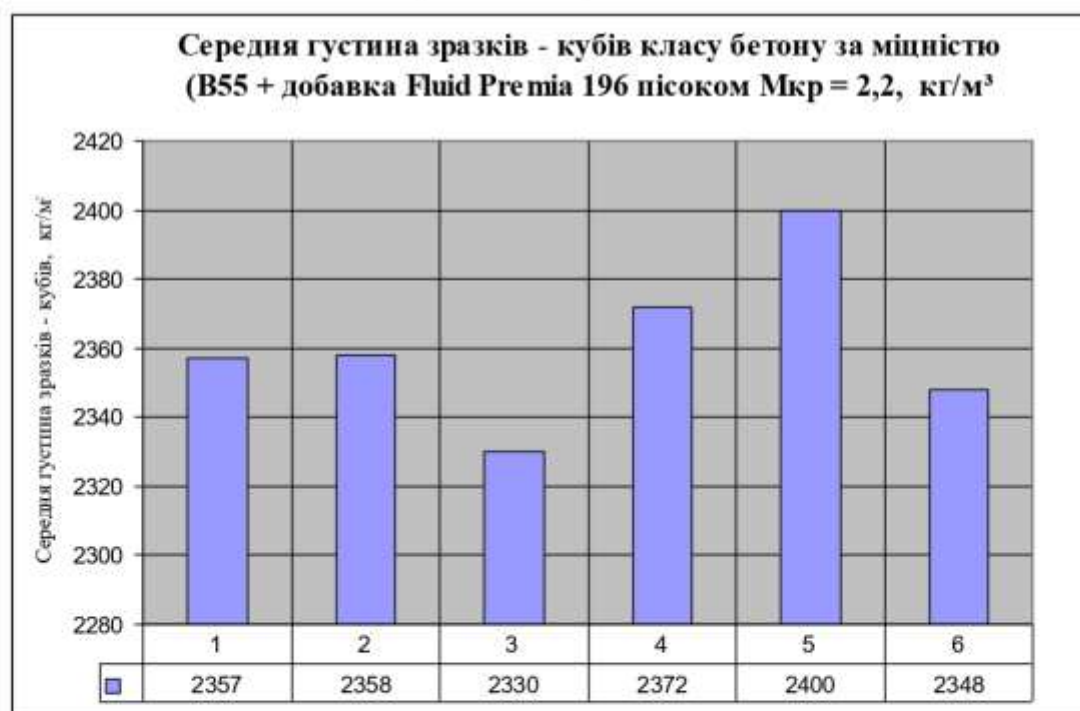


Рисунок 5.5. Гістограма залежності середньої густини бетону класу C45/55 з піском Мк = 2,2

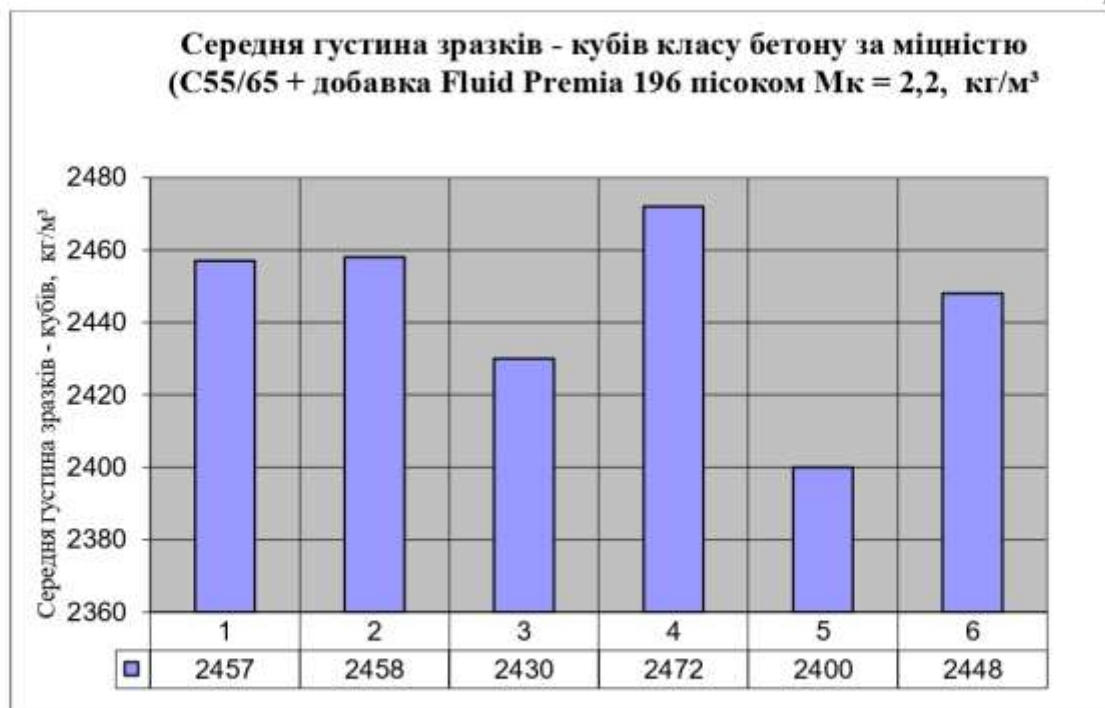


Рисунок 5.6. Гістограма залежності середньої густини від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Таблиця 5.7. - Середня густина випробовуваних зразків (C45/55 і C55/65)

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Середня густина зразків, $кг/м^3$
C45/55+ з піском $M_{кр} = 1$	2389
C55/65+ з піском $M_{кр} = 1$	2361
C45/55+ з ПГС	2343
C55/65+ ПГС	2421
C45/55+ з піском $M_{кр} = 2,2$	2420
C55/65+ піском $M_{кр} = 2,2$	2444

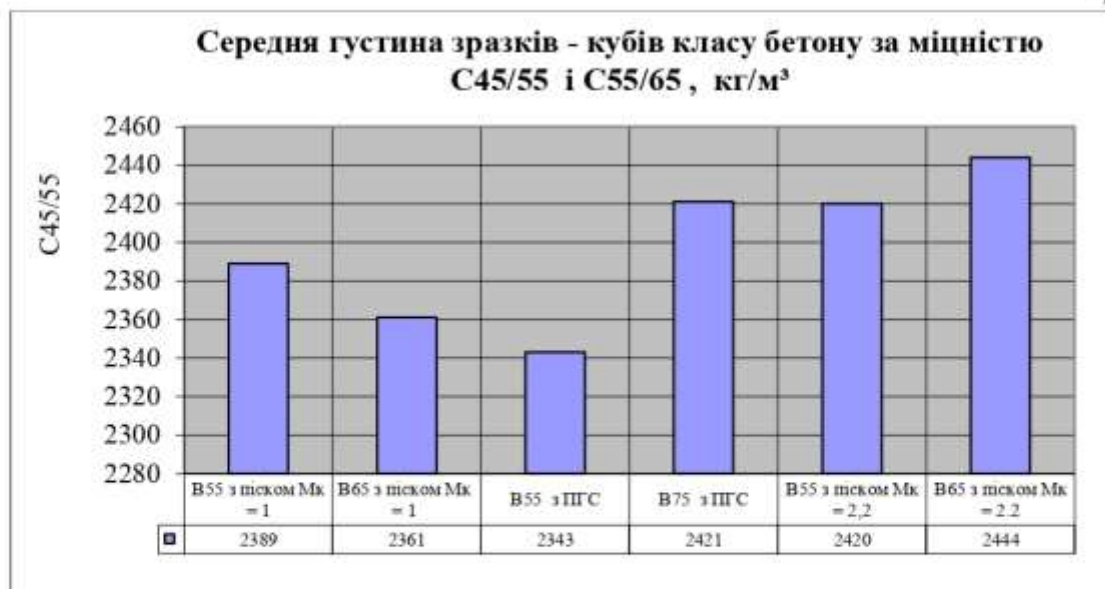


Рисунок 5.7. Гістограма залежності середньої густини від гранулометричного складу дрібного заповнювача

За середньою густиною зразки високоміцного бетону коливаються в межах - 2343 кг/м³ до 2444 кг/м³ відносяться до важкого бетону та зі збільшенням модулю крупності дрібного заповнювача середня густина зростає.

5.2. Результати визначення міцності на стиск зразків - кубів (руйнівним методом) ПГ - 100 і ПСУ - 250

Міцність на стиск зразків - кубів визначалася за методикою, наведеною у розділі 3.10.

Результати визначення міцності на стиск зразків - кубів у віці - 2 діб наведені в таблиці 5.8., у віці - 7 діб в таблиці 5.9., у віці - 28 діб в таблиці 5.10.

Таблиця 5.8. - Міцність на стиск зразків - кубів на пресі у віці - 2 діб

Клас бетону за міцністю	Міцність на стиск, МПа
C45/55+ з піском $M_{кр} = 1$	27,69
C55/65+ з піском $M_{кр} = 1$	38,68
C45/55+ з ПГС	30,11
C55/65+ з ПГС	41,00
C45/55+ з піском $M_{кр} = 2,2$	39,8
C55/65+ з піском $M_{кр} = 2,2$	47,2

Таблиця 5.9. - Міцність на стиск зразків - кубів на пресі у віці - 7 дів

Клас бетону за міцністю	Міцність на стиск, МПа
C45/55+ з піском $M_{кр} = 1$	37,4
C55/65+ з піском $M_{кр} = 1$	40,7
C45/55+ з ПГС	42,8
C55/65+ з ПГС	43,2
C45/55+ з піском $M_{кр} = 2,2$	42,9
C55/65+ з піском $M_{кр} = 2,2$	52

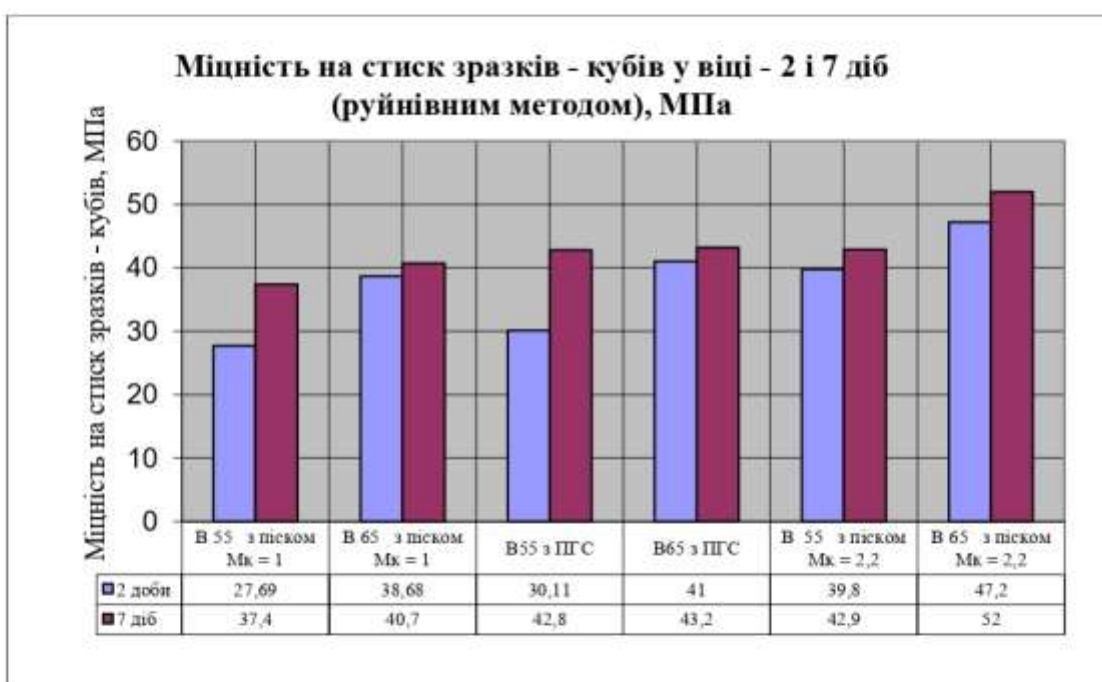


Рисунок 5.8. Гістограма залежності міцності при стиску у віці 2 і 7 дів від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Найбільша міцність отримана на $M_k=2,3$ розрахований клас C45/55 становить - 43 МПа, а найбільша міцність отримана при розрахунку на клас бетону C55/65 $M_k = 2,3$ становить - 52 МПа. Найменша на C45/55 $M_k = 1$ становить - 37,4 МПа і на C55/65 становить - 40,7 МПа.

Порівняння міцності зразків - кубів у віці 2 і 7 діб показано , що приріст міцності у 2 доби становить більше - 51 % від очікуваної міцності, а міцність у віці 7 діб близько - 70% від очікуваної міцності.

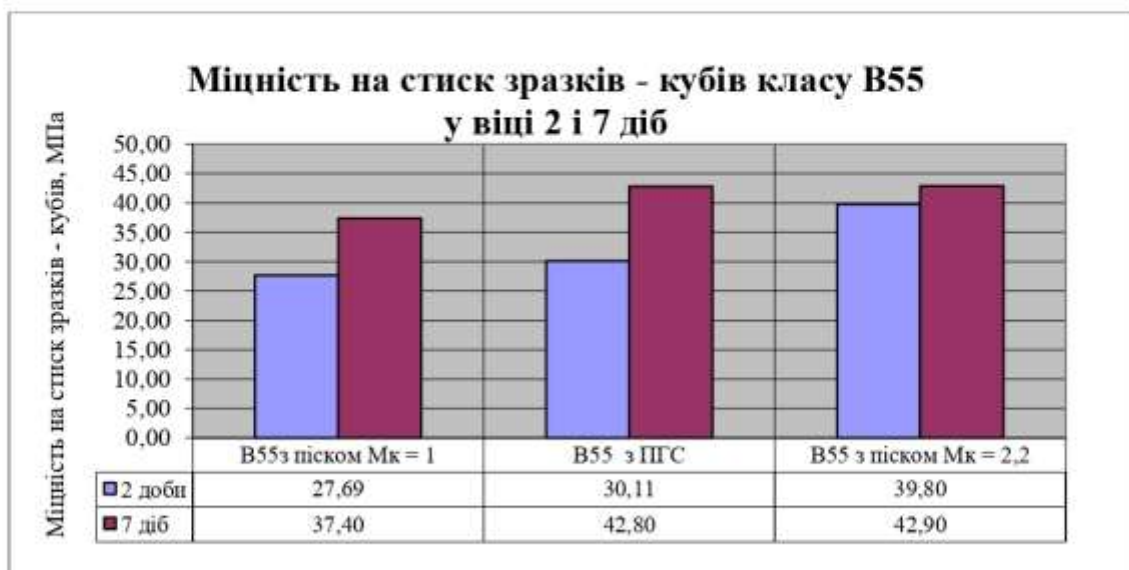


Рисунок 5.9. Гістограма залежності міцності при стиску - C45/55 у віці - 2 і 7 діб від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Міцність на стиск - зразків класу C45/55 $M_k = 1$ у віці 2 і 7 діб збільшення міцності на - 25 % з ПГС - на 30% і $M_k = 2,29$ на 7 %.

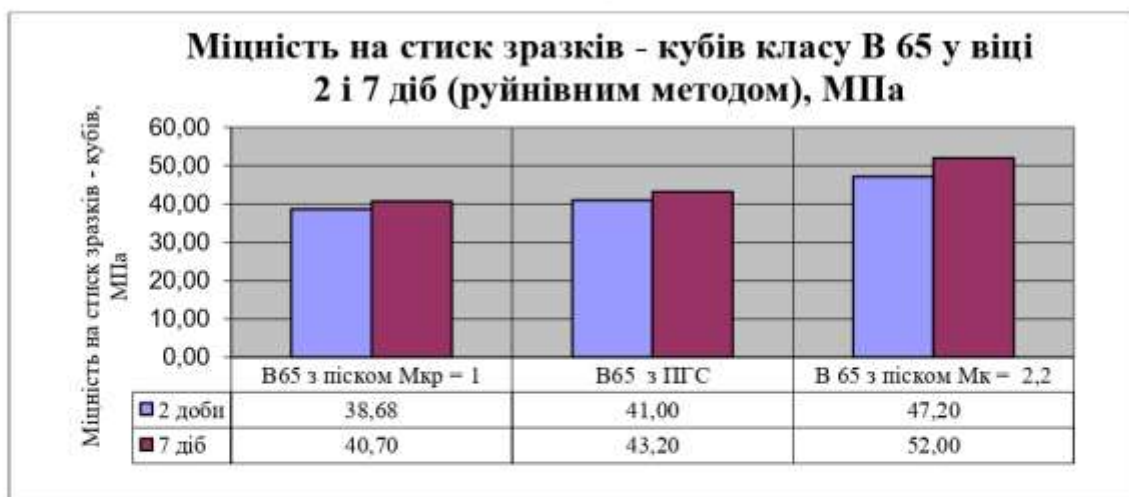


Рисунок 5.10. Гістограма залежності міцності при стиску – C55/65 у віці - 2 і 7 діб від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Міцність на стиск – С55/65 у віці - 2 і 7 діб з $M_{кр} = 1$ та піщаногравійної суміші збільшується на - 5 % , а міцність $M_{кр} = 2,29$ близько 9 %.

Таблиця 5.10. - Міцність на стиск зразків - кубів у віці - 28 діб

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Міцність на стиск, МПа
C45/55 з піском $M_{кр} = 1$	46,3
C55/65 з піском $M_{кр} = 1$	50,9
C45/55 з ПГС	54,2
C55/65 з ПГС	57,5
C45/55 з піском $M_{кр} = 2,2$	70,2
C55/65 з піском $M_{кр} = 2,2$	78,4

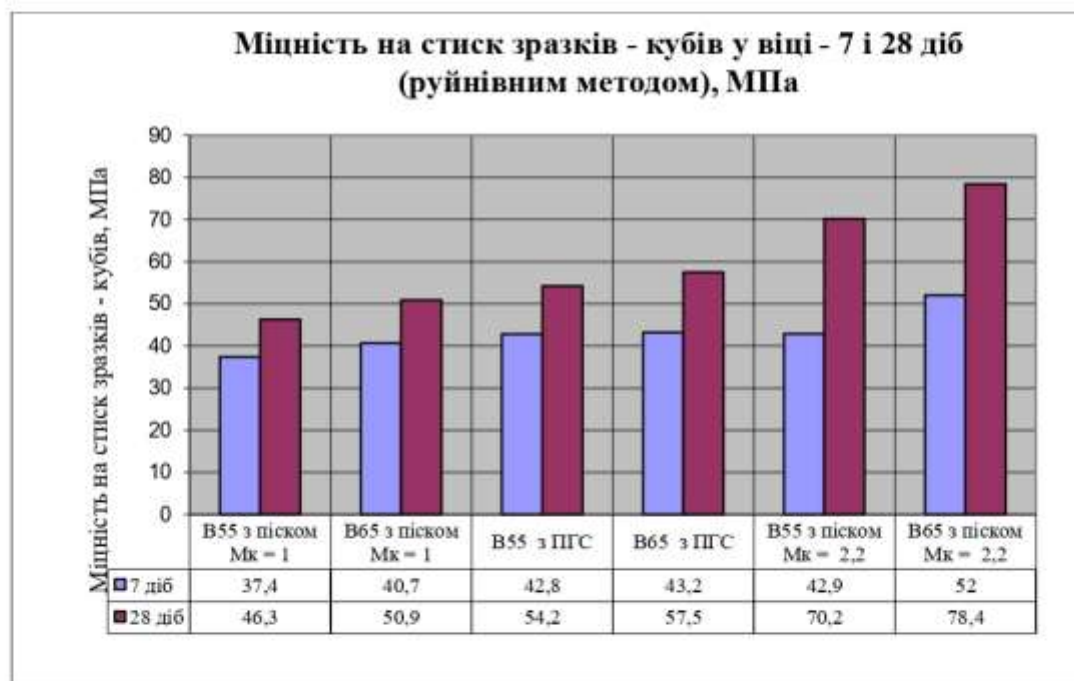


Рисунок 5.11. Гістограма залежності міцності при стиску у віці 7 і 28 діб від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Найбільша міцність отримана при $M_k = 2,29$ розрахований клас С45/55 становить - 70,2 МПа, а найбільша міцність отримана при розрахунку на клас бетону С55/65 $M_{кр} = 2,29$ становить - 78,4 МПа. Найменша на С45/55 $M_{кр} = 1$ становить 46,3 МПа і на С55/65 становить – 50,9 МПа.

5.3. Результати визначення міцності зразків - кубів (неруйнівним методом) електронного склерометра ОНІКС - 2.5

Міцність на стиск зразків - кубів визначалася за методикою, наведеною у розділі 3.11.

Результати визначення міцності на стиск зразків - кубів у віці - 2 дів наведені в таблиці 5.11 і 5.12., у віці - 7 дів в таблиці 5.13 і 5.14., у віці - 28 дів в таблиці 5.15 і 5.16.

Таблиця 5.11 - Міцність на стиск зразків - кубів (базовий) у віці - 2 дів

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Міцність на стиск, МПа
C45/55+ з піском $M_{xp} = 1$	25,2
C55/65+ 196 з піском $M_{xp} = 1$	35,3
C45/55+ 96 з піском $M_{xp} = 2,2$	36,6
C55/65+ з піском $M_{xp} = 2,2$	41,3
C45/55+ з ПГС	28,1
C55/65+ з ПГС	43,1

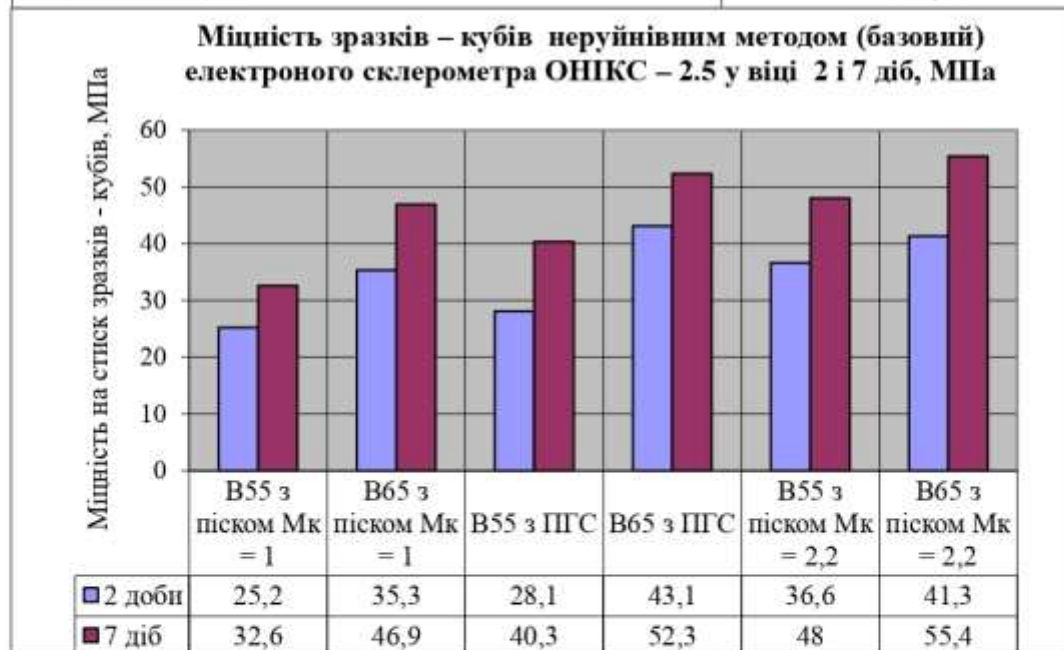


Рисунок 5.12. Гістограма залежності міцності (базовий) у віці - 2 і 7 від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Таблиця 5.12. - Міцність зразків – кубів неруйнівним методом (базовий) на у віці - 7 діб

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Міцність на стиск, МПа
C45/55+ з піском $M_{xp} = 1$	32,6
C55/65+ з піском $M_{xp} = 1$	46,9
C45/55+ піщаногравійною сумішю	40,3
C55/65+ піщаногравійною сумішю	52,3
C45/55+ з піском $M_{xp} = 2,2$	48
C55/65+ з піском $M_{xp} = 2,2$	55,4

Найбільша міцність отримана на $M_k = 2,29$ розрахований клас C45/55 становить - 48 МПа, а найбільша міцність отримана при розрахунку на клас бетону C55/65 $M_k = 2,29$ становить - 55,4 МПа. Найменша на C45/55 $M_k = 1$ становить - 32,6 МПа і на C55/65 становить - 46,9 МПа.

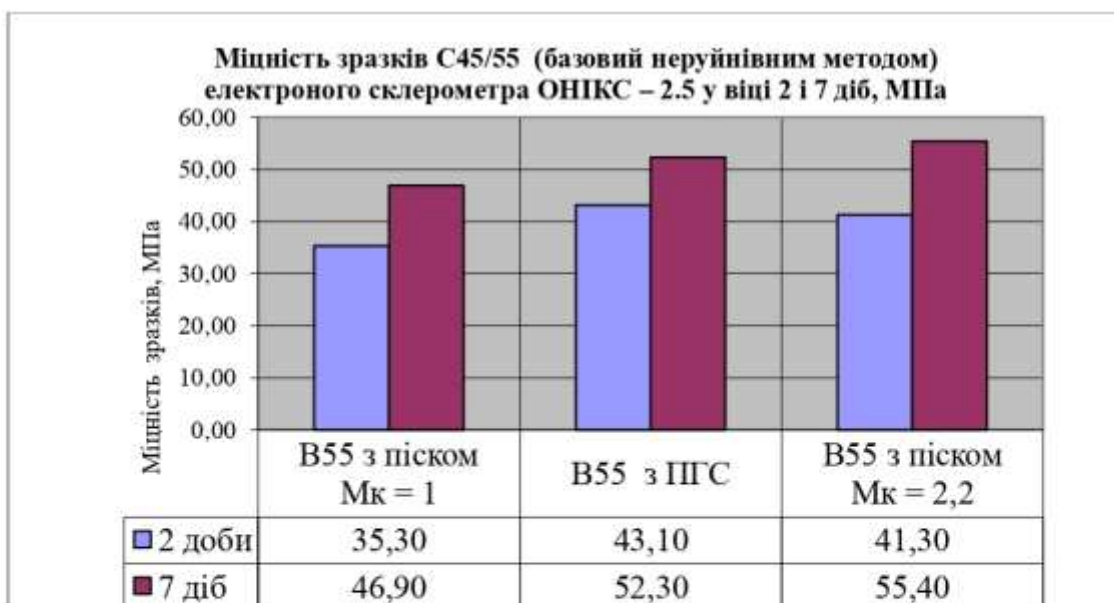


Рисунок 5.13. Гістограма залежності класу міцності при стиску - C45/55 (базовий) у віці - 2 і 7 від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Міцність на стиск - зразків класу C45/55 $M_k = 1$ у віці 2 і 7 діб збільшення міцності на - 23 %, на піщано-гравійній суміші - на 31 % і $M_k = 2,29$ на - 24 %.

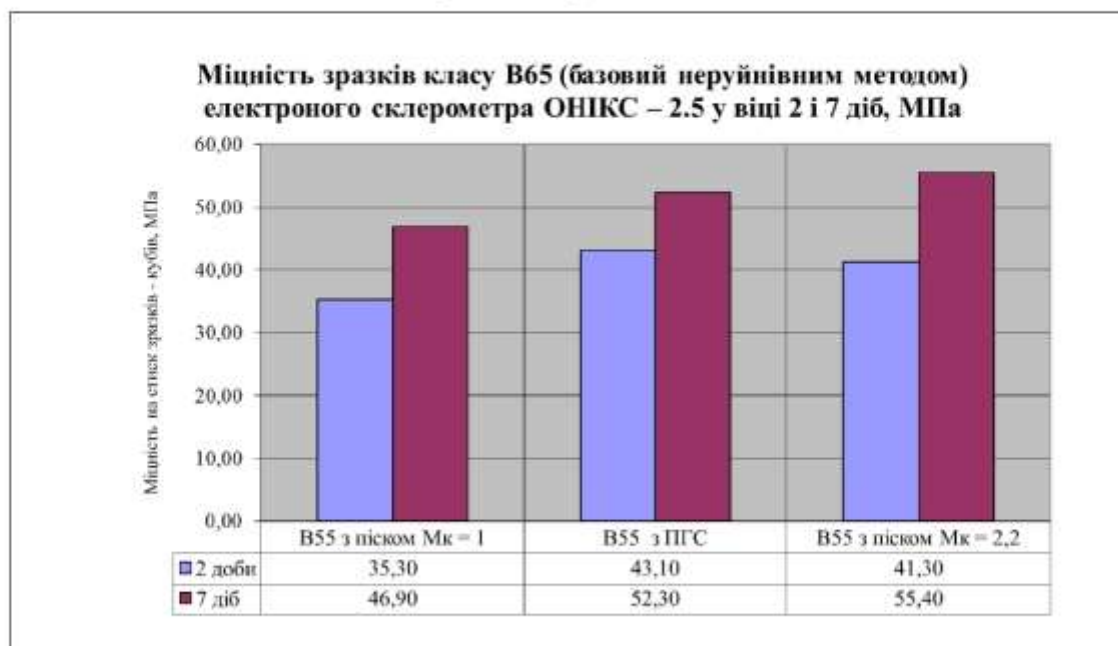


Рисунок 5.14. Гістограма залежності міцності класу C55/65 (базовий) у віці - 2 і 7 від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Міцність на стиск - у віці - 2 і 7 діб C55/65 $M_k = 1$ та піщано-гравійній суміші збільшується на - 25 % , на ПГС - на 18 % а міцність $M_k = 2,29$ збільшується на 26 %.

Таблиця 5.5. - Міцність на стиск зразків – кубів (гранітний) у віці - 2 діб

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Міцність на стиск, МПа
C45/55+ піском $M_{кр} = 1$	27,69
C55/65+ з піском $M_{кр} = 1$	38,68
C45/55+ з піском $M_{кр} = 2,2$	36,60
C55/65+ з піском $M_{кр} = 2,2$	42,1
C45/55+ з ПГС	30,11
C55/65+ з ПГС	41,9

Таблиця 5.6. - Міцність на стиск зразків - кубів (гранітний) на у віці - 7 діб

Клас бетону за міцністю	Міцність на стиск, МПа
C45/55+ з піском $M_{кр} = 1$	34,5
C55/65+ з піском $M_{кр} = 1$	42,8
C45/55+ з ПГС	47,1
C55/65+ з ПГС	60,8
C45/55+ з піском $M_{кр} = 2,2$	55,5
C55/65+ з піском $M_{кр} = 2,2$	61,1

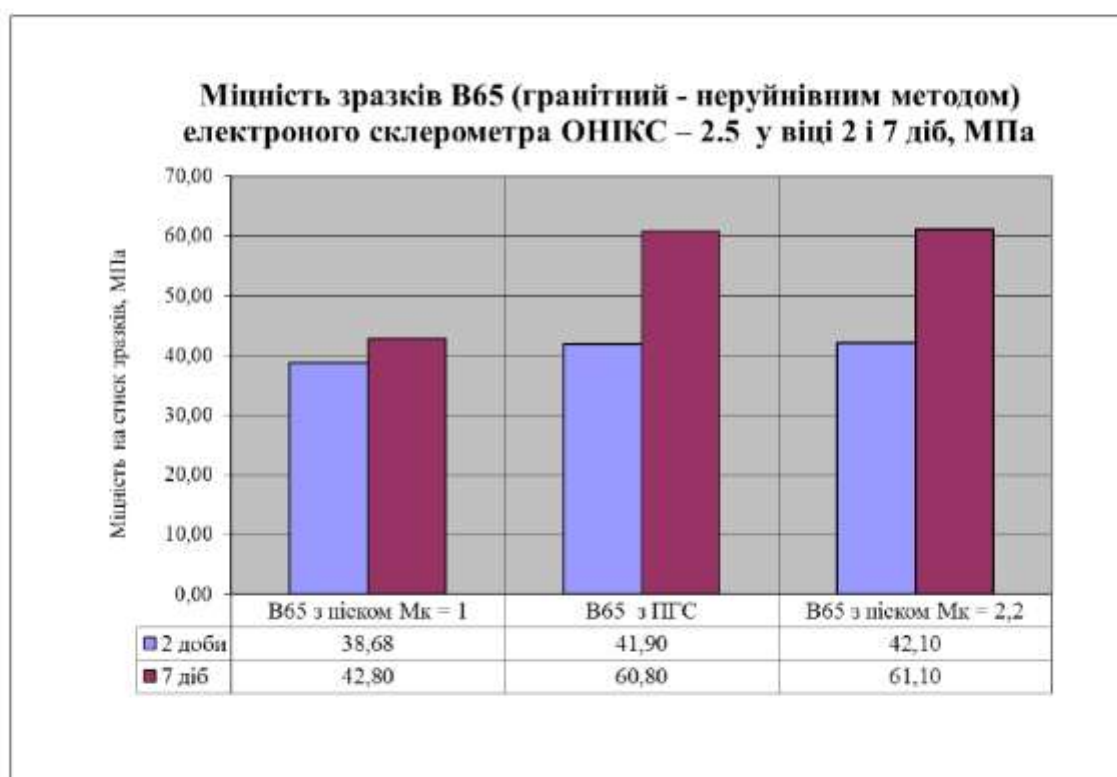


Рисунок 5.15. Гістограма залежності міцності при стиску (гранітний) у віці - 2 і 7 діб від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Найбільша міцність отримана на $M_k = 2,29$ розрахований клас C45/55 становить - 55,5 МПа, а найбільша міцність отримана при розрахунку на клас бетону C55/65 $M_k = 2,29$ становить - 61,1 МПа. Найменша на C45/55 $M_k = 1$ становить - 34,5 МПа і на C55/65 становить - 42,8 МПа.

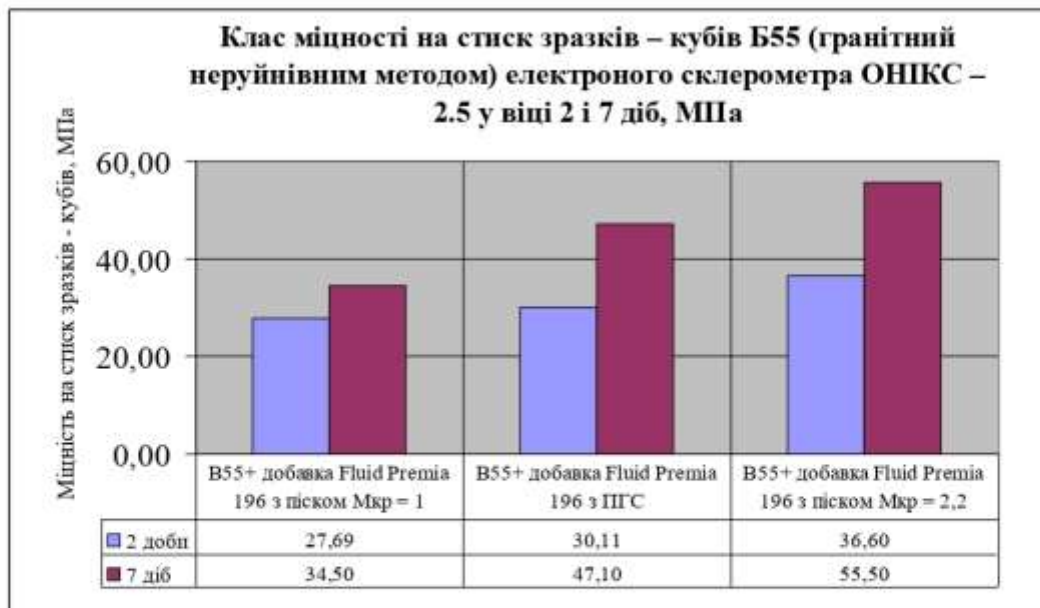


Рисунок 5.16. Гістограма залежності міцності при стиску (гранітний) у віці - 2 і 7 діб від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Міцність на стиск - зразків класу С45/55 Мк =1 у віці 2 і 7 діб збільшення міцності на - 20 %, на ПГС - на 37 % і Мк = 2,29 на - 35 %.

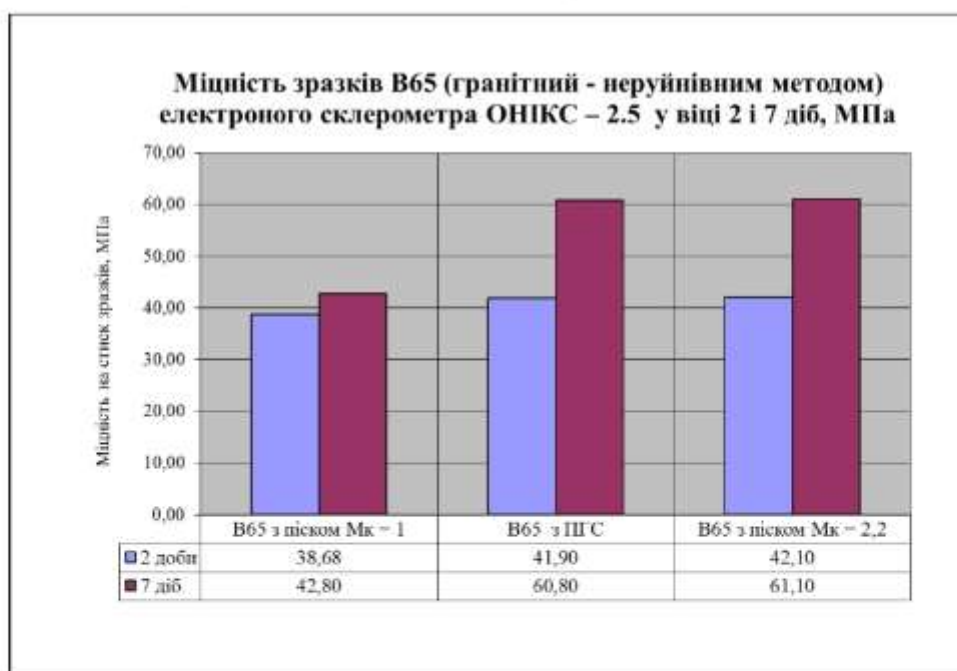


Рисунок 5.17. Гістограма залежності міцності при стиску (гранітний) у віці - 2 і 7 діб від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Міцність на стиск – C55/65 у віці - 2 і 7 діб C55/65 $M_k = 1$ та ПГС збільшується на - 10 % , на ПГС - на 32 % а міцність $M_k = 2,29$ на - 32 %.

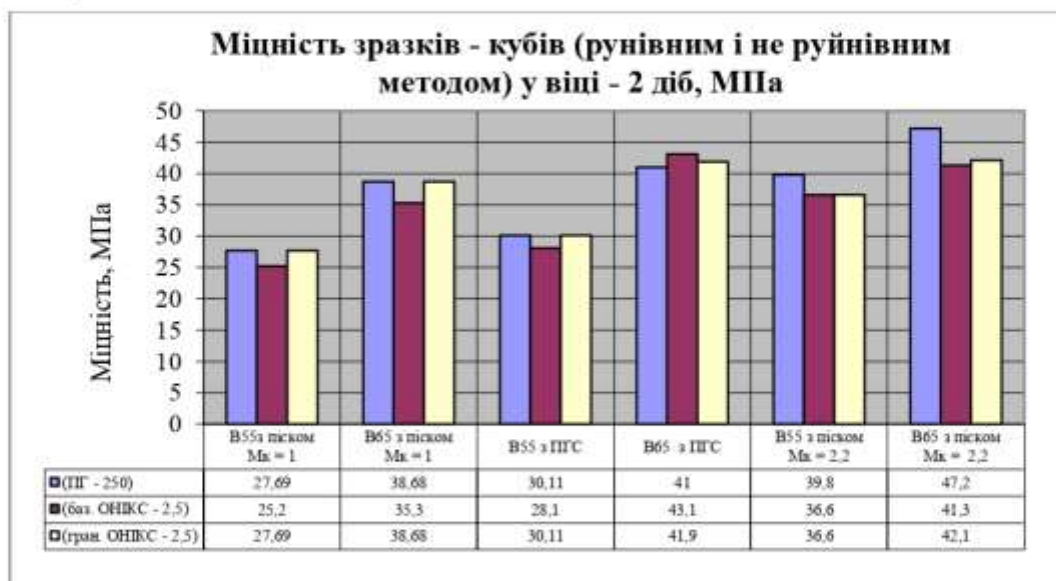


Рисунок 5.18 . Гістограма порівняння міцності у віці - 2 діб

Міцність визначена на зразках класу C45/55 і C55/65 рунівним і не руївним методом коливалася в межах - 5 % при визначенні характеристик бетону(базовий) та максимальне - 7 % при встановленні характеристик бетону (гранітний).

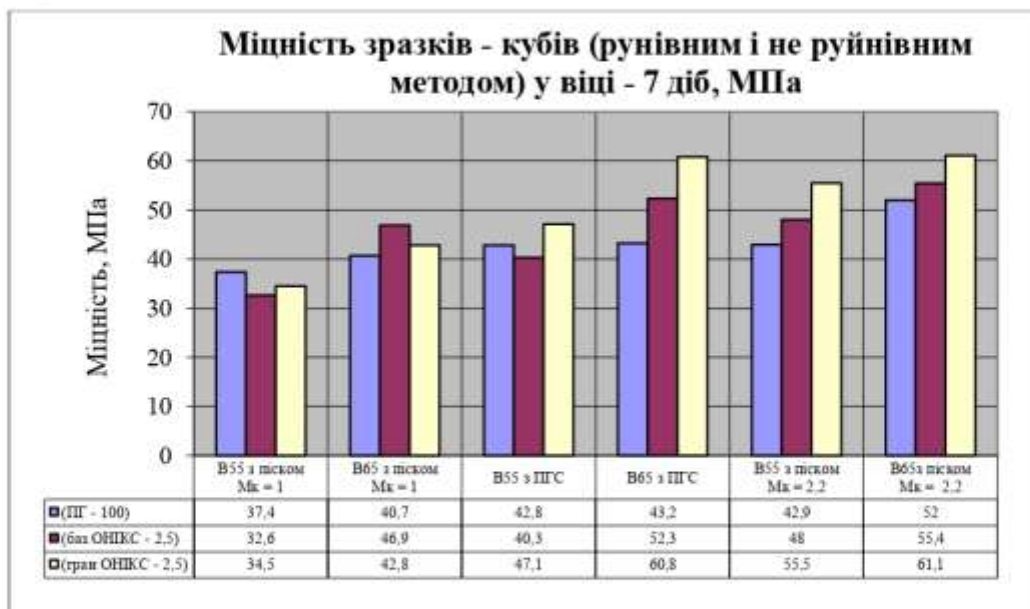


Рисунок 5.19 . Гістограма порівняння міцності у віці - 7 діб

Міцність визначена на зразках класу C45/55 і C55/65 руйнівним і не руйнівним методом коливалася в межах - 6 % при визначенні характеристик бетону(базовий) та максимальне - 13 % при встановленні характеристик бетону (гранітний).

Таблиця 5.7. - Міцність на стиск зразків - кубів (базовий) у віці - 28 діб

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Міцність на стиск, МПа
C45/55+ з піском $M_{sp} = 1$	45,7
C55/65+ з піском $M_{sp} = 1$	55,8
C45/55+ з піщаногравійною сумішю	52,05
C55/65+ з піщаногравійною сумішю	58,2
C45/55+ з піском $M_{sp} = 2,2$	64
C55/65+ з піском $M_{sp} = 2,2$	71,6

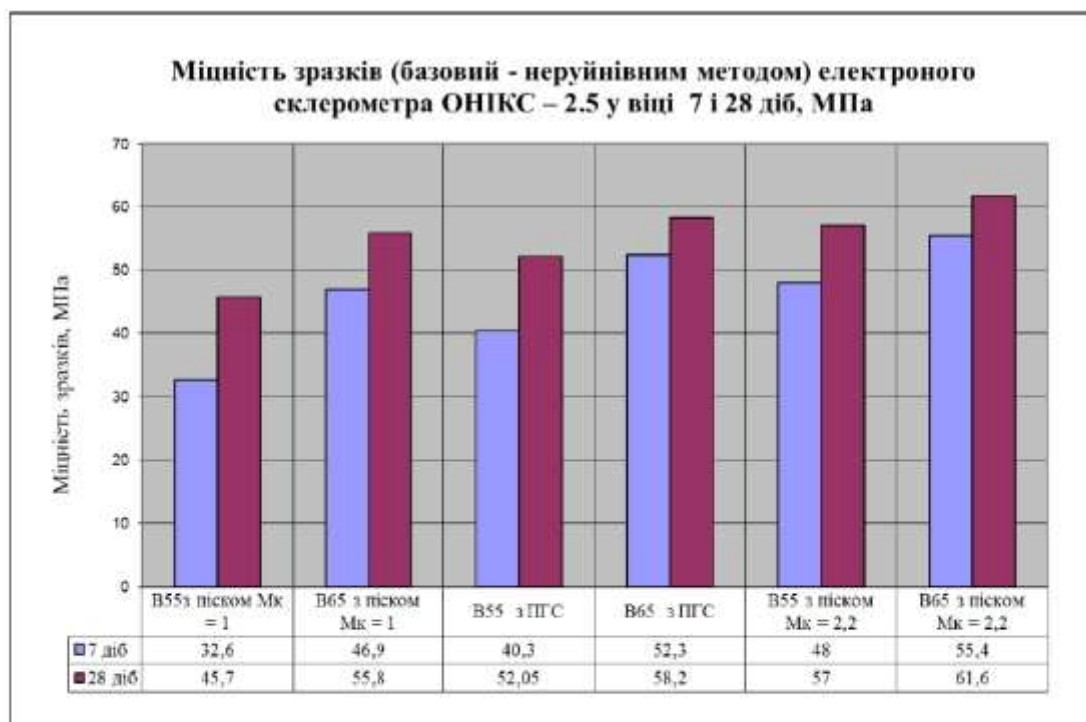


Рисунок 5.20. Гістограма залежності міцності при стиску (базовий) у віці - 7 і 28 діб від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Найбільша міцність отримана на $M_k = 2,29$ розрахований клас C45/55 становить – 57 МПа, а найбільша міцність отримана при розрахунку на клас бетону C55/65 $M_k = 2,29$ становить - 61,6 МПа. Найменша на B55 $M_k = 1$ становить - 45,7 МПа і на B 65 становить - 55,8 МПа.

Таблиця 5.8. - Міцність на стиск зразків - кубів (гранітний) у віці - 28 діб

Клас бетону за міцністю (+ добавка Fluid Premia 196)	Міцність на стиск, МПа
C45/55+ з піском $M_{кр} = 1$	39,3
C55/65+ з піском $M_{кр} = 1$	42,35
C45/55+ з піщаногравійною сумішю	47,7
C55/65+ з піщаногравійною сумішю	48,2
C45/55+ з піском $M_{кр} = 2,2$	59,4
C55/65+ з піском $M_{кр} = 2,2$	64,5

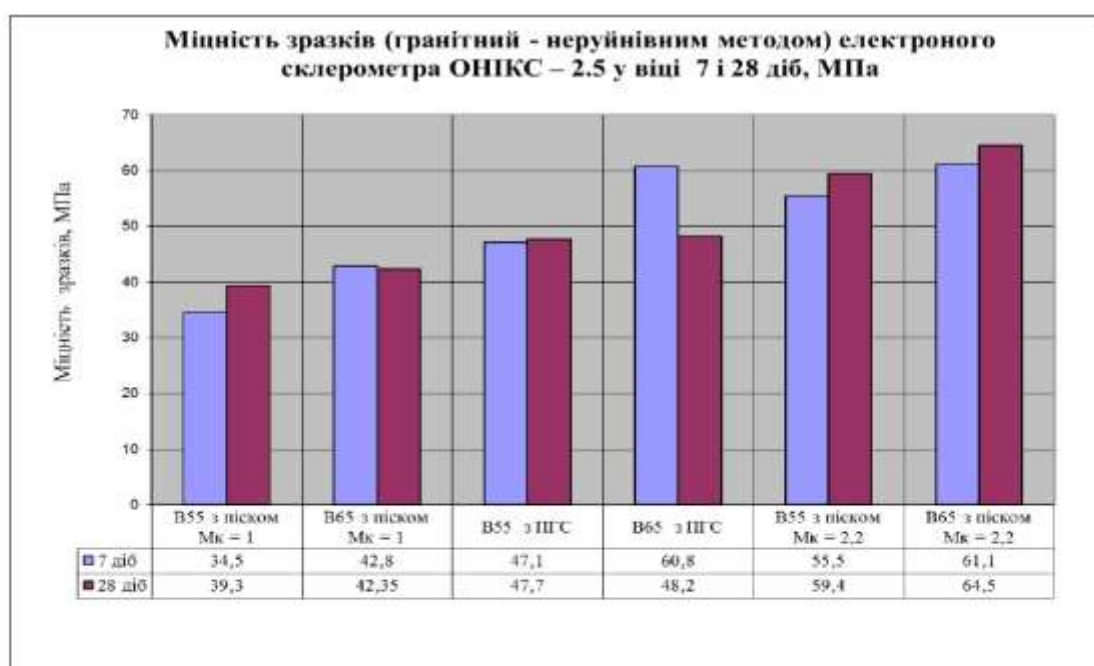


Рисунок 5.21. Гістограма залежності міцності при стиску (гранітний) у віці - 7 і 28 діб від гранулометричного складу дрібного заповнювача

Найбільша міцність отримана на $M_k = 2,29$ розрахований клас C45/55 становить - 59,4 МПа, а найбільша міцність отримана при розрахунку на клас бетону C55/65 $M_{кр} = 2,29$ становить - 64,5 МПа. Найменша на B55 $M_{кр} = 1$ становить - 39,3 МПа і C55/65 становить - 42,35 МПа.

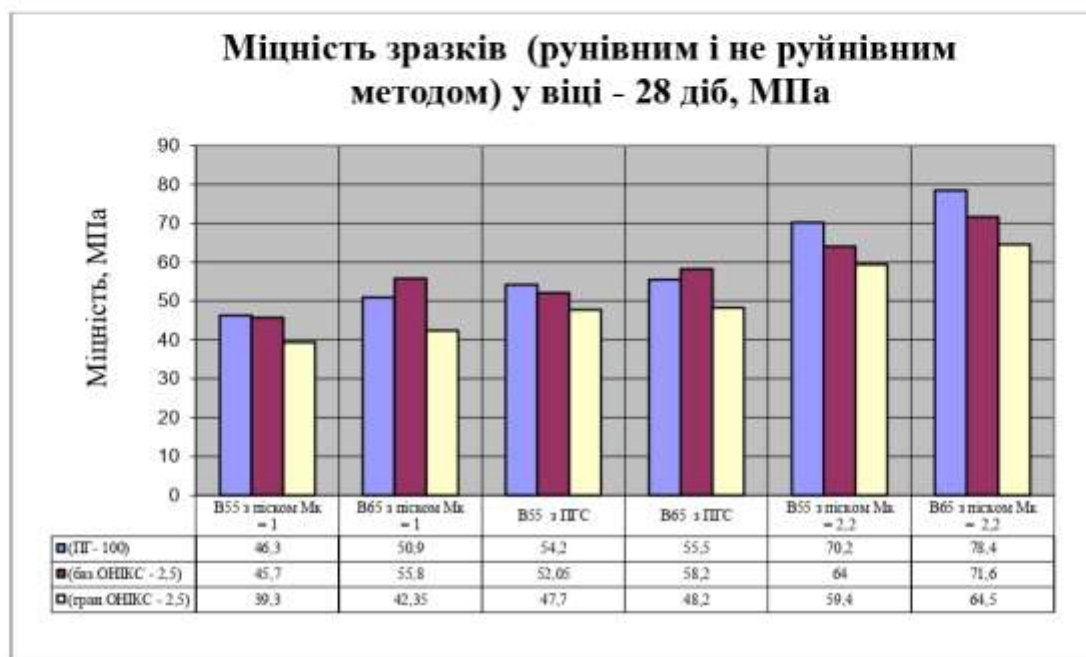


Рисунок 5.22 . Гістограма порівняння міцності у віці - 28 діб

Міцність визначена на зразках класу C55/65 (B55) і C55/65 (B 65) руйнівним і не руйнівним методом коливалася в межах - 10 % при визначенні характеристик бетону(базовий) та максимальне - 20 % при встановленні характеристик бетону (гранітний).

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

6.1. Охорона природного довкілля

При виробництві тротуарної плитки основним забрудником являється - цементний пил, тому у виробництві використовуються різні фільтри [33].

Запилене повітря від аспіраційних і технологічних систем перед викидом в атмосферу підлягає очищенню від пилу в циклонах і рукавних фільтрах з високою ефективністю очищення. Пил, уловлений в циклонах і рукавних фільтрах, повністю використовується у виробництві.

Найбільш раціональним та економічно вигідним стратегічним рішенням для захисту біосфери від негативного впливу газоподібних викидів є впровадження концепції безвідходного виробництва та замкнених технологічних циклів. Такий підхід дозволяє не лише мінімізувати екологічні ризики, а й суттєво оптимізувати використання природних ресурсів.

Додатковим інструментом у реалізації цієї стратегії є активне залучення техногенних продуктів, зокрема золи-виносу та інших дисперсних відходів, у виробництво будівельних матеріалів. Це сприяє не тільки зменшенню навантаження на навколишнє середовище через скорочення обсягів складування відходів, а й дозволяє знизити енергоємність промислових процесів. Таким чином, перехід до маловідходних та безвідходних систем є ключовим фактором забезпечення сталого розвитку та збереження екологічної рівноваги у сучасному промисловому секторі

6.2. Охорона праці і техніка безпеки

Для створення необхідних санітарно-гігієнічних і безпечних умов праці передбачена [33]:

- максимальна механізація і автоматизація технологічних процесів, пов'язаних з організацією складування і підготовкою сировини, його подрібненням і класифікацією терпкого, транспортуванням матеріалів, що порошать;

- розрахунок освітлення робочих місць згідно ДБН В.2.5-28-2006 "Природне і штучне освітлення". На підприємстві основними виробничими негативними факторами являється: - пил цементу.

- обігрів робітників складу в зимовий час передбачається у відгородженому від складу опалюваному виробничому корпусі;

- у виробничому корпусі для усунення виділення пилу в повітря робочої зони, так само як в складі, передбачені укриття конвеєрів, вузлів пересипок і їх устаткування місцевими відсмоктуваннями і очищенням забрудненого повітря, що видаляється, в циклонах і фільтрах. При цьому пил повністю утилізувався;

Виробництво тротуарної плитки не пожежо- і не вибухонебезпечно і належить до категорії "Д" (Негорючі рідини і матеріали у холодному стані).

Електробезпека технологічного і підйомно-транспортного устаткування і автоматики відповідає вимогам "Правил облаштування електроустановок".

Для виробничих агрегатів передбачені автоматика безпеки, автоматичне регулювання, контроль і сигналізація необхідних параметрів, а також автоматичний, дистанційний і місцевий режим управління виконавчими органами.

Автоматика безпеки передбачають задану послідовність операцій. При виникненні аварійних режимів передбачено відключення агрегатів із забезпеченням світлозвукової сигналізації.

В цілях попередження забруднення повітря приміщень з шкідливими виділеннями:

- устаткування, прилади, трубопроводи і інші джерела, що виділяють теплоту, мають бути теплоізовані;

- агрегати і устаткування, при експлуатації яких відбувається виділення вологи, мають бути вкриті і ізовані;

технологічні процеси, пов'язані з виділенням пилу, слід ізолювати так, щоб їх робота здійснювалася без участі людей, а технологічні викиди, що виділяються, перед викидом в атмосферу мають бути піддані очищенню.

У цехах, де використовуються вібраційні механізми, мають бути прийняті заходи по усуненню вібрації і зниження рівня шуму.

Для забезпечення безпечних умов праці рівень шумового навантаження на робочих місцях не має перевищувати встановлених нормативних значень. У разі перевищення допустимих рівнів необхідно впроваджувати комплексну звукову та віброізоляцію приміщень, обладнання та зон безпосередньої діяльності персоналу. До ефективних заходів належать: монтаж вібромайданчиків на масивні фундаменти, відокремлені від підлоги пружними прокладками; використання пружинних або гумових віброізоляторів для машин із вібраційними вузлами; обов'язкова жорстка фіксація форм на віброплатформах; застосування акустичних кожухів та облицювання поверхонь звукопоглинальними матеріалами. Регулярний профілактичний огляд, своєчасне налагодження та ремонт віброустаткування також є критично важливими для зниження шкідливого впливу. Персонал має бути забезпечений засобами індивідуального захисту: протишумовими навушниками, спецвзуттям на товстій підошві з губчастої гуми та рукавицями з вібропоглинальними вставками.

Концентрація пилу у виробничому середовищі суворо регламентується залежно від вмісту вільного діоксиду кремнію у повітрі робочої зони. Особлива увага приділяється ділянкам, де відбувається транспортування та переробка цементу, вапна та інших дисперсних матеріалів. Для ефективної очистки повітря на складах в'язучих речовин та у бетонозмішувальних цехах передбачено встановлення систем пиловловлення, зокрема пилоосаджувачів типу НДІОГАЗ (НИИОГАЗ), що забезпечують дотримання санітарно-гігієнічних нормативів і матер'яні фільтри типу ФР- 30, ФР- 90, які забезпечують очищення повітря до - 97- 99 %.

У виробничих зонах із підвищеною концентрацією пилових часток персонал зобов'язаний використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), зокрема респіратори марок Ф-45 або ПРБ-1, герметичні захисні окуляри та спеціалізований пилозахисний одяг.

Додатково, для підвищення рівня безпеки на підприємствах із виготовлення бетонних сумішей, необхідно забезпечувати функціонування припливно-втяжної вентиляції та регулярне вологе прибирання робочих поверхонь. Важливим елементом захисту є також дотримання особистої гігієни та проходження працівниками планових медичних оглядів, що дозволяє мінімізувати ризики виникнення професійних захворювань дихальних шляхів у 2025 році. Використання сучасних засобів захисту в поєднанні з автоматизацією процесів дозування сипучих компонентів є пріоритетним завданням для створення безпечного робочого середовища

6.3. Розрахункові інженерні рішення з охорони праці та техніки безпеки у цеху при виготовленні тротуарної плитки

6.3.1. Розрахунок штучного освітлення виробничого приміщення

Розрахунок загального освітлення виробничого приміщення для виробництва тротуарної плитки, виходячи з норм за розрядами зорової роботи й безпеки праці.

Вихідні дані: довжина приміщення A , м; ширина B , м; висота H , м; напруга освітлювальної мережі 220 В; коефіцієнти відбиття стелі S_c %; стін S_{cm} %; підлоги S_n %.

Вихідні дані

- довжина приміщення $L = 70$ м;
- ширина приміщення $S = 35$ м;
- висота підвісу ламп над робочою поверхнею $H = 4,5$ м;
- нормована освітленість $E_n = 200$ лк;
- коефіцієнт відбиття:
 - стелі $S_c = 70$ %;
 - стін $S_{cm} = 50$ %; підлоги $S_n = 10$ %;
- тип лампи – “ЛД”;
- режим роботи освітлювальної установки за рік – 260 робочих днів, по 10 годин на день, всього:

260×10=2600 годин/рік,

Розв'язок

Визначаємо орієнтовну кількість світильників:

Рівномірність освітлення досягається при співвідношенні відстані між світильниками L і висоти їх підвісу H :

$$L = H = 4,5 \text{ м}$$

1. Необхідна кількість потрібних світильників становить:

$$N = \frac{L \times S}{l^2} = \frac{70 \times 35}{4,5^2} = 120 \text{ шт.}$$

2. Визначаємо показник приміщення i :

$$i = \frac{L \times S}{h(L + S)} = \frac{70 \times 35}{4,5(70 + 35)} = 5,18$$

Коефіцієнт використання η , % знаходимо за таблицею 2, (ДБН В.2.5-28-2006 “Природне і штучне освітлення”) при $i = 5,18$, $S_c = 70$ %, $S_n = 10$ %; для світильника з люмінесцентними лампочками.

3. Визначаємо світловий потік для люмінесцентних ламп, якщо освітлювальна установка буде виконана з світильників з люмінесцентними лампами (по 2 лампи на 1 світильник):

$$\Phi = \frac{E_n \times L \times S \times Z \times 100}{n \times N \times \eta} = \frac{200 \times 70 \times 35 \times 1,2 \times 1,15 \times 100}{2 \times 129 \times 66} = 4268 \text{ лм}$$

За таблицею 4 (ДБН В.2.5-28-2006 “Природне і штучне освітлення”) вибираємо люмінесцентну лампу денного світла (ЛД-80-4, довжиною-1,5 м) потужністю $P_{\lambda}^{\lambda} = 80$ Вт, з світловим потоком - 4300 лм > 4268 лм.

4. Загальна потужність в разі використання люмінесцентних ламп становитиме:

$$P_{\text{заг}}^{\lambda} = P_{\lambda}^{\lambda} \times N \times n = 80 \text{ Вт} \times 120 \times 2 = 19200 \text{ Вт} = 19,2 \text{ кВт}$$

Висновок:

Отже, необхідна кількість світильників з люмінесцентними лампами типу - ЛД-80-4 становить 120 штук, які, з конструктивних міркувань розміщуємо в 8 ряди по 15 штук в ряду.

6.3.2. Розрахунок звукоізолюючого кожуха для тротуарної плитк

Розрахунок звукоізолюючого кожуха для віброплощадки з розмірами: довжина ℓ , м; ширина b , м і висота h , м. У кожусі віброплощадки потрібно передбачити два протилежних отвори: один для циркуляції повітря, інший для приводу.

Товщина матеріалу потрібна для виготовлення кожуха – сталь t , мм. Відстань від габаритних розмірів обладнання до стінок корпусу l м. також для даного обладнання повинні бути використані глушники шуму. Октавний рівень звукового тиску в розрахунковій точці машини, що ізолюється, приймаємо за таблицею 6.3.3.

Таблиця 6.3.3. Октавний рівень звукового тиску в розрахунковій точці обладнання, що ізолюється

Середньгеометрична частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Рівень звукового тиску, дБ	82	90	93	91	88	81	78	72

Вихідні дані

- габарити машини
довжина $l = 3$ м;
ширина $b = 1$ м;
висота $h = 3,5$ м;
- товщина матеріалу для виготовлення кожуха $t = 2$ мм;
- відстань від габаритних розмірів машини до стінок корпусу $l = 1$ м;
- глушники шуму з шириною щілини $h' = 40$ мм.

Таблиця 6.3.3. Октавний рівень звукового тиску в розрахунковій точці обладнання, що ізолюється

Середньгеометрична частота, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Рівень звукового тиску, дБ	82	90	93	91	88	81	78	72

Розв'язок

1. Площа уявної поверхні що оточує устаткування та проходить через розрахункову точку:

$$S = 2 \times [(l+1) \times (h+1)] + 2 \times [(b+1) \times (h+1)] + (l+1) \times (b+1) = 2 \times (4 \times 4,5) + 2 \times (2 \times 4,5) + (4 \times 2) = 62 \text{ м}^2$$

2. Визначаємо поверхню джерела шуму машини:

$$S_{\text{д.ж.}} = 2 \times (l+h) + 2 \times (b \times h) + l \times b = 2 \times (3+3,5) + 2 \times (1 \times 3,5) + 3 \times 1 = 31 \text{ м}^2$$

Із конструктивних міркувань вибираємо кожух із плоскими гранями і визначаємо площу його поверхні. Допускаємо, що $S_k = 50 \text{ м}^2$ ($S_k = 0,8 \times S = 0,8 \times 62 = 50 \text{ м}^2$).

Потім за формулами вище вказаними розраховуємо необхідну звукоізолюючу здатність кожуха.

Результати розрахунків заносимо у таблицю 6.3.4.

Величина	Одиниці виміру	Вказівка	Середньгеометрична частота, Гц							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_p	дБ	таблиця 1	82	90	93	91	88	81	78	72
$L_{\text{дон}} = L_n$	дБ	таблиця 6	79	70	63	58	55	52	50	49
$10 \lg S = 62 \text{ м}^2$	дБ	-	18	18	18	18	18	18	18	18
$L_{\text{эф.помп.}}$	дБ	форм. 1	-3	11	20	21	17	18	19	18
$10 \lg S(S_k / S_{\text{д.ж.}})$	дБ	-	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$R_{\text{к.н.}}$	дБ	форм. 2	-	13	22	23	19	20	21	20
$R_{\text{кон.струкц.}}$	дБ	таблиця 7	16	20	24	28	32	36	35	33
$L_{\text{ст.}}$	дБ	таблиця 5	20	22	27	36	45	45	45	40

У результаті розрахунку звукоізолюючої здатності стін і перегородок акустично – одношарової конструкції із сталі товщиною – 2 мм, можна використати щілинні глушники довжиною по – 0,75 м при ширині щілини – 40 мм і тому даний матеріал конструкції повністю забезпечує ізоляцію від шуму, а тому ефективність кожуха забезпечується.

ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Підібрані та оптимізовані склади бетону класів - C45/55 (B55), та C55/65 (B65) за міцністю з різним гранулометричним складом дрібного заповнювача для бетонів тротуарних виробів.

Клас бетону за міцністю	Витрата матеріалів на 1м ³ бетонної суміші				
	Цемент, кг	Пісок, кг	Щебню, кг	Вода, л	Добавка, л
C45/55	545	522	1210	175	5,5
C55/65	795	320	1210	175	8

1. Провівши дослідження ми встановили, що гранулометричний склад дрібного заповнювача впливає на міцність бетону при використанні дрібного піску з $M_k = 1$ міцність бетону зменшується на 34 % а при використанні піщано-гравійної суміші на 25%

2. В результаті аналізу дослідження вдалося встановити, що для класу - C45/55 (B55) при підбраному фракціонованому піску з $M_k = 2,3$ міцність на стиск зразків у віці 28 діб досягала - 70,2 МПа, при використанні піщано-гравійної суміші – 54,2 МПа що складає 77% запланованого класу , дрібного піску з $M_k = 1$ – 46,3МПа що складає 66% запланованого класу за міцністю.

3. Міцнісні характеристики важкого бетону для класу C55/65 (B 65) при використанні дрібного заповнювача піску $M_k = 2,3$ міцність на стиск зразків у віці 28 діб класу – 78,4 МПа ; при використанні піщано-гравійної суміші досягала - 57,5 МПа., що складає 71% запланованого класу; дрібного піску з $M_k = 1$ – 50,9 МПа що складає 65% запланованого класу.

4. Міцність визначена на зразках класу - C45/55 (B55) і C55/65 (B 65) у віці 28 діб (руйнівним і не руйнівним) методом коливалася в межах - 10 % при визначенні характеристик бетону(базовий) та максимальне - 20 % при встановленні характеристик бетону (гранітний).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бетони нового покоління : монографія / Л. Й. Дворкін, В. В. Житковський, О. М. Бордюженко [та ін.] ; за ред., д.т.н., професора Л. Й. Дворкіна. – Рівне : НУВГП, 2021. – 317 с.
2. Басараб В., Уманець, І. (2022). Експериментальне дослідження технологічних властивостей процесу пресування бетонної суміші в умовах реконструкції. Шляхи підвищення ефективності будівництва , 1 (50), 3–14. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(1\).3-14](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(1).3-14)
3. Бехта Т. М., Шпирько М. В., Бондаренко С. В., Василенко С. В. Будівельне матеріалознавство: навчальний посібник. - Дніпро: ДВНЗ «ПДАБА», 2022. - 115 с. ISBN 978-966-323-229-4
4. Гаркуша В. С., Симонов С. І., Годун, Т. М. (2024). Дослідження технологічних особливостей виготовлення тротуарної плитки для благоустрою промислових та цивільних об'єктів. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, (25), 31–36. <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/303288>
5. Гамеляк, І. П., Шургая, А. Г., Якименко, Я. М., Чиженко, Н. П., Каршок, О. А. (2014). Порівняння сучасних добавок для високоміцного дорожнього бетону. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, (92), 38-49.
6. Гоц В.І., Ефективні будівельні матеріали та вироби на основі активованих паливних зол і шлаків // автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.- Київ. 2009.
7. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – К.: Основа, 2007. – 616 с.
8. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони / Л. Й. Дворкін та ін.; за ред. Л.Й. Дворкіна, Е.М. Бабича. Рівне: НУВГП, 2017. 331 с.
9. Використання техногенних продуктів у будівництві: Навчальний посібник /Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Пушкарьова К.К. та ін. - Рівне, 2019. - 340 с.
10. Дворкін Л. Й. Реакційно-порошкові бетони і матеріали на їх основі : монографія / за редакцією д.т.н., професора Л. Й. Дворкіна. – Рівне : НУВГП, 2020. – 305 с.

11. Дворкін Л. Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів/ Л. Й. Дворкін. – К.: Кондор, 2024. – 228 с.
12. Захаров Д. С., Палант О. В., Толмачов С. М., Плугін Д. А., Мойсеева П. Е. Вплив коефіцієнта розсунення зерен щебеню розчином на міцність цементних бетонів при згині. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2017. Вип. 169. С. 64–72.
13. Кривенко П.В. Будівельне матеріалознавство: Підручник / Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Барановський В.Б. та ін., під ред. П.В. Кривенка. - К.: ТОВ УВПК «ЕксОб», 2006. - 704 с.
14. ДСТУ Б В.2.7-65-97 "Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Класифікація";
15. ДСТУ 9208:2022 Бетони важкі. Технічні умови.
16. ДСТУ Б В.2.7-46-2010 "Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови";
17. ДСТУ Б В.2.7-185:2009 "Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму";
18. ДСТУ Б В.2.7-188:2009 "Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення тонкості помелу";
19. ДСТУ Б В.2.7-187:2009 "Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск";
20. ДСТУ Б.В.2.7-71-98 "Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико - механічних випробувань";
21. ДСТУ Б.В.2.7-75-98 "Щебінь і гравій щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкції і робіт. Технічні умови;
22. ДСТУ Б В.2.7.-32-95 "Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкції і виробів. Технічні умови";

23. ДСТУ Б В.2.7-232:2010 "Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань";
24. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013 Настанова щодо визначення складу важкого бетону
25. ДСТУ Б В.2.7-215:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу
26. ДСТУ Б EN 1097-1:2015 Методи випробувань механічних і фізичних характеристик заповнювачів. Частина 1. Визначення опору стирпаності (micro-Deval) (EN 1097-1:2011, IDT).
27. DIN 1045-2 Norm, 2001-07. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton-Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Beuth Verlag, Berlin;
28. ДСТУ Б В.2.7-203:2009 "Будівельні матеріали. Суміші піщано-гравійні для будівельних робіт. Технічні умови";
29. ДСТУ Б В.2.7-114-2002 Суміші бетонні. Методи випробувань (ГОСТ 10181-2000).
30. ДСТУ Б.В.2.7-170:2008 "Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності";
31. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 "Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками";
32. ДСТУ Б В.2.7-220:2009 "Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю";
33. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - — Київ : Мінрегіон України, 2018. — 139 с.
34. Ковальський В. П. Використання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах [Текст] / В. П. Ковальський, О. С. Сідлак // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. - 2014. - № 1. - С. 35-40.
35. Кропивницька Т.П. Вплив карбонатних добавок на властивості портландцементу композиційного / Т.П. Кропивницька, М.А. Саницький, І.М. Гев'юк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Теорія і практика будівництва. - 2013. - № 755. - С. 214-220.

36. Кропивницька Т.П. Концепція еко-ефективних наномодифікованих лужноактивованих композиційних цементів з високою ранньою міцністю / Т. П. Кропивницька // Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 2019. – № 912. – С. 18-23.
37. Пунагін В., Савін Л., Шишкін О. Керування властивостями бетону. Кривий Ріг: Мінерал, 2001. 155 с.
38. Позняк О.Р. Високофункціональні бетони з комплексними модифікаторами на основі полікарбоксилатів. / О.Р. Позняк // Теорія і практика будівництва [Текст] : [зб. наук. пр.] / відп. ред. З. Я. Бліхарський. - Л. : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2009. – 331 с. : іл. - (Вісник / Національний університет "Львівська політехніка" ; № 655).). - С. 224-229;
39. Рунова Р.Ф., Руденко І.І., Троян В.В. "Роль фракційності заповнювача у формуванні властивостей модифікованих високоміцних бетонів" // Сучасні бетони . - Запоріжжя, 2007.- С.51-57;
40. Пунагін В., Савін Л., Шишкін О. Керування властивостями бетону. Кривий Ріг: Мінерал, 2001. 155 с.
41. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник /. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 236 с..
42. Саницький М.А. Бетони поліфункціонального призначення на основі композиційних цеолітвмісних поргладцементів / М.А. Саницький, Т.П. Кропивницька, І.М. Гев'юк, М.В. Котів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" : Теорія і практика будівництва. – 2016. – № 844. – С.188-193. –ISSN 0321-0499. Саницький М. Модифікатори нової генерації для бетонів/, О.Р. Позняк, У.Д. Марущак, М.М. Чемерис та ін. // Будівельні матеріали та вироб. - 2006.- №1. - С. 5-7.
43. Стороженко Л.І . Труробетон із високоміцним бетоном / Л.І. Стороженко, Д.А Єрмоленко, О.В. Демченко// Збірник наукових праць (галузеве

машинобудування, будівництво). - Полтава: ПолтНТУ, 2012, - Вип./ (30).- С. 240 - 243. ;

- 44.Стороженко Л.І. Високоєфективні бетони для заповнення трубобетонних конструкцій з використанням місцевих матеріалів / Л.І. Стороженко, Д.А. Єрмоленко, О.В. Демченко// Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). - Полтава: ПолтНТУ, 2014, - Вип./ (33).- С. 240 - 243. ;
- 45.Соболь Х. С., Марків Т. Є., Саницький М. А., Когуч Г. В. Вплив активних мінеральних додатків на властивості композиційних цементів. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". "Хімія та хімічна технологія". 2003. № 755. С. 274–278.
- 46.Голмачов С. М., Беліченко О. А., Захаров Д. С., Черногал Р. Ю. Вплив лещадних частинок на міцність при згині дорожніх бетонів. Нові технології в будівництві. 2017. № 32. С. 53–60.
- 47.Теоретичні основи будівельного матеріалознавства: навчальний посібник. Дворкін Л.Й. – Київ: Каравела, 2023. –799 с.
- 48.Голмачов С. М., Беліченко О. А., Захаров Д. С. Дослідження впливу повітроутягування на міцність дорожніх бетонів. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, 2017. Вип. 68. С. 96–101.
- 49.Чарнецки Л. Майбутнє бетону/ Л.Чарнецки, В.Курдовски // Збірник праць ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. - Запоріжжя, 2007. - С. 13 - 21.
- 50.Чистяков, В. В., та ін. (2012). Цементобетони для покриття доріг. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 85, 48-55.
51. Чистяков, В. В., Шургая, А. Г., Дорошенко, Ю. М., Чиженко, Н. П., Кабусь, А. В., Коваль, Л. Б. (2012). Модифіковані цементобетони для покриття доріг. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка, (43), 212-216.
52. Шевчук Г. Я., Гуняк О. М., Гніш О. П., Мішин В. М. (2012). Розробка бетонів для дорожніх покриттів підвищеної довговічності з використанням добавок полікарбосилатного типу. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, (46), 371–376.

53. Bailey C. Bridging and Restraint Effects of Localised Fires in Composite Frame Structures / C.Bailey, I.Burgess, R.Plank // Conference report. International Conference " Composite Construction - Conventional and Innovative", Innsbruck, Austria, September 16-18, 1997. - P.379-384.
54. DIN 1045-2 Norm, 2001-07. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton-Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Beuth Verlag, Berlin.
55. Borysenko, O. B., et al. (2013). Eksperymentalni doslidzhennia temperaturnykh deformatsii teploizoliatsiinykh materialiv fasadnykh system z shtukaturnym sharom. Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy, 25, 21-26.
56. Hoi, B. V., & Katola, Kh. O. (2015). Rozvytok poniattia «zelenoi arkhitektury» v suchasnomu proiektuvanni ta budivnytstvi. Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnika», 816, 99-108.
57. Ivanenko, D. S., Kulik, M. V., Bobrakov, A. A., & Moskalova, A. V. (2023). BIM yak baza dlia mekhanizmu upravlinnia budivelnymy proektamy. Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy, 42, 175-184.
58. Fennis S. A. A. M., Walraven J. C., J. A. den Uijl. Optimizing the particle packing for the design of ecological concrete. 16. Internationale Baustofftagung, – 2006. Band 1. P. 1313–1320.
59. Kulik, M. V., Kulish, S. O., & Ishchenko, S. S. (2020). Vprovadzhennia novitnykh tsyfrovizovanykh prohramnykh kompleksiv na bazi VIM-tekhnologii u budivnytstvi Ukrainy. Naukovyi visnyk budivnytstva, 2(100), 301-306.
60. Markovic I. High-Performance Hybrid-Fiber Concrete. Development and Utilisation. DUP Science. The Netherlands, 2006.
61. Michael A. Caldarone High-Strength Concrete. A Practical Guide. London: T&F e-Library, 2018. 273 p.
62. Pavlov, I. D., Poltavets, M. O., & Pavlov, F. I. (2020). Systemne upravlinnia orhanizatsiino-tekhnologichnoiu nadiinistiu vyrobnychykh protsesiv v budivnytstvi. Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka, 17, 53-61.

63. Pshinko, O. M., Zinkevych, A. M., & Savytskyi, M. V. (2018). Vidnovlennia ekspluatatsiinoi prydatnosti bet-onnykh, zalizobetonnykh y kamianykh konstruksii. Dnipro: DNUZT.
64. Takim, R., Harris, M., & Hadi Nawawi, A. (2013). Building Information Modeling (BIM): A New Paradigm for Quality of Life Within Architectural, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 101, 23-32.
65. Tran, Y. T., Lee, J., Kumar, P., Kim, K. H., & Lee, S. S. (2019). Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part B: Engineering*, 165 (December 2018), 354–364. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.084>
66. Vejmelková, E., Koňáková, D., Kulovaná, T., Keppert, M., Žumár, J., Rovnaníková, P., Černý, R. (2015). Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance. *Cement and Concrete Composites*, 55, 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.013>
67. Schneider M. The cement industry on the way to low-carbon future / M. Schneider // *Cement and Concrete Research*. – 2019. – Vol. 124. – P. 1–19.
68. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Gorpynko O., Geviuk I. Effect of the Particle Surface Distribution on the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials in Blended Cements. *Book of abstracts ICC 2019*. – P. 188.
69. Wei, Y., Wang, Y., & Gao, X. (2015). Effect of internal curing on moisture gradient distribution and deformation of a concrete pavement slab containing pre-wetted lightweight fine aggregates. *Drying technology*, 33(3), 355-364.