

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет технологій і дизайну
Кафедра хімії та хімічної інженерії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Дослідження впливу технології і матеріалів для виробництва залізобетонних
конструкцій на стан довкілля

Рівень вищої освіти – другий магістерський

Галузь знань 16 – "Хімічна інженерія та біоінженерія"

Спеціальність 161 – "Хімічні технології та інженерія"

Освітня програма – "Хімічні технології та інженерія"

KPMXTI.2023202.01.03.00

Виконав: студент 2 курсу

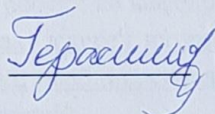
група ХТІм-23-1

Керівник: кандидат техн. наук,
доцент

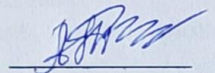
Нормоконтролер

До захисту допускаю:

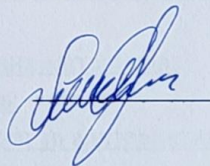
Зав. кафедри хімії та хімічної
інженерії



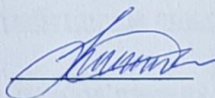
Богдан ГЕРАСИМОВ



Ганна ТКАЧУК



Олександр СТРЕМЕЦЬКИЙ



Ольга ПАРАСКА

19 грудня 2024 р.

Хмельницький, 2024

РЕФЕРАТ

Дослідження впливу технології і матеріалів для виробництва залізобетонних конструкцій на стан довкілля. Герасимов Б. В. Науковий керівник Ткачук Г. С.

Робота містить 74 с., 12 рисунків, 9 таблиць, 46 джерел.

Ключові слова: ЗАЛІЗОБЕТОННІ ВИРОБИ, ОХОРОНА ДОВКІЛЛЯ, ПЕРЕРОБЛЕНИЙ БЕТОН, ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ, ШЛАКОВИЙ ЦЕМЕНТ.

Мета роботи полягає в оцінці сучасного стану виробництва залізобетонних конструкцій, визначенні основних екологічних проблем, пов'язаних з цим процесом, та розробці пропозицій щодо вдосконалення технологій і матеріалів для зменшення їхнього негативного впливу на довкілля.

Об'єкт дослідження – технологія виробництва залізобетонних конструкцій.

Предмет дослідження – залізобетонні конструкції: традиційні і з переробленої сировини.

Методи дослідження – теоретичні й експериментальні: аналіз джерел науково-технічної інформації, математичне моделювання та статистика, рентгенофлуоресцентний аналіз, нагрівання, ультразвукові дослідження.

Кваліфікаційна робота виконана в Хмельницькому національному університеті на кафедрі хімії та хімічної інженерії відповідно до положень Закону України № 3534-ІХ "Про внесення змін до деяких законів України щодо пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності" ВВР, 2024, (3), с. 21.

Проведена оцінка сучасного стану виробництва залізобетонних конструкцій, визначені основні екологічні проблеми, пов'язані з цим процесом, та розроблені пропозиції щодо вдосконалення технологій і матеріалів для зменшення негативного впливу на довкілля, а саме: методом РФА проведений аналіз зразків залізобетону; випробувані зразки залізобетону шляхом нагрівання і визначена їхня міцність методом ультразвукових досліджень; оцінені зразки залізобетону за показниками впливу на довкілля; оптимізований склад альтернативного залізобетону.

Результати дослідження можуть бути корисними для створення більш екологічних будівельних матеріалів і використані для застосування перероблених матеріалів, скорочення викидів шкідливих речовин, зменшення споживання природних ресурсів та підвищення ефективності використання матеріалів. Результати роботи можуть бути корисними для розробників будівельних матеріалів, фахівців галузі будівництва та охорони довкілля.

19 грудня 2024 р.

Богдан ГЕРАСИМОВ

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	4
Вступ	5
1 АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	11
1.1 Загальна характеристика залізобетонних конструкцій	11
1.2 Особливості залізобетонного виробництва	16
1.3 Зелені технології виробництва залізобетонних конструкцій	28
2 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	44
2.1 Матеріали, використані в роботі	44
2.2 Методи досліджень.....	46
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	53
3.1 Дослідження якісного та кількісного складу зразків залізобетону	53
3.2 Випробування міцності залізобетонних зразків	57
3.3 Оптимізація складу для виробництва залізобетонних конструкцій відповідно до принципів впровадження зелених технологій	62
Висновки.....	69
Перелік джерел посилання.....	70

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

АЗБ	Альтернативний залізобетон
РФА	Рентгенофлуоресцентний аналіз
ТЗБ	Традиційний залізобетон

ВСТУП

Будівництво є однією з найважливіших ніш людської цивілізації, що забезпечує зведення інфраструктури, житлових та промислових об'єктів. Одним із ключових матеріалів у цій сфері є залізобетон, який завдяки своїй міцності, довговічності та універсальності знайшов широке застосування. Проте виробництво залізобетонних конструкцій пов'язане із використанням значних обсягів природних ресурсів, високими енергетичними витратами та викидами шкідливих речовин, що суттєво впливає на стан довкілля.

Залізобетонні конструкції широко використовують в будівництві завдяки поєднанню високої міцності, довговічності та стійкості до навантажень. Залізобетон являє собою комбінацію бетону та арматури, яка забезпечує покращені механічні властивості, зокрема на стиск та на розтяг.

Переваги залізобетону включають високу міцність, довговічність, вогнестійкість, стійкість до атмосферних впливів, можливість використання місцевих матеріалів, простоту створення конструкцій будь-якої форми, низькі експлуатаційні витрати, економічну ефективність. Серед недоліків бетону – значна густина, висока тепло- та звукопровідність, ризик утворення тріщин через усадку або незначні силові впливи. Для вирішення цих проблем використовують легкі пористі заповнювачі, створюють тонкостінні чи пустотні конструкції, а також додають полімерні добавки чи застосовують попередньо напружену арматуру, що підвищує тріщиностійкість і зменшує вагу конструкцій [1].

Залізобетон – це конструкційний матеріал, що поєднує бетон і сталеву арматуру, які працюють разом завдяки міцному зчепленню між ними. Основна ідея залізобетону полягає в раціональному об'єднанні властивостей бетону та арматурної сталі для їхньої спільної роботи. Зазвичай арматура сприймає зусилля розтягу, тоді як бетон ефективно працює на стиск. У стиснутих елементах, таких як колони, опори мостів чи стояки ферм, арматура також може сприймати стискальні зусилля. Для армування, окрім

сталі, можуть використовуватися інші матеріали, зокрема пластмаса, скловолокно, базальтові волокна чи навіть дерево.

Головним компонентом залізобетону є цемент – основний в'язучий матеріал, що забезпечує твердіння бетону при додаванні води. Найчастіше використовують портландцемент, який створює міцний та довговічний бетон. що використовується при виробництві цементу. Цементний клінкер – це напівфабрикат, з якого одержують цемент, це продукт, який добувають випалюванням вапняку та глини, і який складається з силікатів та алюмінатів кальцію. Виробництво клінкеру та цементу потребує значних енерговитрат і спричиняє значні викиди вуглекислого газу в атмосферу, тобто потребує уважного ставлення з точки зору впливу на довкілля.

Бетон у своєму складі містить заповнювачі, такі як щебінь, гравій, пісок, які забезпечують його міцність і структуру. Заповнювачі поділяються на дрібні – пісок, і крупні – щебінь, гравій. Вибір заповнювачів впливає на якість бетону, а видобуток і транспортування матеріалів можуть мати негативний вплив на довкілля через використання енергії, ерозію ґрунтів, зміну ландшафту екосистеми.

Армування бетону забезпечує його стійкість до розтягувальних навантажень, оскільки бетон добре працює на стиск, але слабкий на розтяг. Сталеві арматурні стрижні найчастіше використовують в залізобетонних конструкціях, проте їхнє використання має низку недоліків, таких як висока вартість, негативний вплив на довкілля виробництва заліза, значна вага конструкцій, що містять залізо. Тому зараз більше уваги приділяють розробці альтернативних матеріалів, таких як скловолокно, композити, базальтові волокна [2].

Організація об'єднаних націй визначила сімнадцять цілей сталого розвитку, серед яких особливе місце займають питання боротьби зі зміною клімату, забезпечення чистої води та санітарії, захисту наземних екосистем та сприяння сталому виробництву і споживанню. Дослідження впливу

технологій виробництва залізобетону на довкілля є важливим внеском у досягнення цих цілей.

Дослідження організацій Міжнародного енергетичного агентства та Міжнародної бізнес-ради зі сталого розвитку визначили чотири основні шляхи декарбонізації цементної промисловості:

- підвищення енергетичної – теплової та електричної ефективності;
- заміну традиційних викопних видів палива на аналоги з нижчим вмістом карбону;
- заміну клінкеру на альтернативні матеріали з цементуючими властивостями;
- використання технологій установок замкнутого водообігу.

Будівництво і відновлення вимагає нарощування обсягів багатотонного виробництва будівельних матеріалів, вагома частка яких припадає на залізобетонні конструкції та вироби. Основними проблемами є значні викиди вуглекислого газу під час виробництва цементу та заліза, які є одними з основних компонентів залізобетону, руйнування природних екосистем через видобуток наповнювачів, таких як пісок та щебінь, а також утворення великої кількості будівельних відходів.

Крім вище названих джерел навантаження на довкілля, під час військової агресії відбувається руйнування будівель і всебічне забруднення навколишнього середовища не лише традиційним антропогенним фактором, але й багаторазово підсиленим через воєнні дії.

Для усунення негативного впливу виробництва та використання залізобетону потрібний постійний моніторинг екологічних наслідків використання різних видів цементу, заповнювачів та добавок, розробка рекомендацій щодо вдосконалення нормативно-правової бази в галузі виробництва залізобетонних конструкцій, розробка нових екологічно чистих технологій виробництва бетону, оптимізація існуючих технологій з метою зменшення їхнього негативного впливу на довкілля, створення більш ефективних систем управління відходами у будівельній галузі, розробка

нових стандартів і норм, що регламентують виробництво і використання залізобетонних конструкцій тощо [3].

Актуальність: в контексті глобальних викликів, що пов'язані зі змінами клімату, виснаженням природних ресурсів та забрудненням навколишнього середовища, актуальними є удосконалення і впровадження зелених технологій і матеріалів у виробництві залізобетонних конструкцій і виробів.

Актуальність теми визначається необхідністю зменшення негативного впливу будівельної галузі на навколишнє середовище, впровадження принципів сталого розвитку у виробництво залізобетонних конструкцій, а також потребою в енергоефективних і ресурсозберігаючих технологіях.

За останні роки відбувається активний розвиток зелених технологій, які спрямовані на зменшення негативного впливу виробництва на довкілля. Дослідження в галузі виробництва залізобетону дозволять зробити більш екологічними ці технології та сприяти їхньому впровадженню.

Тому актуальним також є пошук нових матеріалів і технологій, які дозволять створювати залізобетонні конструкції з меншим негативним впливом на довкілля з одного боку та забезпечать їхню міцність довговічність та екологічності з іншого боку.

Кваліфікаційна робота виконана в ХНУ на кафедрі хімії та хімічної інженерії відповідно до положень Закону України № 3534-IX "Про внесення змін до деяких законів України щодо пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності" ВВР, 2024, (3), с. 21.

Мета роботи полягає в оцінці сучасного стану виробництва залізобетонних конструкцій, визначенні основних екологічних проблем, пов'язаних з цим процесом, та розробці пропозицій щодо вдосконалення технологій і матеріалів для зменшення їхнього негативного впливу на довкілля.

Для досягнення мети роботи потрібно виконати наступні завдання:

- провести аналіз існуючих технологій виробництва залізобетонних конструкцій та їхнього впливу на довкілля;

- дослідити можливості застосування альтернативних матеріалів;
- визначити методи та обрати методики досліджень;
- провести якісний та кількісний аналіз традиційного та альтернативного зразків залізобетону;
- визначити міцність традиційного та альтернативного зразків залізобетону після нагрівання;
- оцінити традиційний та альтернативний зразки залізобетону за показниками впливу на довкілля;
- оптимізувати склад альтернативного залізобетону.

Об'єкт дослідження – технологія виробництва залізобетонних конструкцій.

Предмет дослідження – залізобетонні конструкції: традиційні і з переробленої сировини.

Методи дослідження – теоретичні й експериментальні: аналіз джерел науково-технічної інформації, математичне моделювання та статистика, рентгенофлуоресцентний аналіз, нагрівання, ультразвукові дослідження.

Результати роботи: проведений аналіз наукових даних за темою роботи, проведена оцінка сучасного стану виробництва залізобетонних конструкцій, визначені основні екологічні проблеми, пов'язані з цим процесом, та розроблені пропозиції щодо вдосконалення технологій і матеріалів для зменшення негативного впливу на довкілля, а саме: проведений аналіз існуючих технологій виробництва залізобетонних конструкцій, вплив їх на довкілля та досліджені можливості застосування альтернативних матеріалів; методом РФА проведений якісний та кількісний аналіз зразків залізобетону; проведені випробування зразків залізобетону шляхом нагрівання і визначена їхня міцність методом ультразвукового дослідження; оцінені зразки залізобетону за показниками впливу на довкілля; шляхом математичного моделювання оптимізований склад альтернативного залізобетону.

Практичне значення результатів роботи: проведені дослідження можуть бути корисними для створення більш екологічних будівельних

матеріалів. Результати досліджень можуть бути використані для удосконалення існуючих технологій виробництва і використання перероблених матеріалів, скорочення викидів шкідливих речовин, зменшення споживання природних ресурсів та підвищення ефективності використання матеріалів. Результати роботи можуть бути корисними для розробників будівельних матеріалів, фахівців галузі будівництва та охорони довкілля.

Особистий внесок здобувача: проведений аналіз наукових статей, державних і міжнародних стандартів за темою екологічних аспектів виробництва залізобетонних конструкцій, обрані залізобетонні матеріали у якості об'єктів дослідження та визначені методи дослідження. Проведені експериментальні випробування зразків, обробка експериментальних даних, математичне моделювання, сформульовані висновки до роботи, оформлена робота та презентаційні матеріали.

1 АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Загальна характеристика залізобетонних конструкцій

Бетон – це штучний кам'яний матеріал, який добре протистоїть стисканню і значно гірше розтягу. В бетонній балці, що згинається, виникають розтягнута і стиснута зони. Така балка має низьку несучу здатність внаслідок слабкого опору бетону розтяганню. Якщо в розтягнутій зоні такої балки розмістити арматуру, то її несуча здатність значно зросте.

Несуча здатність залізобетонної балки може перевищувати несучу здатність аналогічної бетонної більш, як у 10 разів. У стиснутих конструкціях значну частину навантаження сприймає бетон. Арматура працює спільно з бетоном і сприймає частину стискувальних зусиль, що дає можливість зменшити розміри поперечного перерізу елемента. Армування стиснутого бетону підвищує також надійність залізобетонних елементів.

Існують такі типи залізобетонних конструкцій: монолітні залізобетонні конструкції, коли монолітний залізобетон заливають безпосередньо на будівельному майданчику, що дозволяє створювати безшовні конструкції із високою міцністю. Такий тип часто використовують в багатоповерховому будівництві, зведенні мостів, тунелів і підпірних стін, де важливі рівномірні навантаження та мінімізація швів.

Збірні залізобетонні конструкції: коли елементи виробляють на заводі, потім транспортують на будівельний майданчик і монтують. Переваги збірних конструкцій включають скорочення часу будівництва, зменшення залежності від погодних умов і високу якість виробництва. Їх використовують у будівництві житлових і промислових будівель, мостів, стадіонів.

Попередньо напружені залізобетонні конструкції: коли арматуру натягують перед заливкою бетону, що покращує стійкість до навантажень розтягом. Попереднє напруження допомагає уникнути тріщин і підвищує

стійкість до вигину. Застосовується у мостобудуванні, створенні залізничних і автомобільних шляхів, у великих спорудах зі значними прольотами, де важлива стійкість до високих навантажень.

Залізобетонні конструкції спеціального призначення – це спеціальні споруди: резервуари, димові труби, ядерні реактори та інші об'єкти з підвищеними вимогами до міцності, герметичності та стійкості до впливу агресивного середовища.

Структура бетону зазвичай включає великий і дрібний заповнювачі, в'язучі речовини і воду. Після затвердіння бетон стає псевдотвердим матеріалом із трьома фазами: твердою, рідкою та газоподібною. Це визначає його специфічні властивості, такі як нелінійність деформацій, схильність до утворення тріщин, усадка та повзучість, які відрізняють його від інших пружних і однорідних матеріалів.

Вода взаємодіє з цементом, запускаючи процес гідратації, в результаті якої проходить затвердіння бетону. Якість води, її чистота, вміст домішок впливають на міцність та довговічність залізобетону.

Бетон як матеріал для залізобетонних конструкцій мусить мати визначені і задані фізико-механічні властивості: міцність, достатню щільність – непроникність, надійне зчеплення із арматурою, морозостійкість та жаростійкість, антикорозійний опір тощо.

Міцність бетону в першу чергу визначає його структура. Вона залежить від зернистого складу великих та дрібних заповнювачів, відношення вода – цемент, способу ущільнення, умов твердіння, швидкості гідратації цементного каменю, заповненого зернами великих і дрібних заповнювачів і пронизаного численними мікропорами й капілярами.

Бетони поділяють за низкою ознак:

- структурою – щільної структури, в яких простір між зернами заповнювача зайнятий затверділим в'язучим компонентом: крупнопористі, у яких немає піску чи його дуже мало; пористі, у яких створюється додаткова

пористість в'язучого компоненту; пористі, у яких створюються лише штучні пори; дрібнозернисті, у яких немає великого заповнювача, тощо;

- величиною середньої густини: особливо важкі $> 2500 \text{ кг/м}^3$, важкі $(2200 - 2500) \text{ кг/м}^3$, полегшені $(1800 - 2200) \text{ кг/м}^3$, легкі $(500 - 1800) \text{ кг/м}^3$;

- видом заповнювача – вапняк, граніт, гравій, керамзит, черепашник, шлак тощо;

- зерновим складом – крупнозернисті та дрібнозернисті;

- умовами твердіння – природні чи з застосуванням тепло-вологої обробки;

- видом в'язучого компоненту – цементні, вапняні, полімер-цементні, гіпсові, комбіновані.

Залізобетон, завдяки його унікальним властивостям та широкій варіативності конструкцій є невід'ємною складовою сучасного будівництва, проте потребує оптимізації виробничих процесів і матеріалів для мінімізації впливу на екосистеми.

Залізобетонні конструкції широко застосовують в будівництві. З монолітного і збірного залізобетону споруджують одно- та багатоповерхові виробничі будівлі, монтують стіни і несучі конструкції великопанельних будівель, розвивається будівництво житлових будинків із залізобетонних блок-кімнат. До складу громадських будівель входять переважно збірний залізобетонний каркас, плити перекриттів, стінові панелі.

Залізобетонний каркас використовують для аркових, нерозрізних та розрізних балкових мостів на залізничних та автомобільних магістралях.

Монолітний та збірно-монолітний залізобетон широко застосовують у різних галузях будівництва завдяки міцності, довговічності, універсальності.

В гідротехнічному будівництві залізобетон використовують для створення гребель, шлюзів, набережних і будівлі гідроелектростанцій.

У транспортному будівництві його залізобетон застосовують для виготовлення попередньо напружених опор, шпал, контактної мережі, естакад, шляхопроводів, станційних будівель та споруд.

Інженерні споруди, як от резервуари, бункери, силоси, тунелі, підпірні стіни, очисні споруди, підземні переходи, телевізійні вежі, атомні реактори і нафтовидобувні платформи, здебільшого проектують з залізобетону завдяки його здатності витримувати досить значні навантаження та вплив агресивних середовищ.

Злітно-посадкові смуги, котрі споруджують із монолітного залізобетону, часто попередньо напруженого, можуть витримувати значну політну масу сучасних літаків. В суднобудуванні залізобетон застосовують для створення плавучих споруд – дюків, понтонів, дебаркадерів та причалів.

Перспективним є використання залізобетону в галузі машинобудування, зокрема для контртягарів, та у верстатобудуванні – для виготовлення станин потужних верстатів і пресів, де важливі висока жорсткість та стійкість до деформацій.

Таким чином, залізобетон є універсальним матеріалом, який знаходить застосування в найрізноманітніших галузях завдяки його винятковим властивостям.

Виробництво залізобетону – це багатоступеневий процес, що включає підготовку сировини, формування суміші, її укладання та твердіння. Підготовка залізобетонної суміші починається із відбору та підготовки компонентів: цементу, заповнювачів, води, арматури.

Заповнювачі – гравій, щебінь, пісок, – ретельно сортують, очищують і часто додатково подрібнюють для досягнення необхідного розміру частинок. Цемент зазвичай транспортують з цементних заводів, що потребує енергії для транспортування і зберігання. Арматуру піддають попередній обробці – різанню, згинанню, що також вимагає енергетичних затрат.

На етапі приготування бетонної суміші проходить змішування цементу, заповнювачів і води у певних пропорціях, визначених залежно від вимог

щодо міцності і довговічності залізобетону. У процесі приготування додають хімічні добавки з метою покращення властивостей бетону: наприклад, пластифікатори – для підвищення текучості чи гідрофобізатори для стійкості до вологи.

Змішування зазвичай виконують у великих змішувачах, що потребують значної кількості енергії для рівномірного розподілу компонентів у всьому об'єму суміші. Виробничі об'єкти можуть використовувати електроенергію, дизельні чи інші види енергетичних ресурсів.

Після приготування бетонної суміші її заливають до форм, які визначають форму і розміри залізобетонних конструкцій. Важливе забезпечення рівномірного заповнення форми, тому використовують вібраційне ущільнення з метою видалення повітряних бульбашок та забезпечення щільного прилягання суміші до залізної арматури. Цей процес потребує витрат енергії, зазвичай для вібраційних машин, котрі працюють на електричній чи механічній основі.

Процес твердіння є критично важливим, адже в цей період бетон набуває своєї міцності. Для оптимального твердіння бетонну суміш слід зволожувати для уникнення надмірного випаровування води. Твердіння може тривати кілька днів чи навіть тижнів залежно від типу цементу й умов навколишнього середовища. Для прискорення процесу твердіння можуть використовуватись теплові обробки, що потребує додаткових енергетичних витрат для нагрівання води чи пари. Це особливо актуальне у виробництві збірних залізобетонних конструкцій.

Після досягнення необхідної міцності залізобетонні конструкції виймають з форм і за необхідності піддають додатковій обробці – шліфуванню, обрізці. Готові залізобетонні конструкції транспортують до місця призначення, що також пов'язано із витратами енергії на вантажно-розвантажувальні роботи і перевезення.

1.2 Особливості залізобетонного виробництва

Цемент є основним компонентом залізобетону. Виробництво цементу є найбільш енерговитратним через потребу у високотемпературних печах до 1450 °С, що призводить до значних викидів вуглекислого газу. Під час випалу основної складової цементу – клінкеру споживається багато теплової енергії, яку зазвичай отримують з викопного палива.

На стадії змішування і формування бетонної суміші витрачається електроенергія для роботи насосів для подачі суміші, змішувачів, конвеєрів, вібраційного ущільнення. Особливо значні енерговитрати у виробництві збірних конструкцій, де потрібно підтримувати безперервний процес змішування і формування.

Прискорене твердіння чи пропарювання бетону потребують додаткової енергії для нагріву води, виробництва пари чи забезпечення тепла. Цей процес може істотно вплинути на загальну енергоємність виробництва, особливо у холодну пору року.

На завершальному етапі виробництва, коли залізобетонні елементи конструкцій транспортують до місця будівництва, використовують дизельне паливо або інші види палива для транспортувальних засобів, що впливає на загальний рівень енергоспоживання виробництва. Виробництво залізобетону потребує суттєвих енергетичних ресурсів на різних етапах, що зумовлює необхідність запровадження енергозберігаючих технологій та альтернативних матеріалів для зменшення екологічного навантаження.

Виготовлення залізобетонних конструкцій на заводах залізобетонних виробів можливе такими способами: конвеєрна технологія, коли залізобетонний каркас виготовляють у формах, встановлених на вагонетках, що переміщуються на рейках конвеєра від одного агрегату до іншого. При цьому послідовно виконують наступні операції: установку арматурних каркасів, сіток і закладних деталей, бетонування й ущільнення бетонної суміші, термоволога чи автоклавна обробка, складування готової продукції.

При такій технології має бути витриманий ритм виробництва. Її застосовують при масовому випуску залізобетонних елементів малої ваги.

Потоково-агрегатна технологія: технологічні операції здійснюють в відповідних відділеннях заводу, а форму з виробом переміщують від одного агрегату до іншого з допомогою мостових кранів. При цьому витримувати ритм виробництва не обов'язково.

Стендова технологія, коли виріб залишається нерухомим, а переміщують агрегати, які виконують відповідні операції. Таку технологію використовують для виготовлення великогабаритних попередньо напружених залізобетонних каркасів.

Виробництво залізобетонних конструкцій має суттєвий вплив на навколишнє середовище, оскільки воно пов'язане з викидами парникових газів, забрудненням ґрунтів, води та утворенням значної кількості відходів. З метою покращення екологічної ситуації варто враховувати ключові аспекти екологічного впливу на довкілля виробництва залізобетону.

Викиди парникових газів при виробництві цементу, є основним джерелом викидів вуглекислого газу, що припадає на процес випалу клінкеру за високих температур понад 1400 °С. На цей процес витрачають багато енергії, яку зазвичай отримують з викопних джерел вугілля, нафти, газу. На кожну тону виробленого цементу припадає приблизно від 0,7 т до 1 т викидів вуглекислого газу, що значно сприяє глобальному потеплінню.

Для виробництва бетону, змішування, транспортування й укладання суміші потрібні значні енергетичні ресурси, що також збільшує викиди парникових газів, якщо енергію отримують з невідновлюваних джерел.

Споживання води необхідне на кожному етапі виробництва, зокрема при змішуванні й ущільненні бетонної суміші, використовують великі обсяги води. У регіонах з дефіцитом прісної води це призводить до додаткового навантаження на природні ресурси. Вода, що використовується для охолодження й очищення обладнання, містить цементний пил, луги й інші хімічні домішки. При відсутності відповідної фільтрації забруднені стоки

потрапляють у водойми, що призводить до порушення екосистем та загибелі водних організмів.

На різних етапах виробництва залізобетону утворюється цементний пил, який осідає на ґрунт, погіршує його хімічний склад та забруднює важкими металами і мінералами. Це знижує родючість ґрунтів, що може впливати на здоров'я рослин та тварин.

При виготовлення збірних залізобетонних елементів, залишаються уламки, невикористані матеріали, які можуть містити токсичні речовини. За відсутності належного управління відходами ці залишки потрапляють в навколишнє середовище, забруднюючи ґрунти і ґрунтові води.

В процесі будівництва залізобетонних конструкцій нерідко утворюються надлишки матеріалів, зокрема бетону й арматури, котрі не підлягають повторному використанню без додаткової обробки.

Залізобетонні конструкції зазвичай виробляють у значних масштабах, що супроводжується утворенням відходів заповнювачів, цементу, арматури, хімічних добавок. Деякі з таких відходів важко утилізувати, та вони можуть вимагати спеціальної обробки для безпечного зберігання чи повторного використання.

Щоб забезпечити виробництво залізобетону, значні обсяги заповнювачів видобувають з природних кар'єрів. Це призводить до ерозії ґрунтів, зміни рельєфу та руйнування природних екосистем. Крім цього, видобуток матеріалів спричиняє забруднення повітря і води навколишніх територій.

Перевезення цементу, заповнювачів і залізобетонних конструкцій потребує використання транспортних засобів, які працюють на дизельному або бензиновому пальному. Це призводить до викидів вихлопних газів, які містять оксиди азоту, вуглекислий газ, дрібнодисперсний пил.

Для виробництва цементу здебільшого використовують легкоплавкі глини, аргіліти, глинисті сланці, які утворюють частину цементної шихти. Другою основною складовою шихти є карбонатні породи. Вапняк (75 – 80) %

і глину (20 – 25) % змішують і випалюють за високої температури від 900 °С до 1500 °С, у циліндричних печах, які встелені вогнетривким матеріалом всередині. Розмір цементних печей може сягати до 185 м в довжину і 5 м в діаметрі.

Шихта, що знаходиться у верхній частині печі, повільно обертається, тому матеріал пересипається внутрішнім периметром її поверхні і рухається до нижньої частини печі назустріч розжареним газам – продуктам згоряння пального – розпиленого вугілля чи горючих газів. Цементні печі встановлюють горизонтально із нахилом осі під кутом 10°.

При обпалюванні поступово проходять головні хімічні перетворення цементних матеріалів. Випаровування вологи здійснюється за температури (100 – 120) °С. Вигорання органічних домішок може відбуватись лише за температур вищих 500 °С. Розкладання вапняку проходить при (800 – 1000)°С:



Силікати й алюмінати кальцію є основою легкоплавкої глини. Вони утворюються при взаємодії оксиду кальцію з діоксидом силіцію та оксидом алюмінію за температур (1000 – 1300) °С:



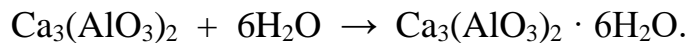
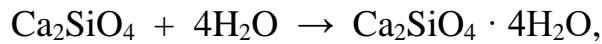
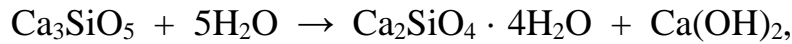
За температур (1300 – 1450) °С утворені силікати й алюмінати спікаються. Клінкер вивантажують із кінця печі, потім охолоджують і розмелюють і упаковують в спеціальну тару [4, 5].

Склад цементу виражають відсотковим вмістом CaO, SiO₂, Al₂O₃ і Fe₂O₃. Звичайний, або силікатний цемент містить: CaO (60 – 67) %, SiO₂ (17 – 25) %, Al₂O₃ (3 – 8) %, Fe₂O₃ (0,3 – 6,0) %.

Найчастіше цемент використовують в суміші з піском в пропорції одної частини цементу до 3 – 5 частин піску. При додаванні води виходить

напіврідка, тістоподібна маса, що має назву цементного розчину. З часом він застигає, твердне і перетворюється на каменеподібний матеріал.

За звичайної температури цементний розчин твердне майже місяць. На тривалість впливає перебіг хімічних реакцій, найголовніші з яких подані нижче:



Бетон утворюється коли застиглий цементний розчин поєднаний в суміші з щебнем і гравієм. При заповненні бетоном залізного каркасу – стрижня, дроту тощо, матеріал можна назвати залізобетонним.

Залізобетон і бетон мають високу твердість і механічну міцність, бо цемент дуже міцно зв'язується із залізом та має однаковий з ним коефіцієнт теплового розширення, при цьому бетон характеризується високим опором до стиснення, а металоконструкція – до згину. Їх активно використовують в будівництві житлових будинків, каналів, мостів, гідроелектростанцій, корпусів промислових підприємств [4, 5].

Існують різні методи у виробництві цементу. До основних методів відносяться – сухий, мокрий і комбінований. Кожний з цих методів має власні особливості, кроки виробничого процесу, переваги і недоліки.

Сухий метод виробництва цементу відрізняється тим, що сировину піддають сушці та подрібненню до потрібної фракції перед подальшою обробкою. Головні кроки виробничого процесу включають:

- підготовку сировини: вапняк і глину постачають з кар'єрів та подрібнюють в дрібну фракцію;
- попередню гомогенізацію та сушку;
- помел: сушену сировину подають до млина, де її мелють до отримання порошку, що дозволяє збільшити поверхню частинок та покращити активність реакції при подальшому обпалі;

- обпал: отриманий порошок піддають обпалу в ротаційній печі за високих температур. Під впливом високих температур вихідна сировина перетворюється в цементний клінкер;

- додаткові кроки: після операції обпалу до клінкеру додають добавки, такі як гіпс чи попіл, для регулювання якості цементу. Потім клінкер подрібнюють до отримання кінцевого продукту – цементного порошку [4– 8].

Мокрий метод виробництва цементу відрізняється тим, що сировину змочують водою та піддають подальшій обробці у вигляді суспензії. Основні етапи виробничого процесу включають:

- підготовку сировини: вапняк і глину постачають з кар'єрів і подрібнюють на маленькі частинки;

- змочування: подрібнену сировину змочують водою з утворенням суспензії. Вода сприяє розчиненню речовин та розподілу компонентів сировини;

- помел: суспензію піддають процесу помелу для отримання порошку. Це дозволяє збільшити питому поверхню частинок та забезпечити рівномірний розподіл компонентів;

- гомогенізацію та дозування: отриманий порошок піддають гомогенізації для забезпечення однорідності суміші. Далі до суміші додають додаткові компоненти для налаштування властивостей цементу.

- сушіння: отриману суміш сушать для видалення надлишкової вологи та підготовки до обпалу;

- обпалення: сушений порошок піддають обпалу в ротаційній печі, де проходить хімічна реакція та формується клінкер;

- додаткові кроки: після обпалу до клінкеру додають добавки, котрі регулюють якість цементу. Потім клінкер подрібнюють до отримання кінцевого продукту – цементного порошку [4 – 10].

Комбінований метод виробництва цементу поєднує елементи сухого і мокрого методів. Основні етапи виробничого процесу:

- підготовка сировини: сировину піддають подрібненню та розмелюванню, а потім змочують водою, утворюючи суспензію;
- суміш і помел: змочену сировину суміщають із додатковими компонентами, котрі регулюють властивості цементу. Потім суміш піддають помелу для отримання порошку;
- сушіння: отриманий порошок сушать для видалення вологи та підготовки до обпалу;
- обпалення: сушений порошок піддають обпалу в ротаційній печі, де проходить хімічна реакція і формується клінкер;
- додаткові кроки: до клінкеру додають добавки для регулювання якості цементу. Потім клінкер подрібнюють до отримання кінцевого продукту – цементного порошку.

Загальною характеристикою сухого, мокрого і комбінованого методів виробництва цементу є те, що всі вони передбачають підготовку сировини, помел, обпалення і додавання добавок. Вони розрізняються в способі підготовки сировини і послідовності кроків виробничого процесу, що зображено на рисунку 1.1.

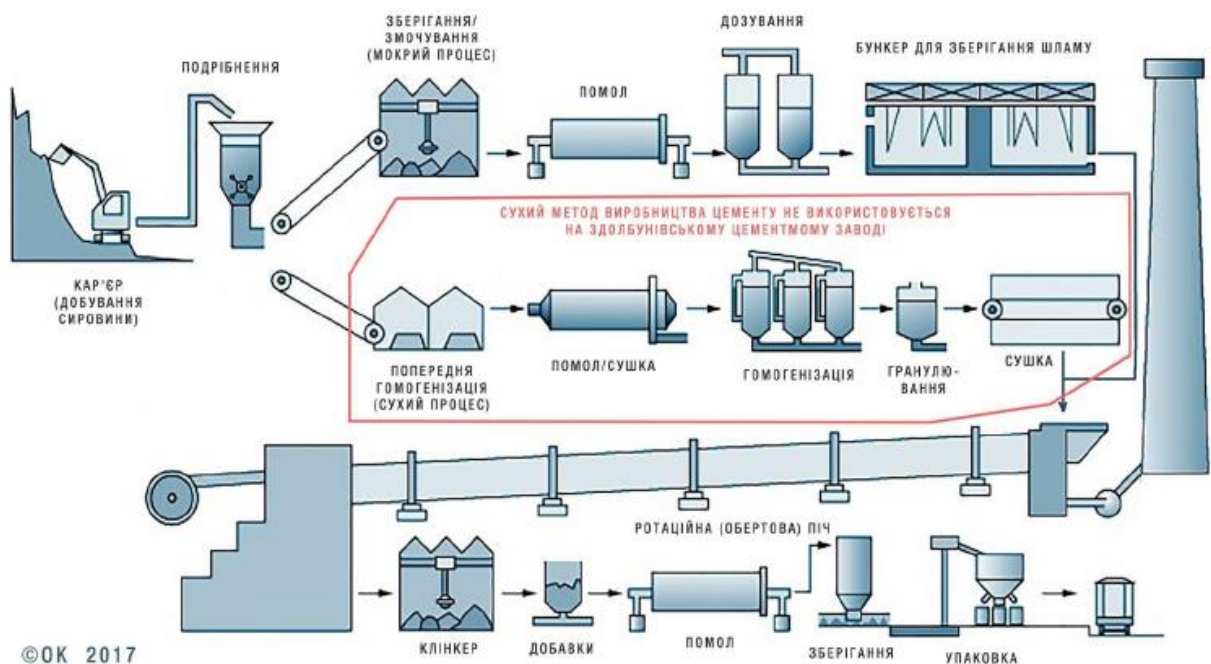


Рисунок 1.1 – Технологічна схема виробництва цементу

Вибір методів виробництва цементу залежить від низки факторів, таких як властивості сировини, доступність ресурсів, енергетичні вимоги і вимоги до якості продукту. Кожний метод має свої переваги і недоліки, тому вибір має здійснюватись із врахуванням конкретних умов і вимог виробництва цементу.

Кожний метод виробництва цементу має як переваги, так і недоліки. Вибір методу залежить від ряду факторів, таких як економічність, доступність сировини і вимог до якості продукту [4 – 8].

Цементні заводи є одними з найбільших забруднювачів повітря і основних джерел викидів парникових газів серед промислових галузей. Лідерами виробництва цементу в світі є Китай, який виробляє цементу 2,5 млрд т на рік, Індія – 285 млн т, та США – 80 млн т.

Виробництво цементу супроводжується викидами 1,9 Гт вуглекислого газу на рік, що є причиною від 5 % до 8 % світових викидів парникових газів, з яких понад 1,5 Гт вуглекислого газу є викидами від цементних печей. Без вжиття заходів зі скорочення викидів вуглекислого газу їхній обсяг щорічно зростатиме на 3 %.

Інтенсивність викидів на 1 т виробленої продукції відрізняється у різних країнах світу. Наприклад, в Німеччині цей показник становить 0,63 т CO₂-екв на тонну виробленого цементу, в США – 0,81 т CO₂-екв на тонну.

Середній показник інтенсивності викидів парникових газів у виробництві цементу в світі становить 0,79 т CO₂-екв на тонну. В 2019 році в Україні було вироблено приблизно 9,8 млн т цементу та 6,4 млн т клінкеру, що робить цю галузь значним джерелом викидів вуглекислого газу 3,33 млн т, за даними Міністерства природних ресурсів України.

Існують три основні джерела прямих викидів вуглекислого газу від виробництва цементу: прямі викиди в результаті процесів випалу 54 %, спалювання палива 3 %, непрямі викиди, пов'язані із споживанням електроенергії 12 %.

Виробництво цементу не можливо просто очистити за рахунок використання відновлюваних джерел енергії чи підвищення ефективності, оскільки більша частина викидів вуглекислого газу у цементній промисловості пов'язана не з енергетикою, а з процесами виробництва цементу з вапняку. Клінкер, основний компонент цементу, виробляють шляхом розкладу вапняку на кальцій оксид та вуглекислий газ. Кальцій оксид використовують далі, а вуглекислий газ викидається в атмосферу [10, 11].

Цементний пил – це сухий, не залежаний цемент, із розміром частинок менше 200 мкм. Частинки надовго зависають в повітрі, швидкість осадження від 0,2 см / с до 6,0 см / с. Під час приготування цементної суміші зростає обсяг викиду зважених часток, і разом з ним зростає також загальний рівень виділення пилу. Під час обсипання цементного порошку утворюється пилова завіса [4, 8].

У виробничих підрозділах із неорганізованими джерелами викидів показник безпечного рівня вмісту шкідливих речовин, як от концентрації пилу, може перевищувати санітарні норми у 5 та більше разів, наприклад, у цехах фасування готової продукції, на станціях подрібнення фракцій цементної сировини і на ділянках транспортування сировини [5].

Важливий також хімічний склад елементів, що викидаються в атмосферу, який необхідно знати для прогнозування можливої взаємодії цих елементів із компонентами довкілля. Цементний пил, що утворюється в великих обсягах у промисловості та в житловому будівництві, є одним з компонентів забруднення повітря.

Цементний пил і його сполуки несуть загрозу здоров'ю людини у цілому, але найбільше негативного впливу зазнають дихальні шляхи. Це може призвести до захворювань: запалення легень, бронхіту, трахеїту, які поступово можуть перерости в хронічні форми. Пряма взаємодія людини та пилу може викликати захворювання шкіри й очей.

Активними генераторами пилу є обертові печі і дробильно-сушильні установки [9]. В обортових печах сухого виробництва пил має низький вміст вологи, високий питомий електричний опір $1,0 \cdot 10^9$ Ом·м, та тонкий дисперсний склад нижче 5 мкм. Пилова суміш, що утворюються при дробленні і транспортуванні сировинних матеріалів, має грубодисперсний склад: близько 70 % частинок більша 5 мкм.

Підсумуємо і виділимо деякі причини високого рівня пилу, що утворюється в цементній промисловості України:

- недосконала система автоматизації і герметизації технологічних процесів;
- недостатній рівень встановлення газоочисного обладнання на стаціонарних джерелах викидів забруднюючих речовин;
- тривала посилена експлуатація застарілого обладнання зі значним матеріальним та майже повним моральним зносом;
- відсутність методів знепилення [5 – 13].

Для зменшення навантаження на довкілля постійно розробляють і вдосконалюють інноваційні технології виробництва цементу, які полягають у заміні вапнякового клінкеру задля скорочення викидів вуглекислого газу в цементній промисловості. Заміна вапнякового клінкеру іншими матеріалами може значно зменшити вуглецевий слід цементного виробництва, але дослідження й розробка відповідних речовин все ще триває.

Такими заміниками, наприклад, можуть бути деякі геополімери, що характеризуються на 80 % меншими викидами вуглекислого газу, ніж традиційний цемент. Проте неможливість розведення геополімерів водою через високу лужність робить їх нестабільними та менш довговічними.

Виробництво цементу може бути також на магнієвій основі. Так, цементний завод у Портленді США використовує технології перетворення силікатів магнію в оксид магнію при використанні низьковуглецевих та низькотемпературних процесів, а також додаванні мінеральних добавок для зміцнення матеріалу та поглинання вуглекислого газу. В майбутньому ця

технологія може стати основою виробництва цементу з нульовим вмістом вуглецю [17].

Такі добавки, як летюча зола, вулканічний попел та сталеливарний шлак, також широко застосовують для заміни вапнякового клінкеру. Однак наявність цих матеріалів обмежена через їхнє використання в інших процесах. Окрім того, летюча зола утворюється при роботі вугільних електростанцій, що само по собі ставить під сумнів кліматичну доцільність таких рішень.

Технологія уловлення вуглецю в цементній промисловості полягає в процесі вловлювання після спалювання палива, збагаченого киснем. Установа для очищення димових газів наприкінці традиційного виробництва клінкеру поглинає вуглекислий газ із димових газів у спеціальну хімічну рідину, після чого рідину регенерують і відділяють чистий вуглекислий газ.

Використання геотермальної енергії для нагрівання ротаційних печей значно знижує викиди вуглекислого газу та залежність від дефіцитних видів енергії [17]. Геотермальна енергія являється однією з перспективних технологій, котра може зробити значний внесок у зменшення викидів вуглекислого газу та покращення екологічної чистоти виробництва цементу. Цей підхід передбачає використання тепла, що накопичується в надрах Землі, для нагрівання ротаційних печей, які є головними установками при виробництві цементу.

За результатами досліджень, використання геотермальної енергії дає змогу значно знизити викиди вуглекислого газу в цементній промисловості. Цього досягають завдяки заміні викопного палива, котре зазвичай використовують при нагріванні печей, на енергію, отриману з геотермальних джерел.

Застосування геотермальної енергії також зменшує залежність цементної промисловості від скорочених видів енергії, таких як вугілля чи нафта, що сприяє створенню більш екологічного виробничого процесу. Заміна

традиційних джерел енергії на відновлювані види, такі як сонячна чи вітрова, може знизити викиди вуглекислого газу в зменшити вплив на зміни клімату. Виробництво цементу, що використовує відновлювані види енергії, стає все більш популярним.

Стаття [9] розглядає проблему заміни традиційних джерел енергії на відновлювані в контексті виробництва цементу. Вони використовують техніко-економічне моделювання для оцінки варіантів зменшення викидів вуглекислого газу із застосуванням відновлюваних джерел енергії для отримання важливих висновків при формуванні політики в галузі.

Карбонізація цементу: використання викидів вуглекислого газу й інших карбоновмісних газів з промислових джерел чи повітря для виробництва карбонатів допоможе зменшити викиди вуглекислого газу та зробити цемент більш стійким і міцним.

Стаття [10] розглядає проблему зменшення викидів вуглекислого газу під час виробництва цементу шляхом застосування технології карбонатизації. Автори досліджують можливість використання викидів вуглекислого газу із промислових джерел чи повітря для виробництва карбонатів, які можуть бути використані у цементній промисловості.

Принцип карбонізації полягає в змішуванні вуглекислого газу з цементними матеріалами чи іншими відповідними матеріалами для утворення карбонатів. Цей процес може відбуватись при нормальних атмосферних умовах чи при використанні підвищених температур та тиску для прискорення реакції. Дослідження, проведене авторами, показує, що технологія карбонатизації має великий потенціал зменшення вуглецевого сліду цементної промисловості. Вона не лише дозволяє використовувати відходи вуглекислоти, що інакше були б викинуті в атмосферу, але робить цемент більш стійким до впливу часу [3 – 5].

1.3 Зелені технології виробництва залізобетонних конструкцій

Зелений бетон – це термін, який використовують для опису низки бетонних складів, що включають перероблені матеріали, відходи й екологічно чисті компоненти. Ці композиції спрямовані на зменшення споживання природних ресурсів, зниження викидів вуглецю, пов'язаних з виробництвом цементу, мінімізацію впливу бетонних конструкцій на довкілля. Використання перероблених заповнювачів, додаткових цементних матеріалів, промислових побічних продуктів, таких як зола виносення і шлаки, є прикладами компонентів екологічного бетону, що сприяють більш стійкій бетонній суміші [24].

Перероблені заповнювачі є важливою складовою зеленого бетону, оскільки вони допомагають зменшити вплив виробництва бетону на довкілля шляхом використання відходів та зменшення попиту на природні ресурси.

Використання перероблених заповнювачів в бетонному будівництві сприяє дотриманню принципів сталого розвитку і циркулярної економіки, сприяє ефективності використання ресурсів та мінімізації відходів. Перероблені заповнювачі отримують з різних відходів: відходи будівництва та знесення, що включають зруйнований бетон, цеглу, кладку, і відходи, такі як скло і пластик. Їх переробляють та подрібнюють до різних розмірів, щоб частково чи повністю замінити природні заповнювачі бетонних сумішей [22].

Завдяки заміні природних заповнювачів переробленими зменшується видобуток сировини – піску, гравію, вапняку, що призводить до зниження впливу на довкілля і збереження природних ресурсів для прийдешніх поколінь. Використання відходів, таких як відходи будівництва Construction and Demolition або C&D, як джерела перероблених заповнювачів зменшує кількість звалищ, загальну кількість відходів і негативний вплив на довкілля. Обробка і транспортування перероблених заповнювачів бере менше енергії порівняно із видобутком та транспортуванням природних заповнювачів, що призводить до зниження споживання енергії і викидів парникових газів. В

деяких випадках використання перероблених заповнювачів призводить до економії коштів [20].

Існують певні проблеми, пов'язані із використанням перероблених заповнювачів в бетонному будівництві, Це мінливість їхньої якості і властивостей, потенційне забруднення і необхідність належного контролю якості і методів обробки. Крім цього, характеристики бетону, виготовленого із перероблених заповнювачів, можуть відрізнитись залежно від типу і частки використаних перероблених матеріалів. Щоб розв'язати ці проблеми, потрібні подальші дослідження, стандартизація і розробка рекомендацій використання перероблених заповнювачів в бетонному будівництві. Додавання перероблених заповнювачів в екологічно чистий бетон – це ефективний спосіб підвищення стійкості бетонних конструкцій за рахунок зменшеного споживання природних ресурсів, мінімуму утворення відходів та зниження впливу на довкілля.

Промислові побічні продукти також є цінними компонентами зеленого бетону, оскільки дозволяють утилізувати відходи різних промислових галузей і зменшити вплив на довкілля, пов'язане з виробництвом бетону [22]. Використання промислових побічних продуктів в бетонному будівництві відповідає принципам сталого розвитку і циркулярної економіки, стимулює ефективне використання ресурсів, мінімізує відходи. Промислові побічні продукти – це летюча зола, кремнезем, доменний шлак, зола рисового лушпиння. Їх можна використовувати як додаткові цементні матеріали Supplementary Cementitious Materials, SCM і зменшити потреби у традиційному цементі.

Існують певні проблеми у використанні SCM для зеленого бетону, такі як доступність, мінливість властивостей, потенційне забруднення, необхідність контролю якості [23]. Доступність SCM може обмежуватись регіональними факторами – наявністю галузей, які виробляють ці побічні продукти. Крім цього, склад та якість SCM може змінюватись залежно від

джерела і процесу виробництва, що впливає на продуктивність та консистенцію отриманого бетону.

Такі SCM, як зола винесення і мелений гранульований доменний шлак, призводять до повільнішого набору міцності бетону порівняно із сумішами, що містять тільки портландцемент. Це викликає занепокоєння у проектах, де швидкий розвиток міцності бетону має вирішальне значення. Проте цей недолік можна зменшити шляхом оптимізації конструкції бетонної суміші і використання хімічних домішок, що прискорюють розвиток міцності. В деяких регіонах використання певних SCM є предметом нормативних обмежень, особливо коли йдеться про використання відходів чи промислових побічних продуктів. Перед їхнім використанням в бетонних конструкціях може знадобитись відповідність суворим стандартам. Це створює додаткові труднощі будівельних проектів, оскільки потрібне додаткове тестування, документація і погодження відповідних органів.

Використання місцевих матеріалів в бетонному будівництві є ще одним підходом, що сприяє зниженню впливу на довкілля [23]. З допомогою місцевого постачання матеріалів можливо зменшити викиди, пов'язані із транспортуванням та споживання енергії. Також місцеві матеріали часто мають унікальні властивості, котрі підвищують ефективність та довговічність бетонних конструкцій [23]. Приклади місцевих матеріалів – це вапняковий кальцинований глиняний цемент, що може частково замінити звичайний цемент, природні волокна чи заповнювачі, які використовують для створення більш стійких економічно ефективних бетонних сумішей [23].

Альтернативні в'язучі речовини є важливим аспектом технологій зеленого бетону і пропонують потенціал зменшення впливу виробництва бетону на довкілля шляхом заміни чи доповнення традиційного портланд-цементу. Так як на виробництво цементу припадає вагома частина викидів вуглекислого газу будівельного сектору, використання альтернативних в'язучих сприяє більш екологічному виробництву бетону. Альтернативні в'язучі речовини поділяють на різні типи на основі складу.

Проникний або пористий бетон – це тип бетону, розроблений так, щоб вода проходила крізь його структуру [24] і зменшувала зливовий стік та сприяла поповненню ґрунтових вод. Цей інноваційний матеріал відіграє вирішальну роль в сталому міському розвитку, пом'якшує наслідки міських теплових островів, знижує ризики затоплення і покращує якість води [24]. Водопроникний бетон має переваги з точки зору зниження витрат на будівництво і вимог обслуговування, оскільки не буде потреби в системах зливів: жолобів, дренажу, резервуарів.

Водопроникний бетон потребує мінімум догляду порівняно із традиційними непроникними тротуарами, тому що усуває потребу в дренажних системах зливів, таких як бордюри, жолоби тощо. Це знижує витрати на технічне обслуговування і знижує довгострокові витрати власників нерухомості і муніципалітетів.

Існують також проблеми та обмеження водопроникного бетону. Через його високу пористість та меншу міцність порівняно із звичайним бетоном, він може бути непридатний для великих навантажень або для місць з великою інтенсивністю руху, однак добре підходить для місць із низьким рівнем руху: стоянок, тротуарів, житлових вулиць тощо.

Холодний бетон є стійким матеріалом, що призначений для зменшення впливу бетонних конструкцій на довкілля [24]. Цей бетон включає світловідбиваючі компоненти чи компоненти світлого кольору, що допомагають мінімізувати поглинання тепла і знижують температуру поверхні бетонних конструкцій. Так охолоджений бетон сприяє зниженню ефекту міського теплового острова Urban Heat Island, УНІ: сприяє охолодженню через випаровування і зменшення тепла, що поглинається асфальтовими поверхнями, і зменшує споживання енергії будівлями з метою охолодження [24, 25].

Холодний – це інноваційна технологія бетонного будівництва [26, 27], спрямована на зменшення ефекту УНІ шляхом включення матеріалів із високим коефіцієнтом відбиття сонячного світла до бетонної суміші або

покриття поверхні. Цей бетон відбиває більшу частину сонячного, що призводить до нижчої температури поверхні порівняно із традиційним бетоном. Холодний бетон знижує ефект УНІ, сприяє створенню більш комфортного міського середовища, допомагає зменшити споживання енергії для охолодження будівель.

Знижена температура поверхні холодного бетону продовжує термін служби тротуару, знижує температуру стоку дощової води, що захищає водні екосистеми від теплового забруднення і покращує якість міських водойм.

Існують обмеження використання холодного бетону, такі як економічна недоцільність [26]. Вибір матеріалів з високим коефіцієнтом відбиття буває обмеженим, а деякі матеріали із високим альбедо не забезпечують такої міцності, як традиційний бетон [27]. Потрібні подальші дослідження з розробки відповідних матеріалів з високим альбедо, які відповідають критеріям ефективності і стійкості.

Надвисокоефективний бетон Ultra-High Performance Concrete, УНРС – це високотехнологічний армований волокнами цементний композит, що має виняткові механічні властивості, покращену вогнестійкість і довговічність [29]. Підвищена довговічність УНРС продовжує термін служби бетонних конструкцій, зменшує потреби в технічному обслуговуванні, ремонті та заміні [27], покращує енергоефективність, теплоефективність будівель завдяки високій міцності та низькій проникності.

Такі властивості роблять УНРС привабливим матеріалом для будівництва, наприклад, мостів. Підвищена довговічність УНРС допомагає продовжити термін служби бетонних конструкцій, зменшує потреби в технічному обслуговуванні, ремонті і можливій заміні [29]. Це сприяє зменшенню споживання сировини, енергії, викидів, пов'язаних з бетонним будівництвом в довгостроковій перспективі.

Універсальність і адаптивність УНРС сприяють його потенціалу як стійкого будівельного матеріалу. Матеріал адаптують відповідно до конкретних застосувань і вимог щодо продуктивності [26]. УНРС

використовують в поєднанні з іншими матеріалами: переробленими заповнювачами, додатковими цементними матеріалами, натуральними волокнами, для створення гібридних матеріалів з покращеними властивостями і зменшеним впливом на довкілля [26].

Незважаючи на численні переваги УНРС, слід подолати низку проблем, щоб повністю реалізувати його потенціал як стійкого будівельного матеріалу. Висока вартість УНРС в порівнянні з традиційним бетоном є значною перешкодою для широкого впровадження УНРС. Вартість УНРС загалом визначається його складним складом, що включає спеціалізовані волокна, домішки і дрібні агрегати [27].

Електрифікація обладнання і транспортування бетонних конструкцій допомагає зменшити залежність від викопного палива, зменшити викиди і шумове забруднення [28]. Цьому сприяють досягнення у технологіях акумуляторів, електродвигунів та інфраструктури заряджання [28]. Фазовозмінні матеріали включають в бетон для накопичення і виділення теплової енергії, що покращує теплові характеристики конструкцій і зменшує споживання енергії на опалення й охолодження [27].

Технології захоплення, утилізації і зберігання вуглецю суттєво скорочують його викиди, пов'язані з виробництвом цементу і бетону [28]. Вловлюючи вуглекислий газ, що виділяється під час виробництва, і використовуючи його для виробництва нових матеріалів чи постійно зберігаючи в геологічних формаціях, ці технології допомагають знизити вплив бетонної промисловості на клімат [27, 28].

Основні напрямки електрифікації залізобетонного виробництва. Одним з них є електробудівельне обладнання, яке полягає в використанні електричних бетономішалок, насосів, екскаваторів, що значно знижує рівень викидів, шуму, вібрацій на будівельних майданчиках. Такі машини із електричним приводом працюють екологічніше, ефективніше і тихіше порівняно з дизельними аналогами.

Потрібна заміна звичайних транспортних засобів з дизельними двигунами на електричні вантажівки і фургони для транспортування матеріалів, логістики та переміщення персоналу. Це сприяє зменшенню викидів та покращенню якості повітря. Електромобілі також виграють за рахунок нижчих експлуатаційних витрат від зменшеного споживання палива та вимог до обслуговування.

Удосконалення і розробка технологій ефективних і довговічних акумуляторів дозволяє електричному обладнанню і транспортним засобам працювати на протязі тривалого періоду часу без підзаряджання.

Поєднання електрообладнання і транспортних засобів з відновлюваними джерелами енергії – сонячною, вітровою, ще більш оптимізує методи бетонного будівництва, мінімізує залежність від викопного палива і зменшує вуглецевий слід будівельної діяльності.

Проте існують певні проблеми, пов'язані з електрифікацією транспортних засобів і обладнання у виробництві залізобетонних конструкцій. Початкова вартість електричного обладнання і транспортних засобів є вищою, ніж їхніх дизельних аналогів, що є перешкодою для невеличких будівельних компаній та для проектів з обмеженим бюджетом. Доступність інфраструктури заряджання, особливо для віддалених будівельних майданчиків, може бути обмеженою, що ускладнює ефективне впровадження електрифікації [28].

Електричне обладнання і транспортні засоби мають менший радіус дії і довший час заряджання порівняно з дизельними альтернативами, що впливає на продуктивність та робочий графік на будівельних майданчиках. Оскільки електричне обладнання і транспортні засоби є відносно новими в промисловості залізобетонних конструкцій, виникає занепокоєння щодо їхньої надійності, продуктивності і довговічності порівняно з добре зарекомендованими дизельними варіантами. Для подолання цих викликів постійні дослідження, розробки й інвестиції в електричне обладнання і транспортні засоби, удосконалення технологій акумуляторів та

інфраструктури заряджання мають вирішальне значення. Уряди країн та зацікавлені сторони галузі можуть підтримати перехід до залізобетонної галузі до електрифікації, надаючи підтримку, субсидії, політичні рамки, які заохочують використання електричного обладнання і транспортних засобів в залізобетонній галузі.

Ще однією з зелених технологій є підвищення міцності і довговічності залізобетонних конструкцій. Залізобетонна промисловість вивчає інноваційні технології і практики для підвищення стійкості, продуктивності й ефективності конструкцій. Використання нових технологій має вирішальне значення для постійних зусиль промисловості зменшення впливу на навколишнє середовище і підвищення екологічності архітектурного середовища.

Надрукований на 3D-принтері залізобетон – це інноваційна технологія і практика бетонного будівництва, яка включає застосування керованих комп'ютером роботизованих систем з нанесенням шарів бетонного матеріалу з дотриманням попередньо визначеного цифрового дизайну з метою створення структурних компонентів і навіть цілих будівель. Ця технологія відома також як цифрове виготовлення або адитивне виробництво, і має потенціал революціонізації будівельної галузі, пропонуючи низку переваг з точки зору ефективності, налаштування і сталого розвитку [32].

Так, в надрукованому на 3D-принтері бетоні використовують адитивні технології виробництва з метою створення складних структурних компонентів із точністю й ефективністю, що призводить до зниження використання матеріалів та утворення відходів [29]. 3D-друк дозволяє створювати унікальну геометрію залізобетонних конструкцій, яких було б важко досягти за допомогою традиційних методів [28].

3D-друк залізобетонних конструкцій має потенціал значного скорочення часу будівництва порівняно із традиційними методами, оскільки дозволяє виготовляти кілька компонентів чи структур одночасно [32]. Технологія 3D-друку зменшує потребу ручної праці та виготовлення

опалубки, сприяє підвищенню продуктивності і зниженню витрат на послуги робочої сили. 3D-друк дає можливість створювати складні і заплутані геометричні форми будівель, яких важко чи неможливо досягти традиційними методами будівництва. Це забезпечує значну свободу проектування і потенціал щодо інноваційних архітектурних проектів, які оптимізують конструктивні характеристики продукції та використання матеріалів.

3D-друк мінімізує матеріальні відходи шляхом відкладання бетону лише там, де це необхідно, і зменшує споживання сировини й утворення будівельного сміття [32]. 3D-друк також дає змогу використовувати оптимізовані легкі конструкції, котрі можуть зменшити загальну кількість матеріалів, необхідних для досягнення бажаних будівельних і структурних характеристик.

Зменшені споживання матеріалів і утворення відходів, зниження потреб у робочій силі, пов'язані з можливостями 3D-друку залізобетонних конструкцій, сприяють сталому розвитку будівельної галузі. Крім того, ця технологія потенційно сприяє інтеграції перероблених матеріалів чи нових, екологічно чистих матеріалів в бетонні суміші, ще більш покращуючи екологічні характеристики залізобетонних конструкцій.

Проблеми й обмеження, пов'язані із 3D-друкованим бетоном, зазвичай стосуються технологічних та матеріальних аспектів. Розробка і вдосконалення систем 3D-друку, матеріалів та процесів для залізобетонних конструкцій тривають [32]. Щоб повністю реалізувати потенціал технології 3D-друку необхідні подальші досягнення у галузі таких сфер, як швидкість друку, роботизовані системи, дизайн бетонної суміші і процеси затвердіння.

Запровадження 3D-друкованого бетону у будівельну галузь вимагає розробки нових стандартів, нормативів, вказівок для забезпечення якості, безпеки і довговічності залізобетонних конструкцій. Перехід до цифрового виробництва й автоматизації також вимагає перепідготовки і підвищення кваліфікації будівельників для адаптації їх до нових технологій, інструментів

та практики. Хоча 3D-друк залізобетонних конструкцій має потенціал скорочення витрат на робочу силу і матеріали у довгостроковій перспективі, початкові інвестиції в обладнання й технології є значними.

Оскільки дослідження і розробки в цій сфері тривають, очікується, що надрукований на 3D-принтері залізобетон буде важливою технологією і практикою в залізобетонному будівництві і запропонує нові можливості для сталого розвитку.

Фотокаталітичний бетон містить у своєму складі фотокаталітичні матеріали, котрі розщеплюють забруднювачі й органічні сполуки на бетонній поверхні під дією сонячного світла, покращують якість повітря та сприяють очищенню навколишнього середовища [29]. Фотокаталітичний бетон [33] – це інноваційна технологія і практика в залізобетонному будівництві, що містить фотокаталітичні матеріали, наприклад, діоксид титану TiO_2 , в бетонній суміші чи покритті поверхні.

Під впливом сонячного чи УФ випромінювання такі матеріали утворюють активні форми кисню, які розщеплюють різні забруднювачі, а саме, оксиди азоту NO_x , леткі органічні сполуки та тверді частинки. Така властивість фотокаталітичного бетону до самоочищення й очищення повітря сприяє покращенню якості повітря особливо в міському середовищі.

Фотокаталітичний бетон може покращує якість міського повітря через зниження концентрації забруднювачів повітря – оксидів азоту, летких органічних сполук, твердих частинок, що шкідливі для здоров'я людей і стану довкілля [32]. Впровадження такої зеленої технології в результаті дає чистіше повітря, зменшений рівень смогу, поліпшення екологічного стану міст.

Фотокаталітичні реакції руйнувати шкідливі органічні речовини – водорості, цвіль, бруд поверхні залізобетону. Така властивість самоочищення залізобетонних конструкцій допомагає зберегти зовнішній та естетичний вигляд бетонних конструкцій, зменшує потребу регулярного очищення й обслуговування.

Фотокаталітичні реакції, крім переліченого вище, допомагають розщепити запашні сполуки – аміак, сульфіді, і зменшують неприємні запахи навколо залізобетонних конструкцій [33]. Це дуже важливо в міських районах, а також поблизу станцій переробки відходів чи в промислових умовах, де неприємні запахи негативно впливають на якість життя місцевих мешканців. Шляхом розщеплення забруднювачів та органічних речовин на поверхнях залізобетонних конструкцій, фотокаталітичний залізобетон збільшує їхню довговічність, оскільки забруднювачі й органічні речовини можуть сприяють деградації і знебарвленню бетону в часі. Зниження цих факторів, продовжує загальний термін служби залізобетонних конструкцій.

Незважаючи на переваги, фотокаталітичний залізобетон має певні проблеми й обмеження. Використання фотокаталітичних матеріалів, а саме, діоксиду титану, призводить до більшої собівартості залізобетонних конструкцій порівняно з традиційними [32]. Проте довгострокові переваги чистого повітря, мінімізації обслуговування компенсують початкові значні інвестиції у виробництво залізобетону.

Фотокаталітичні реакції потребують наявності сонячного світла чи ультрафіолетового випромінювання для утворення активної форми кисню. Ефективність фотокаталітичного залізобетону знижується в періоди слабкого освітлення – вночі або у хмарні дні, чи в затінених місцях. Це обмежує загальне виробництво фотокаталітичного залізобетону в деяких сферах.

Вибір фотокаталітичних матеріалів і їхнє оптимальне введення у склад залізобетонних сумішей чи покриттів поверхонь є складним завданням. Такі фактори, як розміри частинок, їхні розподіл та концентрація, значно впливають на характеристики фотокаталітичного залізобетону [31].

Потрібні подальші дослідження і розробки з метою визначення й оптимізації відповідних фотокаталітичних матеріалів та складів, що відповідають як вимогам ефективності, так і вимогам стійкості різних видів будівель. Хоча фотокаталітичний залізобетон сумарно сприяє покращенню якості повітря, але активні форми кисню, які утворюються при

фотокаталітичних реакціях, також утворюють вторинні забруднюючі речовини чи завдають шкоди навколишнім матеріалам чи екосистемам. Потрібні подальші дослідження для кращого розуміння впливу фотокаталітичного залізобетону на навколишнє середовище.

Ізольовані бетонні форми поєднують у собі структурну міцність залізобетону та енергоефективність високоефективних ізоляційних матеріалів, що дає економію енергії і підвищення теплого комфорту всередині будівель [30]. Паливо, яке отримане з відходів, таке як біомаса чи промислові відходи, можливо використовувати для заміщення традиційного викопного палива для виробництва цементу і зменшувати викиди парникових газів і загальний вуглецевий слід залізобетонних конструкцій [30].

Ізольовані бетонні форми – це інноваційна технологія і практика залізобетонного будівництва, що передбачає використання з'єднаних між собою легких пінопластових форм з метою створення безперервного шару ізоляції монолітних бетонних стін.

Після заливки і затвердіння залізобетону пінопласт залишають на місці, чим забезпечують високоенергоефективну і довговічну оболонку будівлі. Ізольовані бетонні форми набули популярності у житловому і комерційному будівництві завдяки їхнім численним перевагам перед традиційними методами будівництва. Стіни ізольованих бетонних форм забезпечують високий рівень теплоізоляції. Це значно зменшує навантаження на опалення й охолодження в будівлях [32] і дає знижене споживання енергії, скорочення викидів парникових газів, економії коштів для мешканців будівель. Комбінація ізоляції з бетону і пінопласту створює міцну монолітну стінову систему, що здатна протистояти суворим погодним умовам, а також ураганам та торнадо та пошкодженням від землетрусів.

Стіни, побудовані з ізольованих бетонних форм, можуть ефективно зменшують передачу зовнішніх шумів, забезпечують більш тихе середовище у приміщеннях та покращують комфорт мешканців [33]. Ізольовані бетонні форми відносно легко і швидко встановлюються, що дає скорочення часу

будівництва і зниження витрат на робочу силу порівняно із традиційними методами будівництва. Бетонне ядро стін з ізолюваних бетонних форм забезпечує високу вогнестійкість, знижує ризик поширення вогню між кімнатами чи сусідніми будівлями.

Початкова вартість будівництва з ізолюваних бетонних форм бути вища, ніж традиційні методи будівництва через додаткові витрати на пінопластові форми і спеціальні методи встановлення [33]. Однак довгострокові переваги економії енергії та знижені витрати на обслуговування компенсують такі початкові інвестиції.

Хоча будівництво ізолюваних бетонних форм може відбуватися за різноманітними архітектурними стилями, деякі складні конструкції чи нетрадиційні форми є більш складні чи дорогі порівняно із традиційними методами будівництва. Це вимагає додаткового планування і координації між командою проектувальників та групою будівельників для гарантування, що бажані архітектурні особливості сумісні із будівництвом на основі ізолюваних бетонних форм. Будівництво на основі ізолюваних бетонних форм вимагає спеціальної підготовки і навичок для належного встановлення конструкцій, що може бути доступним не в усіх регіонах. Таким чином, вартість робочої сили може бути високою або можуть бути обмеження наявності кваліфікованих підрядників.

Ізолювані бетонні форми стають все більш важливими технологіями в залізобетонному будівництві, пропонують нові можливості енерго-ефективного і гнучкого проектування будівель. Подальший прогрес в матеріалознавстві, виробничих процесах та методах будівництва дасть змогу покращення продуктивності, економічності й універсальності систем на основі ізолюваних бетонних форм. Крім того, інтеграція будівництва на основі ізолюваних бетонних форм з іншими екологічними методами, наприклад, використанням перероблених матеріалів чи відновлюваних джерел енергії, здатні покращити загальну екологічну ефективність залізобетонних конструкцій.

Інноваційним рішенням є бетон, що самовідновлюється. До його складу якого входять матеріали чи агенти, що дозволяють бетону самовідновлюватись після пошкодження [30]. Ця технологія подовжує термін служби конструкцій, знижує вимоги до обслуговування і мінімізує потребу в ресурсомісних ремонтах [29].

Самовідновлюваний бетон є інноваційною технологією та практикою в залізобетонному будівництві, які мають потенціал підвищення продуктивності і довговічності залізобетонних конструкцій. Ця технологія заснована на концепції, яка дозволяє бетону самостійно відновлювати тріщини і пошкодження, що подовжує термін служби залізобетонних конструкцій і зменшує потребу в обслуговуванні та ремонті.

Самовідновлюваний бетон подовжує термін служби залізобетонних конструкцій шляхом автономного лікування тріщин та пошкоджень, знижує ризики корозії та інших механізмів погіршення стану конструкцій. Це зводить до мінімуму потребу ручних перевірок, технічного обслуговування та ремонту. Бетон, що самовідновлюється, може дає значну економію коштів протягом усього терміну служби залізобетонних конструкцій. Подовження терміну служби залізобетонних конструкцій та зменшення потреби їхнього технічного обслуговування та ремонту сприяють зменшенню споживання ресурсів, утворенню відходів і загального впливу на навколишнє середовище.

Є декілька підходів до здатності бетону самовідновлюватися [31]. Бактеріальне самовідновлення: цей підхід передбачає включення до бетонної суміші певних штамів бактерій та поживних речовин. Коли в бетоні утворюються тріщини, бактерії активізуються в присутності вологи і починають виробляти карбонат кальцію як побічний продукт метаболічних процесів. Карбонат кальцію заповнює тріщини та відновлює структурну цілісність бетону. Цей метод показав високі результати у лабораторних умовах і є перспективним для підвищення довговічності і стійкості залізобетонних конструкцій.

Метод мікрокапсульованих відновних засобів: у ньому речовини, які відновлюють бетон – це полімерні матеріали або сполуки на мінеральній основі. Вони інкапсульовані у невеликі капсули чи трубки і включені до складу бетонної суміші. Коли в бетоні утворюються тріщини, капсули розриваються і вивільняють відновні речовини, котрі потім заповнюють та заклеюють тріщини. Відновні речовини тверднуть під час хімічних реакцій або на повітрі і таким чином відновлюють структурну цілісність бетону.

Для лікування тріщин залізобетонних конструкцій також застосовують полімери з пам'яттю форми. Це такі полімери, що можуть повернутись до своєї початкової форми після деформацій, тобто мають здатність до тиксотропного відновлення своєї структури як правило, під впливом тепла чи інших зовнішніх чинників. Використовують полімери з пам'яттю форми у вигляді волокон або ж вбудованих армуючих елементів. Бетон проектується таким чином, щоб могли відновлюватися від деформацій або закривалися невеликі тріщини, що утворюються унаслідок прикладених навантажень чи факторів довкілля. Механізм самовідновлення залізобетонних конструкцій може зберегти цілісність та довговічність конструкцій в часі.

Іншим методом відновлення бетону є внутрішнє самовідновлення. При цьому сама бетонна суміш самовідновлюється. Такого ефекту можна досягти шляхом регулювання пропорцій суміші або використання спеціальних домішок для створення середовища, що сприяє утворенню карбонату кальцію чи інших мінералів, котрі можуть заповнювати і герметизувати тріщини природним шляхом. Цей тип самовідновлення подекуди менш ефективний, ніж попередні підходи, але все одно сприяє підвищенню загальної довговічності залізобетонних конструкцій.

Суперадсорбентні полімери є матеріалами, що мають високу адсорбційну здатність, і можуть утримувати та вивільняти великі кількості води відносно їхньої маси. Суперадсорбентні полімери складаються зі зшитої полімерної мережі, здебільшого отриманої з акрилової кислоти чи інших подібних мономерів. Суперадсорбентні полімери мають широкий спектр

застосування у різних галузях промисловості, таких як сільське господарство, виробництво засобів гігієни, будівництво.

У контексті залізобетонного будівництва суперадсорбентні полімери привернули увагу завдяки здатності покращувати характеристики і довговічність бетону. При додаванні до бетонної суміші суперадсорбентних полімерів, вони поглинають воду і набрякають, з утворенням внутрішніх резервуарів води усередині бетону.

Ці резервуари допомагають підтримувати сталу вологість бетону, знижують проблеми усадки та розтріскування, спричинених надмірною втратою води під час процесу твердіння залізобетону. Суперадсорбентні полімери сприяють самовідновленню бетону шляхом вивільнення поглиненої води при утворенні мікротріщин. Вивільнена вода сприяє гідратації часток цементу, які ще не прореагували. Це призводить до утворення кальцій-силікат-гідратних гелів, що можуть частково чи повністю заліковувати тріщини і відновлювати структурну цілісність залізобетону.

Незважаючи на багатообіцяючі переваги, ще досі існують певні проблеми й обмеження, що пов'язані з технологіями самовідновлення залізобетону, такі як масштабування лабораторних успіхів до промислових застосувань, довгострокова продуктивність, надійність механізмів самовідновлення, збільшення початкового рівня витрат на впровадження цих технологій. Подальші дослідження і розробки, більш повномасштабні і польові демонстрації мають вирішальне значення в подоланні цих викликів та в реалізації повного потенціалу самовідновлюваного бетону у будівельній галузі [31].

2 ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У ході виконання даного дослідження були проведені дослідження залізобетонних зразків на основі портландцементу та альтернативний зразок. Для отримання достовірних експериментальних даних було застосовано сучасні методи дослідження, які відповідають вимогам чинних державних стандартів [34, 35].

Отримані експериментальні дані були оброблені за допомогою ліцензійного програмного забезпечення Microsoft 365 з використанням методів математичної статистики, що відповідають вимогам ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 [36]. Для забезпечення високої точності результатів було проведено статистичний аналіз даних. Було застосовано критерії Стюдента, Пірсона χ^2 та Фішера для оцінки довірчих інтервалів, дисперсій та порівняння різних вибірок відповідно.

Для виявлення статистично значущого впливу різних факторів на властивості зразків залізобетону було проведено дисперсійний аналіз. Порівняння розрахованих та табличних значень F-критерію дозволило визначити наявність або відсутність статистично значущих відмінностей між отриманими результатами [37].

2.1 Матеріали, використані в роботі

У цій кваліфікаційній роботі ми досліджували залізобетонні вироби, головним складовим компонентом яких був бетон. Бетон характеризується класом та маркою. Клас бетону має позначку "В" і цифру. Цифра біля літери "В" означає тиск P , МПа, який витримує бетон. Марка бетону має позначку "М" і цифру, що показує міцність на стиснення P , кгс/см², як ми бачимо, клас і марка бетону є спорідненими поняттями, але клас бетону має розмірності SI, а марка – несистемні одиниці.

Відповідність класів міцності бетону його маркам згідно із ДСТУ 9177-4:2022 показана в таблиці 2.1 [38].

Таблиця 2.1 – Відповідність класів і марок бетону

Клас	Середня міцність, P , МПа	Середня міцність, P , кгс/см ²	Відповідна марка
В 3,5	3,5	35,69	М 50
В 5	5	50,98	М 75
В 7,5	8	81,57	М 100
В 12	13	130,97	М 150
В 15	19	196,5	М 200
В 20	25	261,9	М 250
В 25	32	327,4	М 350
В 30	38	392,9	М 400
В 35	45	458,4	М 450

У якості предмету дослідження використовували бетон класу / марки В15 / М200, армований залізом. Таким чином, досліджували традиційний залізобетон ТЗБ і Альтернативний залізобетон АЗБ.

ТЗБ містить у своєму складі такі компоненти, як портландцемент, природний пісок і гравій, сталеву арматуру.

АЗБ складається зі шлакового цементу, природного піску, переробленого бетону замість гравію, сталеву арматуру із вторинної сировини.

Портландцемент відповідає стандарту ДСТУ Б В.2.7-88-99 Будівельні матеріали. Портландцементи тампонажні. Технічні умови (ГОСТ 1581-96) [39]. За складом цементу поділяють на типи: І – тампонажний портландцемент без добавок, І-Г – тампонажний портландцемент без добавок з нормованими вимогами за водоцементного відношення 0,44, І-Н —

тампоначний портландцемент без добавок з нормованими вимогами за водоцементного відношення 0,38, II – тампоначний портландцемент з мінеральними добавками, III – тампоначний портландцемент зі спеціальними добавками, що регулюють густину цементного тіста. Склад портландцементу описаний в таблиці 2.2 [39]. В наших дослідженнях використовували цемент типу II у складі ТЗБ.

Таблиця 2.2 – Склад цементів різних типів

Тип цементу	Вміст клінкеру	Вміст добавки	
		Мінеральна добавка	Спеціальна добавка: пуццоланова чи обтяжуюча
I I-G I-N	100	Не припустимо	
II	80–94	6-20*	–
III	30–89	–	11–70
*Добавок осадового походження не більше 10 % маси цементу			

Гравій у ТЗБ мав розміри від 8 мм до 16 мм і густину 683 г/дм^3 і складався з подрібнених частинок граніту. Зразки АЗБ отримали на профільному підприємстві ТОВ "Кам'янець-Подільський комбінат будівельних матеріалів".

2.2 Методи досліджень

Для дослідження складу досліджуваних бетонів використовували метод рентгено-флуоресцентного аналізу (РФА).

РФА являється перспективним методом дослідження і дає можливість провести кількісний та якісний аналіз різних речовин. Перевагою РФА є експресність, мале число ліній рентгенівських спектрів і легкість їхньої

інтерпретації, можливість аналізу твердих і рідких аналітів. Проте РФА має меншу чутливість визначення порівняно з атомно-абсорбційним та спектральним методами аналізу.

РФА застосовують в геології для встановлення складу руд і мінералів, в металургії – для аналізу сплавів, концентратів, флюсів, в хімічній промисловості – для аналізу сировини і готової продукції.

Методи РФА застосовують також для екологічного моніторингу, а саме, аналізу води ґрунтів, повітряних аерозолів тощо.

РФА використовують в наукових дослідженнях, пов'язаних з отриманням нових матеріалів. Метод застосовують для визначення як основних компонентів, так і домішок [40].

РФА належить до рентгеноспектральних методів та підпорядковується принципам, що є спільними для різних груп спектроскопії. В цьому методі первинне рентгенівське випромінювання спрямовують на досліджуваний зразок, тоді частина випромінювання розсіюється за комптонівським і томпсонівським типами самим зразком, частина променів проходить крізь зразок, частина поглинається зразком і призводить до виникнення рентгенівської флуоресценції.

Вторинне рентгенівське випромінювання складається з компонентів, що характерні для хімічних елементів у складі аналіту. Положення й інтенсивність аналітичних ліній, що дають якісний та кількісний аналіз, фіксуються спектрометричною частиною вимірювального приладу.

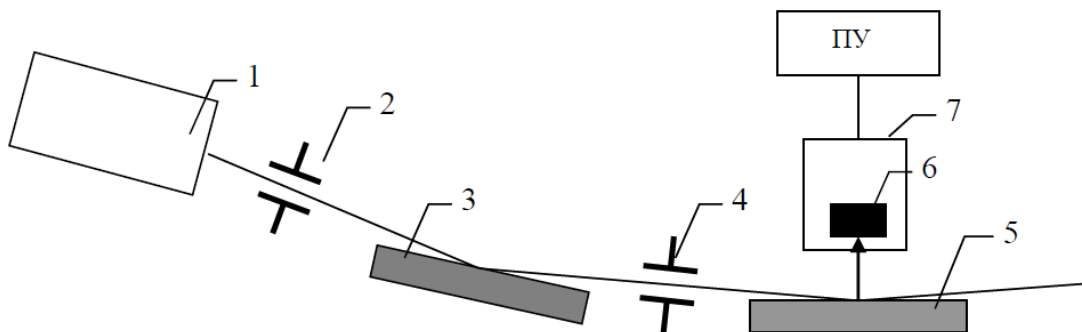
Найбільш сучасні РФА-спектрометри дозволяють визначати будь-які елементи періодичної системи, від карбону.

Межі виявлення більшості елементів становлять $10^{-4} \dots 10^{-2}$ мас. %, максимальна визначувана концентрація може сягати 100 %. РФА має високу відтворюваність аналітичних сигналів і експресність визначень. Можна працювати з твердими, рідкими та порошковими матеріалами [40].

Основними вузлами приладів для проведення РФА є система збудження рентгенівського випромінювання, спектрометрична система для

реєстрації випромінювання аналіту, електронні вузли обробки сигналів детекторів та управління роботою обладнання.

Сучасні РФА-спектрометри поділяють на дві групи, які розрізняються методом відбору і реєстрації аналітичного сигналу. Перша група – це прилади з дисперсією за довжиною хвиль, де флуоресцентне випромінювання аналіту під певним кутом попадає на кристал-аналізатор, де відповідно до дифракції Брегга, відбирається випромінювання заданих довжин хвилі і спрямовується на систему-детектор. Друга група – це спектрометри із дисперсією випромінювання зразка за енергіями: це енергодисперсійні РФА-спектрометри. Вони мають напівпровідникові детектори, що можуть розрізняти енергії квантів рентгенівських променів, які надходять безпосередньо зі зразка [40]. Принципова схема РФА-спектрометра ElvaX показана на рисунку 2.1.



- 1 – рентгенівська трубка; 2, 4 – коліматори; 3, 5 – рефлектори;
 6 – напівпровідниковий детектор; 7 – вакуумна камера;
 ПУ – передпідсилювач [38]

Рисунок 2.1 – Схема РФА-спектрометра ElvaX

Рентгенівську флуоресцентну спектроскопію зразків бетону проводили на спектрометрі ElvaX. Цим методом ідентифікували присутні елементи (якісний аналіз) і їй визначали їхню відносну кількість (кількісний аналіз).

Коли зразок бетону опромінювали рентгенівським випромінюванням, атоми в його складі поглинали енергію і випускали вторинне (флуоресцентне) випромінювання, характерне для кожного елемента. Спектрометр реєстрував це випромінювання і будував спектр, за яким і визначали якісний і кількісний склад зразків.

Спочатку проводили відбір проб. Відбирали репрезентативні проби бетону, які повинні бути однорідними за складом. Підготовлювали поверхню таким чином, щоб вона була чистою і рівною для забезпечення максимальної точності вимірювань. Зразки бетону подрібнювали [41].

В лабораторій практиці подрібнення використовують для одержання однорідної маси твердих речовин та для добору середньої проби. Основні характеристики процесу подрібнення – це зміна дисперсності та ступінь подрібнення. Ступенем подрібнення є відношення середнього розміру шматків вихідного матеріалу до середнього розміру часток подрібненого матеріалу. В залежності від мети подрібнення є: дроблення з одержанням кускового продукту певної крупності та помел зі збільшенням дисперсності твердого матеріалу та наданням частинкам форми. В залежності від кінцевих розмірів продукту є: грубе дроблення (300–100) мм, середнє дроблення (100–25) мм, дрібне (25–1) мм. Також є види помелу від грубого (1000–500) мкм, до надтонкого менш 40 мкм [41].

Тверді речовини подрібнюють механічно чи вручну. Вибір засобів та способу подрібнення визначають механічними властивостями матеріалу та потрібним ступенем дисперсності. Невеликі кількості матеріалів подрібнюють вручну в ступках з різних матеріалів. Розміри ступок обирають відповідно до кількості робочого матеріалу.

Механічне подрібнення проводять у відкритому та закритому циклі з використанням різних приладів: при вільному ударі, розтиранні, роздавлюванні чи їхніх комбінаціях. Машини для подрібнення – це дробарки та млини. Дробарки бувають роторні чи молоткові, конусні, щелепні, валкові. Млини для помелу бувають з вільними або ж закріпленими молотковими

тілами. Лабораторні млини та дробарки сконструйовані відповідно до тих самих принципів, що й промислові установки [41].

Зразки бетону подрібнювали в дробарці до однорідного порошку для забезпечення кращого контакту з рентгенівським випромінюванням. Порошок зразка поміщали в спеціальну кювету і встановлювали в камеру спектрометра ElvaX.

Вибирали умови аналізу, такі як напруга на рентгенівській трубці, фільтри, час вимірювання, які залежать від очікуваного елементного складу зразків. Отриманий спектр обробляли за допомогою спеціального програмного забезпечення ElvaX. Програмне забезпечення ідентифікувало піки, що відповідають різним елементам, і визначило їхню концентрацію на основі калібрувальних кривих.

Для кількісного аналізу проводили калібрування спектрометра за допомогою стандартних зразків з відомим складом. Калібрувальні криві будували шляхом побудови залежності між інтенсивністю флуоресцентного випромінювання і концентрацією елементів у стандартних зразках. Результати аналізу були представлені у вигляді таблиці, в якій вказані елементи, що виявлені в зразку та їхні концентрації.

Крім переваг методу РФА, він має також певні обмеження, такі як неможливість визначення найбільш легких елементів, підготовка зразка до аналізу може бути працемісткою, на результати аналізу можуть впливати матричні ефекти, що пов'язані з хімічним складом зразків.

РФА широко використовують для аналізу бетону, а саме, контролю його якості, визначення відповідності бетону проектним вимогам, досліджень процесів твердіння бетону, вивчення зміни його складу з часом, виявлення дефектів бетону, таких як неоднорідності, включення тощо.

Оскільки одними з найважливіших показників залізобетону є міцність, методами оцінки міцності є Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) та відскок молотка Шмідта – це методи неруйнівного контролю, що використовують для

оцінки міцності бетону в залізобетонних конструкціях. Обидва методи є недеструктивними.

UPV – це метод, який базується на вимірюванні швидкості поширення ультразвукових хвиль через бетон. Принцип роботи полягає в тому, що ультразвуковий імпульс подається в бетон, а потім вимірюється час, за який він проходить певну відстань. Чим вища міцність бетону, тим більша швидкість поширення ультразвуку.

Молоток Шмідта – це прилад, який використовують для визначення міцності бетону за величиною відскоку ударника. Принцип роботи полягає в тому, що ударник з відомою енергією удару вдаряє по поверхні бетону, а потім вимірюється висота відскоку. Висота відскоку залежить від міцності бетону: чим міцніший бетон, тим вища висота відскоку.

Втрату міцності залізобетону при нагріванні можна знайти як функцію температури. На основі тестів з молотком Шмідта зниження твердості бетону до 85 % від початкової вважається початком пошкодження бетону.

Для оцінки якості залізобетонних матеріалів їх випробовували на витривалість під час нагрівання, щоб порівняти ТЗБ і АЗБ після випробувань їх при високих температурах. Досліди проводили шляхом нагрівання у спеціальній печі підприємства ТОВ "Кам'янець-Подільський комбінат будівельних матеріалів" відповідно до міжнародного стандарту (EN 1996-1-2:2005, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1996-1-2:201X [42]. Нагрівання здійснював газовий пальник, нагріваючи невелику площу зразка. Температуру вимірювали екранованою термопарою діаметром 1 мм у різних місцях зразків протягом часу експерименту від 1,5 до двох годин. Будували графіки залежності температура – час. Температуру фіксували в самій печі і температура всередині зразків залізобетону.

Щоб порівняти витривалість зразків після температурного впливу далі їх досліджували з допомогою ультразвукових методів. Для визначення часу проходження ультразвуку були проведені дослідження на необроблених та оброблених нагріванням зразках. Для забезпечення контакту датчика з

залізобетоном використовували контактне желе. Вимірювали відносну швидкість ультразвуку за часом проходження сигналу для різних зразків та відстаней. Вимірювання проводили з допомогою ультразвукового дефектоскопа AU2000 за стандартною методикою ДСТУ Б В.2.7-226:2009 [43].

Для досягнення цілей кваліфікаційної роботи, крім експериментальних досліджень, використовували методи математичного моделювання для встановлення кореляції між складом і показниками якості АЗБ. Реалізація трьохфакторного плану другого порядку [44] дає змогу одержати рівняння регресії. Аналіз рівнянь регресії дає можливість встановлення кореляційної залежності між складом переробленого бетону і його, показниками якості.

Планування повного факторного експерименту враховує всі можливі комбінації заданих факторів на тих рівнях, що були вибрані для досліджень. Кількість необхідних дослідів N , визначають за співвідношенням (2.1):

$$N = n^k, \quad (2.1)$$

де k – кількість факторів, n – кількість рівнів.

Нами був проведений експеримент двох рівнів з усіма можливими комбінаціями трьох факторів, а саме, вмісту шлакового цементу (замість портландцементу) Ц, мас. %; піску П, мас. %; переробленого бетону (замість гравію), мас. %. Отже, кількість дослідів експерименту 2^3 становила 8 [44].

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Дослідження якісного та кількісного складу зразків залізобетону

Хімічний склад матеріалів для виробництва залізобетонних виробів має вирішальне значення для оцінки їхньої екологічної безпеки. Аналіз складу дозволяє виявити шкідливі компоненти, наприклад, йони важких металів чи токсичні сполуки, а також визначити відповідність сировини та матеріалів екологічним стандартам.

Метою наших досліджень є порівняння властивостей ТЗБ і АЗБ, тому були проведенні дослідження кількісного і якісного складу залізобетонних зразків. Склад зразків ТЗБ і АЗБ визначали з допомогою РФА на приладі ElvaX. Результати аналізу ТЗБ показані на рисунках 3.1, 3.2 і в таблиці 3.1. Час експозиції 42 с. На рисунку 3.1. поданий РФА-спектр легких елементів, а на рисунку 3.2 – важких елементів періодичної системи.

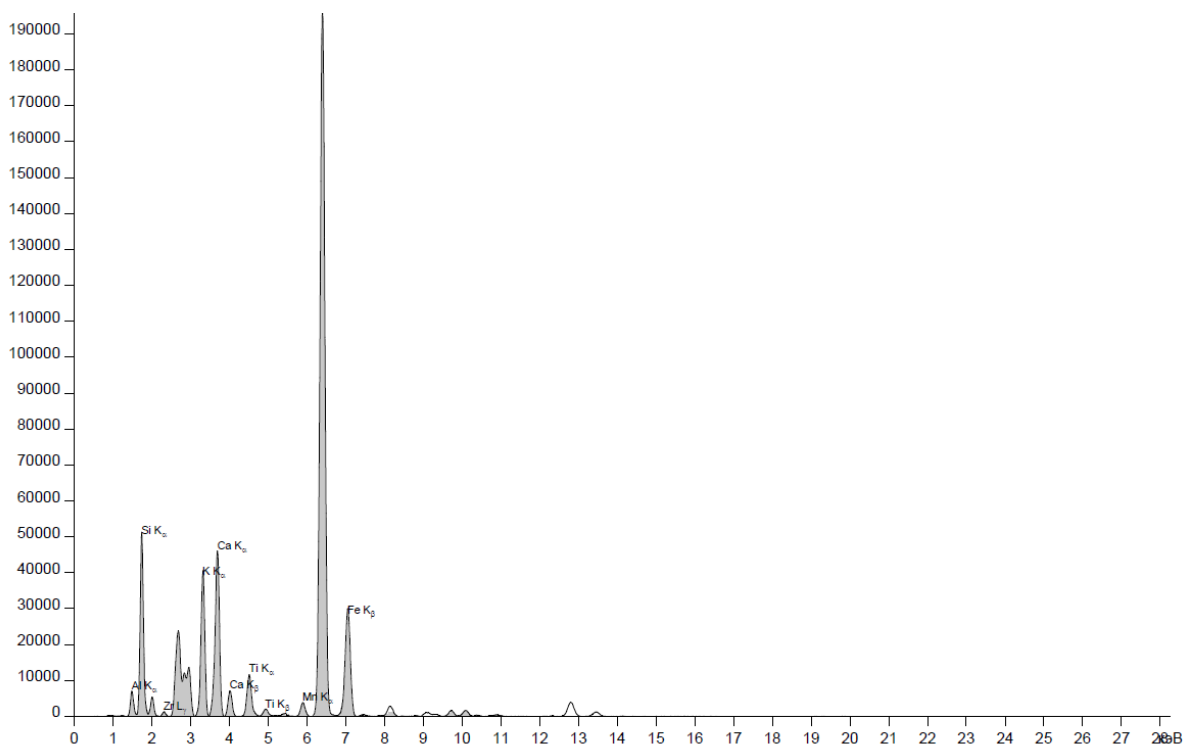


Рисунок 3.1 – РФА-спектр ТЗБ (легкі елементи)

Як ми бачимо залізобетонний зразок містить значну частину феруму 37,1 %, залізо є основним компонентом арматури, яка використовується в залізобетонних конструкціях. Другий за кількістю елемент кальцій 23,9 % є основним компонентом цементу, який використовують для зв'язування інших матеріалів в бетоні. Калій 20,1 % швидше за все, є домішкою в цементі або піску, силіцій 10,0 % є основним компонентом піску, який використовують як заповнювач в бетоні.

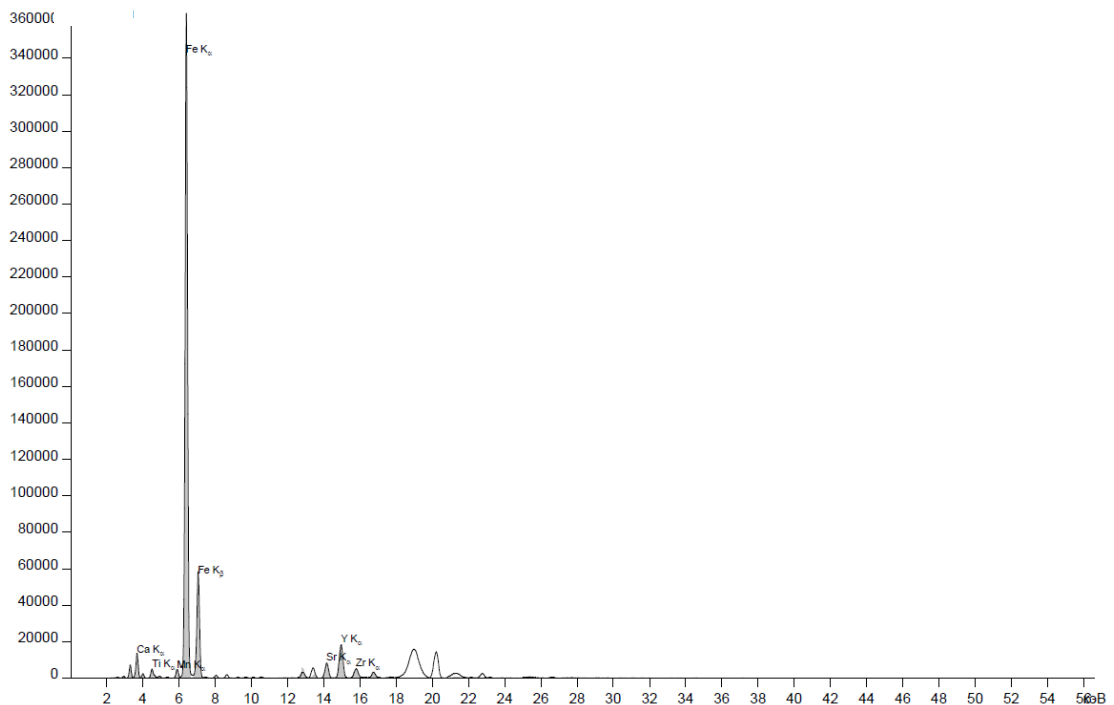


Рисунок 3.2 – РФА-спектр ТЗБ (важкі елементи)

Таблиця 3.1 – Протокол дослідження елементного складу ТЗБ

Атомний номер	Елемент	Серія	Інтенсивність	Концентрація
26	Fe	K	1425089	37.147 ± 0.068%
20	Ca	K	262488	23.861 ± 0.108%
19	K	K	222881	20.125 ± 0.096%
14	Si	K	234477	9.990 ± 0.042%
13	Al	K	29312	3.830 ± 0.058%
22	Ti	K	17644	2.519 ± 0.066%
15	P	K	23634	1.132 ± 0.023%
25	Mn	K	17498	0.698 ± 0.018%
39	Y	K	103059	0.429 ± 0.005%
38	Sr	K	44004	0.173 ± 0.004%
40	Zr	K	24130	0.094 ± 0.005%

Результати аналізу АЗБ показані на рисунках 3.3, 3.4 і в таблиці 3.2. Час експозиції 41 с. На рисунку 3.3 поданий РФА-спектр легких елементів, а на рисунку 3.4 – важких елементів періодичної системи.

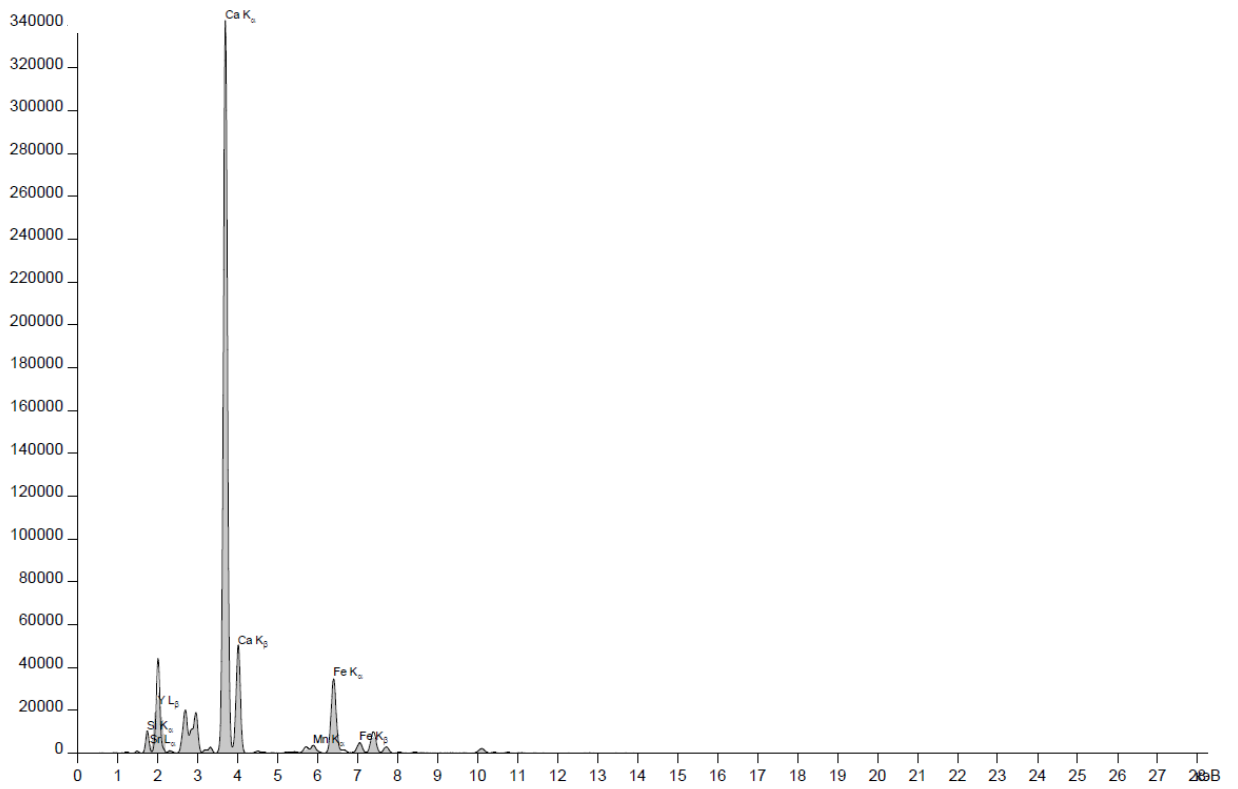


Рисунок 3.3 – РФА-спектр АЗБ (легкі елементи)

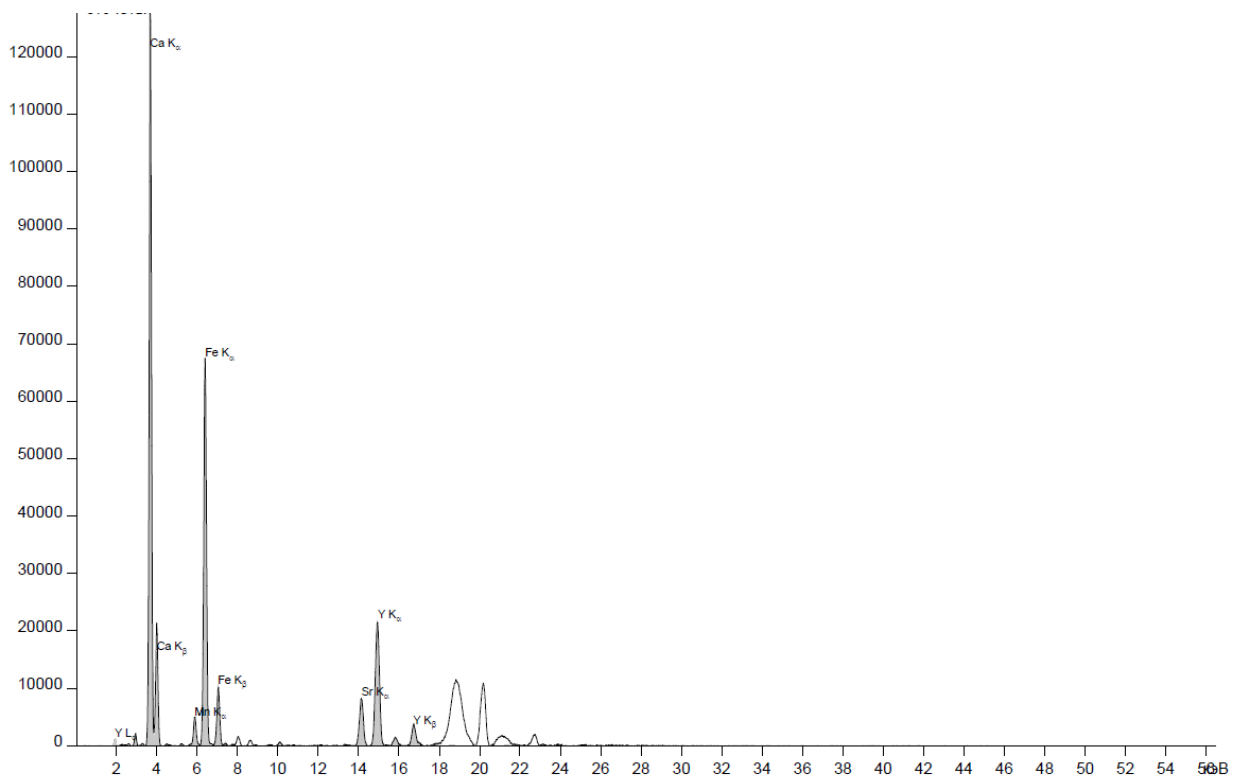


Рисунок 3.4 – РФА-спектр АЗБ (важкі елементи)

Таблиця 3.2 – Протокол дослідження елементного складу АЗБ

Атомний номер	Елемент	Серія	Інтенсивність	Концентрація
20	Ca	K	1944056	91.494 ± 0.056%
26	Fe	K	258031	6.343 ± 0.027%
14	Si	K	42611	1.044 ± 0.014%
25	Mn	K	18997	0.740 ± 0.016%
39	Y	K	123221	0.279 ± 0.003%
38	Sr	K	45050	0.097 ± 0.002%
40	Zr	K	1346	0.003 ± 0.002%

Алюміній 3,8 % може бути присутнім як домішка в цементі або як компонент деяких добавок. Титан 2,5 %, легкий елемент, може міститися у вигляді його діоксиду TiO_2 , який широко використовують як білий пігмент у багатьох галузях, включаючи виробництво бетону, як, наприклад, для поліпшення зовнішнього вигляду бетону, підвищення його стійкості до ультрафіолету, підвищення показника альbedo тощо. У деяких випадках пісок або гравій, що використовуються для виробництва бетону, можуть містити незначні кількості титанових мінералів.

Зразок ТХБ містить також 1,1 % фосфору, який в незначних кількостях входить до складу піску чи гравію, а також 0,7 % мангану, який як домішка чорного металу, швидше за все входить до складу залізного армування.

Ітрій Y, Стронцій Sr, Цирконій Zr зустрічаються рідше в бетоні. Їх присутність може бути пов'язана з особливостями сировини, яка використовувалася для виготовлення бетону, або з забрудненням, найбільш ймовірно, це шуми приладу ElvaX.

Потрібно пам'ятати, що можливості приладу ElvaX обмежені, тому ми можемо бачити на спектрах і в таблицях лише хімічні елементи, починаючи з третього періоду. Такі очікувані елементи, як кисень і карбон, хоча і наявні у будь-яких зразках бетону, проте в даних аналізу відсутні.

РФА зразку АЗБ показав наступне: кальцію найбільший вміст 91,5 %. Це основний компонент цементу, який забезпечує міцність бетону. У цьому зразку є також досить високий вміст заліза 6,3 %, що пов'язано з наявністю арматури в бетоні. Кремній присутній у значній кількості. Це основний

компонент піску, який використовується як заповнювач в бетоні. Марганець може бути домішкою в цементі або піску. Цей зразок бетону так, як і попередній, містить нетипові домішки.

Таким чином, нами був проведений елементний кількісний і якісний РФА зразків ТЗБ і АЗБ. Загалом, спектр АЗБ підтверджує результати аналізу ТЗБ, тобто обидва типи зразків є зразками залізобетону. Однак, є деякі відмінності в кількісному співвідношенні елементів. Це пов'язано з тим, що ТЗБ і АЗБ мають різний склад і різне походження сировини для виготовлення цих виробів. Кількісний і якісний склад АЗБ відповідає стандартам щодо залізобетону і є екологічно безпечним.

3.2. Випробування міцності залізобетонних зразків

Зразки залізобетону ТЗБ і АЗБ досліджували шляхом їхнього нагрівання при високих температурах в печі на підприємстві ТОВ "Кам'янець-Подільський комбінат будівельних матеріалів" за стандартом (EN 1996-1-2:2005, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1996-1-2:201X з метою порівняння їхньої витривалості до дії несприятливих умов. Нагрівання здійснював газовий пальник, нагріваючи невелику площу зразка. Температуру вимірювали екранованою термопарою діаметром 1 мм у різних місцях зразків протягом часу експерименту від 1,5 до двох годин. Будували графіки залежності температура – час. Температуру фіксували в самій печі і всередині зразків залізобетону на різній глибині [42].

Графік зміни температури під час випробувань бетону показаний на рисунку 3.5. А графіки зміни температури під час випробування на глибині (10, 25, 50) мм зразків ТЗБ і АЗБ показані на рисунках 3.6 і 3.7 відповідно.

Після завершення дослідів зразки залізобетону виймали з печі і залишали охолоджуватися до температури навколишнього середовища. Далі необроблені та оброблені зразки тестували ультразвуком з допомогою

приладу AU2000, за стандартною методикою ДСТУ Б В.2.7-226:2009 [43] та як це описано в підрозділі 2.2.

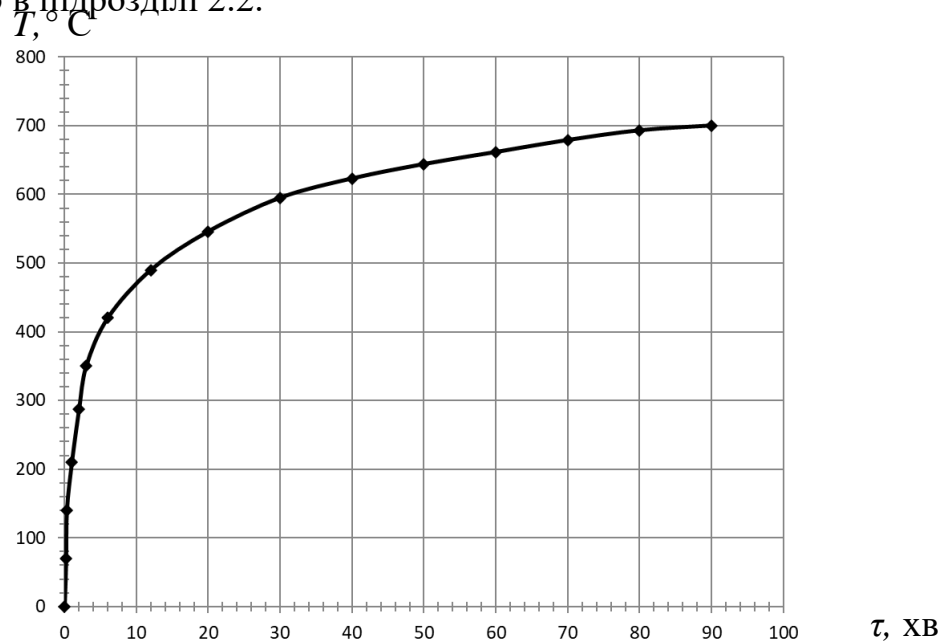
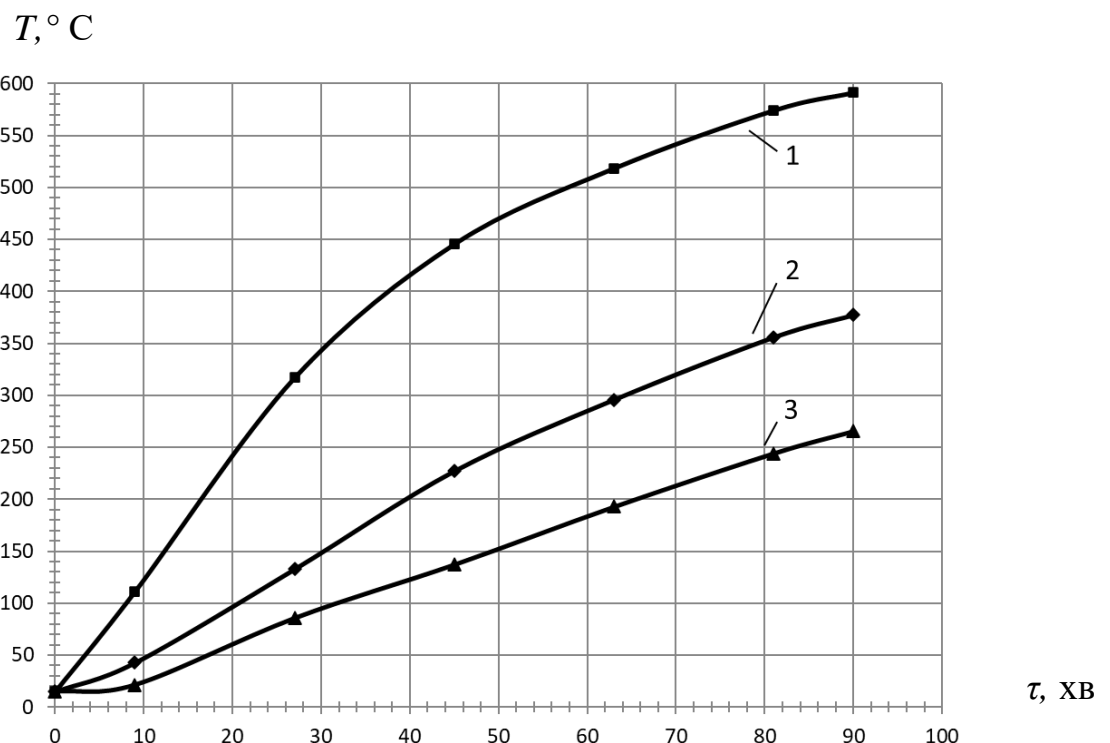


Рисунок 3.5 – Крива температури у печі під час дослідів



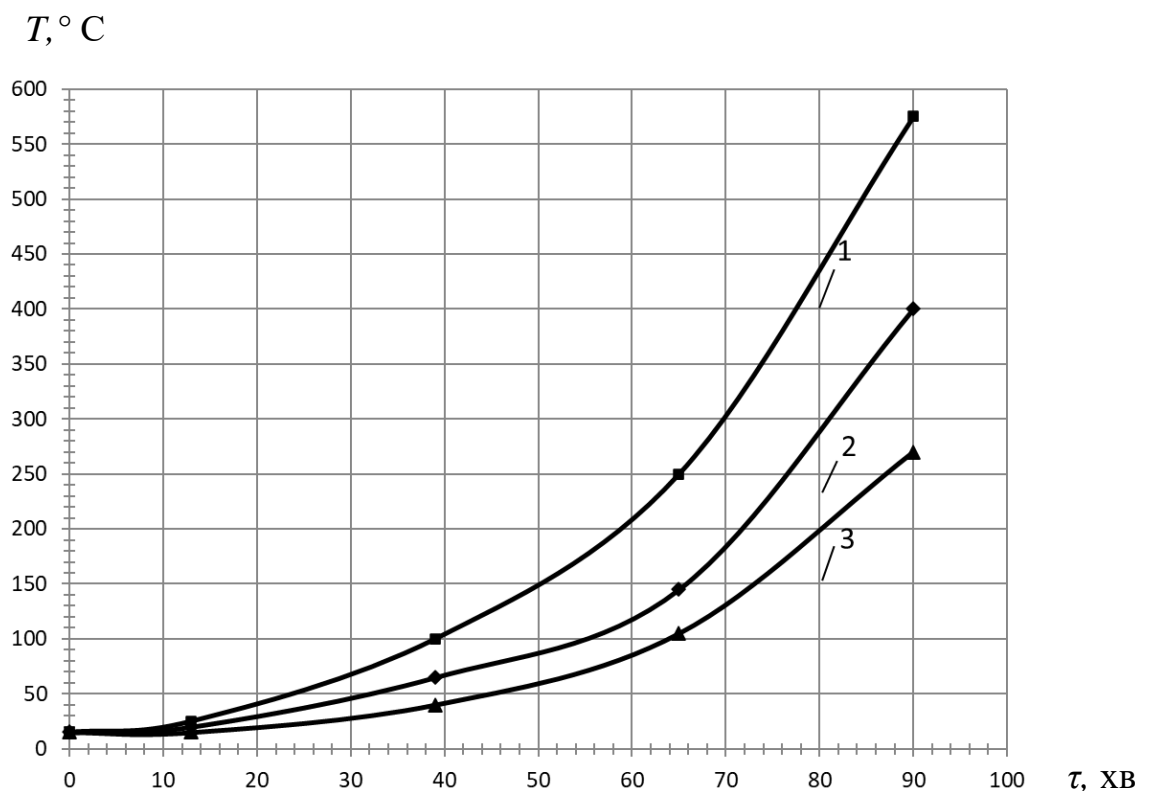
Температура вглибину зразку на: 1 – 10 мм, 2 – 25 мм, 3 – 50 мм

Рисунок 3.6 – Крива зміни температури всередині зразків ТЗБ

Як ми бачимо, температура в нагрівальній печі, що на рисунку 3.5, спочатку стрімко зростає, далі швидкість підвищення температури

зменшується, доки не набуває сталого значення 700 °С. На наступному рисунку 3.6 ми спостерігаємо зміну температури всередині зразку ТЗБ. На кривій 1, яка відповідає глибині температурного датчика 10 мм характер зміни температури з часом практично аналогічний до кривої нагріву печі, тому що глибину бетону 10 мм прогріти не важко. У кінці досліду температура становить 600 °С.

Криві 2 і 3 рисунку 3.6 на своєму початку мають дещо інший характер: перші 10–15 хвилин досліду температура підвищується повільно, далі підвищується швидше і в кінці випробування набуває своїх максимальних значень 370 °С на глибині 25 мм і 260 °С на глибині 50 мм. Перебуваючи під дією такої високої температури, відповідно до даних наукових досліджень, бетон повинен в тій чи іншій мірі втрачати свою міцність, що потрібно визначити в наступних дослідженнях.



Температура вглибину зразку на: 1 – 10 мм, 2 – 25 мм, 3 – 50 мм

Рисунок 3.7 – Крива зміни температури всередині зразків АЗБ

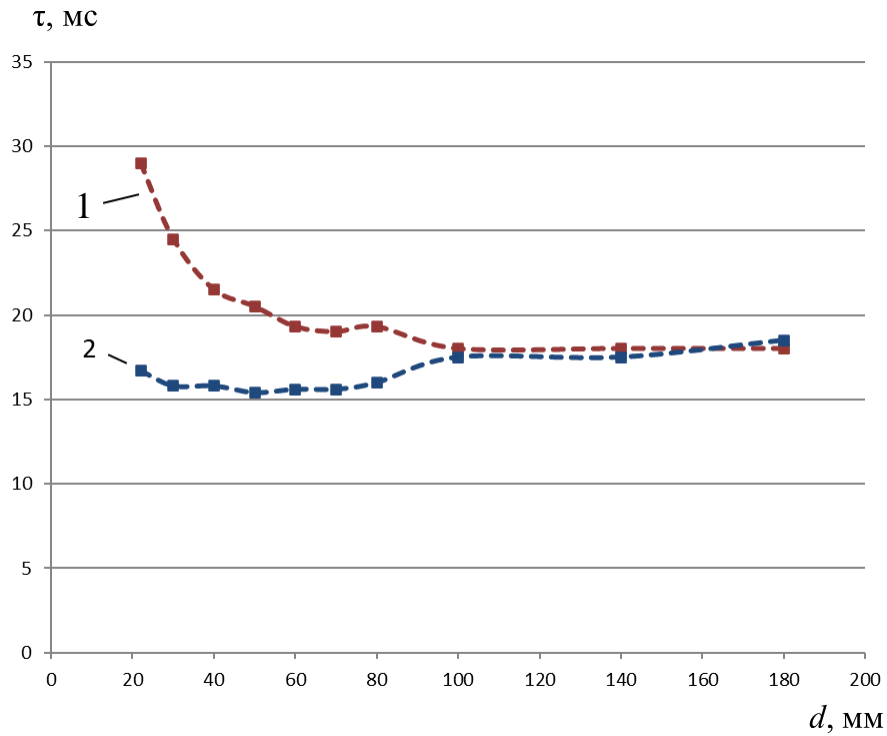
Щодо зразку АЗБ на рисунку 3.7, то характер підвищення температури на усіх трьох кривих є подібним, за початкові приблизно 40 хв температура підвищується повільніше, а до кінця досліду підвищується швидше і досягає своїх максимальних значень у майже у тих самих точках, що і зразок ТЗБ, а саме, на глибині 10 мм 575 °С, 25 мм – 400 °С і 50 мм – 270 °С. Тобто обидва зразки залізобетону нагріваються протягом випробувань у печі до однакових температур, але характер кривих дещо відрізняється через процеси розсіювання тепла в процесі нагрівання і через різний фазовий склад і модуль пружності різних зразків залізобетону.

Після завершення випробуванням температурою зразків ТЗБ і АЗБ потрібно дослідити ці зразки на механічні властивості, щоб зробити висновок про витривалість бетону з перероблених компонентів у порівнянні з ТЗБ. Існують різні методики випробувань на міцність, але нами була вибрана методика досліджень на проходження ультразвуку через простоту виконання.

Чим вища міцність бетону, тим більша швидкість поширення ультразвуку, тому що міцний бетон має більш щільну структуру з меншою кількістю пор та тріщин, що створює більш сприятливе середовище для поширення ультразвукового імпульсу. Міцність бетону тісно пов'язана з його модулем пружності. Чим вищим є модуль пружності, тим швидше ультразвукові хвилі поширюються в матеріалі [45]. Датчиком фіксували час проходження ультразвукових хвиль через зразок, який є обернено пропорційний швидкості, таким чином, чим вища міцність бетону, тим менша тривалість поширення ультразвуку крізь нього. Результати ультразвукових досліджень зразків ТЗБ і АЗБ показані на рисунках 3.8 і 3.9 відповідно.

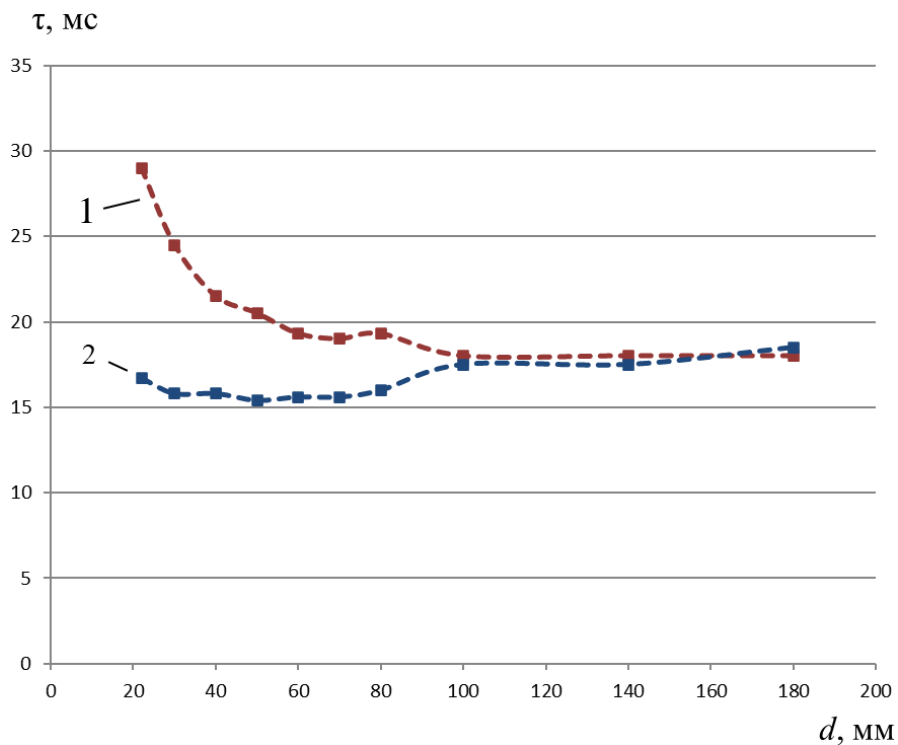
Як ми бачимо, на обох рисунках 3.8 – 3.9, криві необроблених температурою зразків залізобетону проходять нижче, ніж, криві оброблених зразків. Таким чином ми опосередковано спостерігаємо прогнозоване зниження міцності обох зразків бетону після тривалих випробувань високою температурою. Причому ми бачимо, що на тих кривих, що відповідають

необробленим зразком, тривалість проходження імпульсу не залежить від положення датчика і залишається практично сталою.



1 – оброблений зразок, 2 – необроблений зразок

Рисунок 3.8 – Крива тривалості проходження ультразвуку крізь зразок ТЗБ



1 – оброблений зразок, 2 – необроблений зразок

Рисунок 3.9 – Крива тривалості проходження ультразвуку крізь зразок АЗБ

А для оброблених зразків тривалість проходження імпульсу збільшується, що вказує на зменшення міцності і руйнівні процеси всередині них, причому з графіків не видно, щоб зразки АЗБ руйнувалися більш інтенсивно, ніж зразки ТЗБ. Однак, за ультразвуковим тестом чітко видно, що чим глибше в бетоні була виміряна тривалість проходження ультразвуку, тим менше зруйнувався від температури бетон в обох зразках, що корелюється з результатами випробувань, зображеними на рисунках 3.6 – 3.7.

3.3 Оптимізація складу для виробництва залізобетонних конструкцій відповідно до принципів впровадження зелених технологій

У попередніх підрозділах нами були досліджені зразки залізобетону: 1 – ТЗБ, що містить у своєму складі такі компоненти, як портландцемент, природний пісок і гравій, сталеву арматуру, а також 2 – АЗБ, що складається зі шлакового цементу, природного піску, переробленого бетону замість гравію, сталеву арматуру із вторинної сировини. Обидва зразки були отримані на профільному підприємстві ТОВ "Кам'янець-Подільський комбінат будівельних матеріалів".

За даними підприємства виробництво залізобетонних виробів АЗБ є екологічно та технологічно виправданим, оскільки використання перероблених будівельних відходів як альтернативи зменшує обсяги видобутку природних ресурсів на (25–40) %. Використання вторинної сталі дає можливість скоротити енергоспоживання на 60 % та зменшити викиди вуглекислого газу на 50 %. Шлаковий цемент знижує енерговитрати на 20 % без значної втрати міцності і знижує вуглецевий слід бетону на 30 %. Використання переробленого бетону в якості крупного заповнювача забезпечує міцність виробів (85–90) % від ТЗБ.

Екологічні показники ТЗБ і АЗБ показані в таблиці 3.3

Звичайний залізобетон, як правило, не містить у своєму складі шкідливих речовин, а перероблені відходи можуть виявляти підвищений вміст важких металів, але в допустимих межах.

Портландцемент має найвищий показник вуглецевого сліду через енергозатратність виробництва. Заміна його на шлаковий цемент або цемент із летючою золою дозволить зменшити викиди вуглекислого газу на 25–30 % зі збереженням необхідних фізико-механічних показників.

Таблиця 3.3 – Результати екологічних показників залізобетону

Параметр	ТЗБ	АЗБ
Вуглецевий відбиток, кг CO ₂ -екв. / т бетону	350	270
Енерговитрати, кВт год / т бетону	600	470
Викиди шкідливих речовин у воду	Високі	Низькі
Потенціал переробки, %	60	40

Природні заповнювачі бетону пісок і гравій впливають на стан довкілля через видобуток. Використання переробленого бетону дає змогу знизити видобуток природних ресурсів на 40 %, а також і зменшити обсяг будівельних відходів. Сталева арматура із вторинної сировини показала зниження енерговитрат на 50 % порівняно з традиційною.

Визначення хімічного складу АЗБ показало, що перероблені матеріали мають потенціал для екологічно безпечного використання, проте завжди потрібний ретельний контроль складу перероблених матеріалів для запобігання негативному впливу на довкілля через можливий вміст шкідливих речовин.

Потенціал до переробки звичайного бетону, як правило, вищий, ніж бетону, зробленого на основі вторинної сировини. Це пов'язано з тим, що звичайний бетон має більш однорідний склад і містить менше домішок. Однак, сучасні технології дозволяють переробляти навіть бетон з високим

вмістом домішок, хоча це може бути економічно менш вигідно. На потенціал переробки впливає не лише тип бетону, але й якість процесу переробки. Сучасні технології дозволяють отримувати високоякісний вторинний заповнювач навіть з бетонних відходів низької якості.

Призначення вторинного бетону також впливає на вимоги щодо його якості: для виробництва тротуарної плитки можна використовувати матеріали нижчої якості, ніж для виробництва несучих конструкцій.

Вартість переробки бетону повинна бути економічно обґрунтованою.

Для встановлення кореляції між складом і показниками якості АЗБ, а також для оптимізації складу АЗБ ми реалізували трьохфакторний план другого порядку [44] і одержали рівняння регресії. Аналіз цих рівнянь дає можливість встановлення кореляційної залежності між складом переробленого бетону і його, показниками якості, отже і технологічними властивостями, отже можна спрогнозувати оптимальний склад залізобетону із вторинної сировини.

Нами був проведений експеримент двох рівнів з усіма можливими комбінаціями трьох факторів, а саме, вмісту шлакового цементу (замість портландцементу) ШЦ, мас. %; піску П, мас. %; переробленого бетону ПБ (замість гравію), мас. %. Вихідні параметри експерименту чисельно ми визначали із відповідних стандартів на бетони. Матриця планування експерименту і рівні варіювання наведені в таблиці 3.4. Для послаблення впливу випадкових факторів, що повільно змінюються у часі, виконання дослідів був рандомизований у відповідності з таблицею випадкових чисел.

Для визначення показників якості бетону Y_1 – міцності на стиск МС, МПа; Y_2 – число відскоку молотка Шмідта ЧВ; Y_3 – відносна швидкість проходження ультразвуку УЗ, мс^{-1} , застосували методики повнофакторного експерименту, результати якого показані в таблиці 3.5 [44].

Провели статистичну обробку даних [46] з одержанням дисперсії відтворюваності параметрів $S_{\text{відтв}}$, середньоквадратичного відхилення дисперсії відтворюваності $S^2_{\text{відтв}}$, дисперсії відтворюваності коефіцієнтів S_{b_i} ,

мінімального значення коефіцієнтів для визначення його значимості, $b_{i \min}$, що показано в таблиці 3.6. Визначили також число ступенів свободи $f_{\text{вiдмс}}$, що дорівнює 8, виходячи з того, що число дослідів 8, а число рівнів 2 за співвідношеннями (3.1 – 3.3).

Таблиця 3.4 – Матриця планування експерименту

№ дослідю	Значення факторів					
	кодовані			натуральні, мас. %		
	X ₁	X ₂	X ₃	ШЦ	П	ПБ
				X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1	10	30	50
2	-1	-1	+1	10	30	55
3	-1	+1	-1	10	35	50
4	-1	+1	+1	10	35	55
5	+1	-1	-1	15	30	50
6	+1	-1	+1	15	30	55
7	+1	+1	-1	15	35	50
8	+1	+1	+1	15	35	55

Таблиця 3.5 – Результати експерименту 2^3

№	Y ₁₁	Y ₁₂	Y _{1сеп}	Y ₂₁	Y ₂₂	Y _{2сеп}	Y ₃₁	Y ₃₂	Y _{3сеп}
1	13,60	13,75	13,675	4,95	5,15	5,050	4,35	4,50	4,425
2	13,20	13,30	13,250	5,05	5,25	5,150	4,05	4,20	4,125
3	13,20	13,35	13,275	5,10	5,25	5,175	4,30	4,50	4,400
4	13,15	13,35	13,250	5,15	5,30	5,225	4,35	4,50	4,400
5	16,75	16,90	16,825	4,50	4,90	4,800	7,00	7,20	7,100
6	16,00	16,20	16,100	4,75	4,95	4,850	6,55	6,70	6,625
7	16,55	16,75	16,650	3,85	4,15	4,000	7,15	7,35	7,250
8	16,70	16,80	16,750	4,65	4,90	4,775	6,80	6,90	6,850

$$f_{\text{вiдмс}} = 8(2 - 1) = 8, \quad (3.1)$$

$$S_{b_i} = \frac{S_{\text{вiдмс}}}{t_{0,05}}, \quad (3.2)$$

$$b_{i \min} = S_{b_i} t_{0,05}, \quad (3.3)$$

де $t_{0,05} = 2,82842$ – квантиль критерію Стюдента.

Таблиця 3.6 – Результати статистичної обробки даних

Параметри	$S_{\text{відмс}}$	$S^2_{\text{відмс}}$	S_{b_i}	$b_{i \min}$
Y_1	0,080526	0,006484	0,028474	0,066
Y_2	0,105697	0,011172	0,037375	0,086
Y_3	0,082916	0,006875	0,029320	0,068

За значеннями $b_{i \min}$ оцінювали значимість коефіцієнтів регресії, що показані в таблиці 3.7, і за значимими цих коефіцієнтами отримали рівняння регресії (3.4 – 3.6), котрі описують залежність параметрів $Y_1 - Y_3$ від керованих факторів системи $X_1 - X_3$.

$$Y_1 = b_0 + b_1 X_1 - b_3 X_3 - b_{12} X_1 X_2 + b_{23} X_2 X_3, \quad (3.4)$$

$$Y_2 = b_0 - b_1 X_1 + b_3 X_3 - b_{12} X_1 X_2 + b_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (3.5)$$

$$Y_3 = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 - b_3 X_3 - b_{13} X_1 X_3. \quad (3.6)$$

Таблиця 3.7 – Коефіцієнти рівнянь регресії

Параметри Коефіцієнти	Y_1	Y_2	Y_3
b_0	14,9719	4,8781	5,65
b_1	1,6094	-0,2719	1,3063
b_2	0,0094	-0,0843	0,0813
b_3	-0,1343	0,1219	-0,1438
b_{12}	0,1094	-0,1344	0,0125
b_{13}	-0,0219	0,0844	-0,075
b_{23}	0,1531	0,0844	0,05
b_{123}	0,0531	0,0969	-0,0313

Перевіряли одержані рівняння за критерієм Фішера (3.7 – 3.8), де $S^2_{\text{зал}}$ – залишкова дисперсія, n – число дослідів, l – число значимих коефіцієнтів. Підтвердили коректність опису експерименту отриманими рівняннями регресії:

$$F = \frac{S_{зал}^2}{S_{відтв}^2}, \quad (3.7)$$

$$S_{зал}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{практик}} - Y_i)^2}{n - l}. \quad (3.8)$$

Як показує практика, так і підтверджують моделі регресії, що на показники якості залізобетону значно впливає вміст цементу і обох наповнювачів. Відповідно до даних експерименту за значеннями b_1 збільшення кількості ШЦ призводить до збільшення МС і УЗ, однак при цьому ЧУ зменшується, на що вказує від'ємне значення відповідного b_1 .

Варіювання кількості піску в рецептурі бетону, відповідно до моделі, безпосередньо не впливає на величину міцності на стиск, але сприяє збільшенню відносної швидкості проходження ультразвуку крізь бетон. Ми встановили мінімальний вміст піску на рівні 30 мас. %, а максимальний – 35 мас. % відповідно до рекомендацій стандартів.

Додавання до складу бетону у якості наповнювача ПБ сприяє зменшенню як міцності на стиск, так і відносної швидкості проходження ультразвуку, проте число відскоку молота збільшується. Ми задавали параметр ПБ від 50 мас. % до 55 мас. %.

Значимими є коефіцієнти b_{12} взаємодії в (3.4 – 3.5). Ймовірно, це пов'язано із взаємодією цементу з піском і утворенням просторових структур. Коефіцієнт b_{13} взаємодії є значимим лише в (3.6). Прогнозовано, що додавання ПБ до АЗБ призводить до зменшення УЗ. Коефіцієнт взаємодії b_{23} в (3.4) вказує на взаємодію П та ПБ в складі АЗБ. Коефіцієнт взаємодії b_{123} в (3.5) показує, як взаємодіють між собою усі три компоненти АЗБ, що сприяє збільшенню міцності бетону, що є складним багатofакторним процесом.

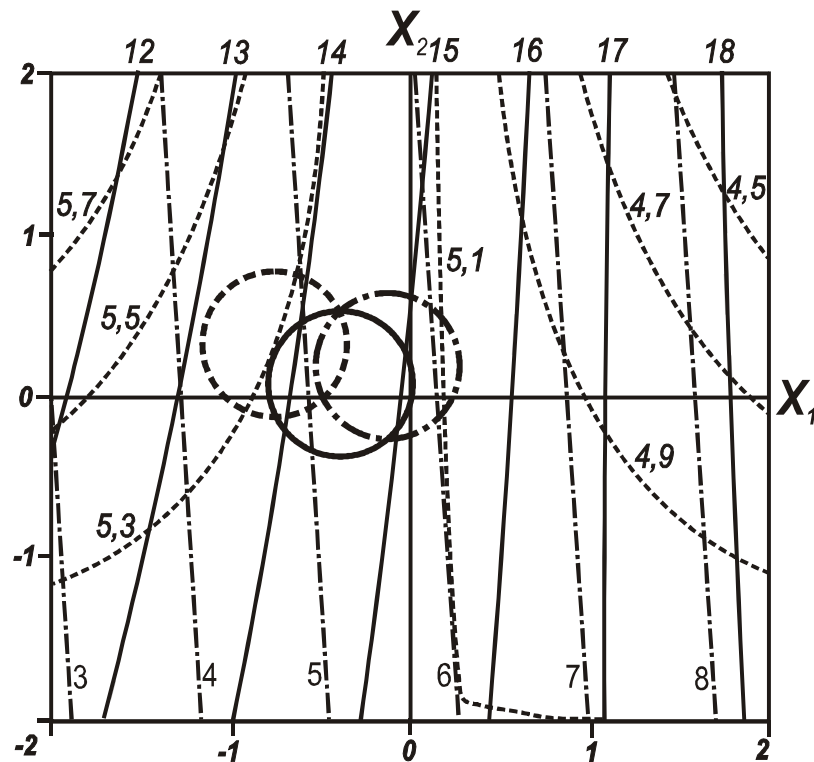
Оскільки в (3.4) і (3.6) $b_3 < 0$, це вказує на те, що додавання ПБ до складу АЗБ зменшує МС і УЗ. Ми зафіксували X_3 на мінімальному рівні (–1) і отримали нові рівняння (3.9 – 3.11), із яких побудували поверхні, котрі відповідають функціям відгуку:

$$Y_1 = 15,1 + 1,6X_1 - 0,2X_2 - 0,1X_1X_2, \quad (3.9)$$

$$Y_2 = 4,8 - 0,3X_1 - 0,2X_1X_2, \quad (3.10)$$

$$Y_3 = 5,8 + 1,4X_1 + 0,1X_2. \quad (3.11)$$

Оптимальний склад АЗБ проводили по Y_1 , Y_2 , Y_3 графічно. Графічно оптимізували склад бетону за трьома параметрами шляхом суміщення проєкцій перерізів трьох поверхонь функцій Y_1 , Y_2 , Y_3 , що показано на рисунку 3.10.



Лінія: суцільна – Y_1 (МС, МПа), штрих – Y_2 (КУ), штрих-пунктир – Y_3 (УЗ, мс^{-1}) за різних співвідношень, мас. %: X_1 (ШЦ), X_2 (П), X_3 (ПБ).

Рисунок 3.10 Перерізи поверхонь функцій відгуку.

Як видно з графіку, що на рисунку 3.10, оптимальний склад залізобетону знаходиться на перетині трьох кіл. Таким чином частка шлакового цементу становить (11,15 – 12,43) %, піску – (32,50 – 33,75) %, переробленого бетону – (50,95 – 51,86) %.

ВИСНОВКИ

У ході роботи був проведений аналіз наукових даних за темою роботи, були визначені мета і завдання роботи, методи досліджень, проведена оцінка сучасного стану виробництва залізобетонних конструкцій, визначені основні екологічні проблеми, пов'язані з цим процесом, та розроблені пропозиції щодо вдосконалення технологій і матеріалів для зменшення їхнього негативного впливу на довкілля, а саме:

- проведений аналіз існуючих технологій виробництва залізобетонних конструкцій та їхній вплив на довкілля та досліджені можливості застосування альтернативних матеріалів;

- методом РФА проведений якісний та кількісний аналіз зразків ТЗБ і АЗБ і встановлено, що зразок АЗБ відповідає складу залізобетону і є безпечним з точки зору використання;

- випробували зразки залізобетону шляхом нагрівання і визначили міцність ТЗБ і АЗБ методом ультразвукового дослідження: руйнування АЗБ під впливом високих температур проходить аналогічно до ТЗБ;

- оцінені зразки ТЗБ і АЗБ за показниками впливу на довкілля: вуглецевий відбиток АЗБ на 22,8 % менший, ніж ТЗБ, а енерговитрати АЗБ на 21,7 % менші, ніж ТЗБ;

- шляхом математичного моделювання оптимізований склад АЗБ: шлаковий цемент (11,15 – 12,43) %, пісок – (32,50 – 33,75) %, перероблений бетон – (50,95 – 51,86) %, вода – до 100 %. Однак застосування АЗБ потребує додаткового економічного обґрунтування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Scrivener, K. L., Juilland, P., & Monteiro, P. J. M. (2015). *Advances in understanding cement hydration mechanisms. Cement and Concrete Research*, 78, 38–56.
2. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2013). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw Hill Education. Ramachandran, V. S., & Beaudoin, J. J. (2015).
3. William Andrew. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications* / Andrew William // NY : 2016, 457 p.
4. Jain, R. Kumar. *Evaluation of Dry Process in Cement Manufacturing*. International Journal of Scientific Research and Engineering Development (2018).
5. S. Gupta, A. Kumar, R. Kumar. *Wet Process of Cement Manufacturing – Cement Manufacturing Wet Process*. Civil Engineering. (2018).
6. S. Kumar, V. Jain, R. Kumar. *Review on Application of Modified Dry Process in Cement Production*. International Journal of Engineering Research & Technology, 2019.
7. Tuller, M., & Walker, M. (2018). *Renewable energy transition in the cement industry: Assessing carbon mitigation options through techno-economic modelling for policy insights*. *Renewable Energy*, 123, P. 1–13.
8. Лемешев М. С. Особливості використання промислових техногенних відходів в галузі будівельних матеріалів / М. С. Лемешев, К. К. Сівак, М. Ю. Стаднійчук // Сучасне технічне будівництво, 2021. – 29 (2). – с. 24–34.
9. Савіцька, І. О. Проблеми вловлювання цементного пилу на промислових об'єктах / І. О. Савіцька, Ю. І. Грицюк // Науковий вісник НЛТУ України, 2021. – 21 (7). – с. 74–82.
10. Chernayk L. P (2023). Particularities of structure formation of dispersed systems in the portland cement technology. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(14), 8–10.

11. Саницький М. А. Модифіковані композиційні цементи / М. А. Саницький, В. В. Іванов // Вісник Приазовського державного технічного університету, 2014. С. 141–146.
12. Саницький М. А. та ін. Очистка відходних газів промислових підприємств» М. А. Саницький, Х. С. Соболев, Т. Є. Марків. – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2020. – 132 с.
13. Титов Ю. С. Оптимізація процесу очищення відходних газів від пилу на цементних заводах / Ю. С. Титов // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Гірничо-електромеханічна, 2018. – С. 23–29.
14. Порубченко В. М. Основні способи очищення відходних газів від пилу на цементних заводах / В. М. Порубченко // Вісник Вінницького нац. політехнічного ун-ту, 2017. – 39. – С. 105–109.
15. Про Основні напрями державної політики України у галузі охорони довкілля, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки // Відомості Верховної Ради (ВВР), 2008. – № 38–39. – 248 с.
16. Duxson, J. L. The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’ / J. L. Duxson, G. C. Provis, J. S. Lukey // Cement Concr. Res., 2017. – 7 (12). P. 1590–1597.
17. Agwa, I. S., Zeyad, A. M., Tayeh, B. A. & Adesina, A. R. A comprehensive review on the use of sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material to produce eco-friendly concretes. Mater. Today: Proc. (2022).
18. Agwa, I. S., Zeyad, A. M., Tayeh, B. A. & Hadzima-Nyarko, I. S. Possibilities for the application of agro-industrial wastes in cementitious materials: a brief review of the Brazilian perspective Cleaner Materials, 3 (2022).
19. Zhou Y. Sustainable lightweight engineered cementitious composites using limestone calcined clay cement (LC³) / Y. Zhou, G. Gong, B. Xi, M. Guo, F. Xing, C. Chen // Composites Part B: Engineering, 2022. – Vol. 243. – P. 110183.

20. Aravind, T. I. & Abdulrehman, A. A. *A review and sequel experimental analysis on physical and mechanical properties of permeable concrete for pavement construction*. *Int. J. Pavement Eng.*, 23 (12) (2022), P. 4160–4173.
21. Pingping Luo, Liming Liu, Siting Wang, Baiming Ren, Bin He, Daniel Nover, Influence assessment of new Inner Tube Porous Brick with absorbent concrete on urban floods control, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 17, 2022.
22. Anupam, B. R., Sahoo, U. C., Rath, P. P. & Bhattacharya A. P. *Thermal performance assessment of PCM incorporated cool concrete pavements using numerical analysis*. *Int. J. Pavement Eng.* (2022), P. 1–11.
23. Y. Wardeh, E. Kinab, G. Escadeillas & P. Rahme. *Ginestet Review of the Optimization Techniques for Cool Pavements Solutions to Mitigate Urban Heat Islands Build. Env.* (2022), P. 109482.
24. Al-Mansour, A., Chow, C. L., Feo, L., Penna, R., & Lau, D. (2019). Green Concrete: By-Products Utilization and Advanced Approaches. *Sustainability*, 11(19), 5145. <https://doi.org/10.3390/su11195145>
25. Eduardo-Javier Elizondo-Martínez, Valerio-Carlos Andrés-Valeri, Daniel Jato-Espino, Jorge Rodriguez-Hernandez, Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement, *Journal of Building Engineering*, Volume 27, 2020, 100967.
26. Ruijun Wang, Zhiyao Hu, Yang Li, Kai Wang, Hao Zhang, Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze–thaw environment, *Construction and Building Materials*, Volume 321, 2022, 126371.
27. L. A. Balan, B. R. Anupam, S. A. Sharma Thermal and mechanical performance of cool concrete pavements containing waste glass *Construct. Build. Mater.*, 290 (2021), Article 123238.
28. O. A. Hisseine, N. A. Soliman, B. A. Tolnai, A. I. Tagnit-Hamou Nano-engineered ultra-high performance concrete for controlled autogenous shrinkage using nanocellulose *Cement Concr. Res.*, 137 (2020), Article 106217.

29. M. Jung, J. Park, S. Hong, J. Moon The critical incorporation concentration (CIC) of dispersed carbon nanotubes for tailoring multifunctional properties of ultra-high performance concrete (UHPC) *J. Mater. Res. Technol.*, 17 (2022), P. 3361–3370.

30. B. A. Tayeh, H. M. Hamada, I. A. Almeshal, B. A. Bakar Durability and mechanical properties of cement concrete comprising pozzolanic materials with alkali-activated binder: a comprehensive review *Case Stud. Constr. Mater.* (2022), Article e01429.

31. K. Van Tittelboom, J. Wang, M. Araújo, D. Snoeck, E. Gruyaert, B. Debbaut Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test *Construct. Build. Mater.*, 107 (2016), P. 125–137.

32. A. Kanyilmaz, A. Demir, M. Chierici, F. Berto, L. Gardner, S. Kandukuri Role of metal 3D printing to increase quality and resource-efficiency in the construction sector *Addit. Manuf.*, 50 (2022), Article 102541.

33. J. Chouhan, A. Chandrappa A systematic review on photocatalytic concrete for pavement applications: an innovative solution to reduce air pollution *Inn. Infra. Solutions*, 8 (3) (2023), p. 90–98.

34. Кваліфікаційна робота магістра : методичні рекомендації щодо її підготовки та виконання здобувачами вищої освіти спеціальності 161 "Хімічні технології та інженерія" / уклад.: О. А. Параска, Т. В. Іванішена. Хмельницький: ХНУ, 2024. – 44 с.

35. Текстові документи. Загальні вимоги. СОУ 207.01:2017 / Ю. М. Бойко, Г. В. Красильникова, Л. І. Першина, Т. Ф. Косянчук. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – 45 с.

36. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями. Методи обробки результатів спостережень. Основні положення.

37. Методичні вказівки до виконання розрахункових завдань "Методи планування експерименту в хімічній технології" за курсами математичного та комп'ютерного моделювання для студентів хімічних спеціальностей усіх

форм навчання / уклад. Т. Г. Бабак, О.А. Голубкіна, Є.Д. Пономаренко. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – 72 с.

38. ДСТУ 9177-4:2022 Матеріали щебеневі та гравійні для дорожнього будівництва. Технічні умови.

39. ДСТУ Б В.2.7-88-99 Будівельні матеріали. Портландцементи тампонажні. Технічні умови (ГОСТ 1581-96).

40. Беліков К. М. Рентгенофлуоресцентний аналіз : навчальний посібник / К.М. Беліков, О. І. Юрченко // Харків : 2012, 52 с.

41. Органічна хімія. Практикум: Техніка лабораторних робіт. Основні операції під час роботи в лабораторії органічної хімії : для студентів напрямів підготовки Хімія*, Хімічна технологія та інженерія, Охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування / Рокицька В. Й., Ткачук Г. С. – Хмельницький : ХНУ, 2013. – 123 с.

42. Єврокод 6. Проектування кам'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. (EN 1996-1-2:2005, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1996-1-2:201X.

43. ДСТУ Б В.2.7-226:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності.

44. Методичні вказівки до виконання розрахункових завдань «Методи планування експерименту в хімічній технології» за курсами математичного та комп'ютерного моделювання для студентів хімічних спеціальностей усіх форм навчання / уклад. Т. Г. Бабак, О. А. Голубкіна, Є. Д. Пономаренко. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – 72 с.

45. Дворкін Л. Й. Міцність бетону : навчальний посібник / Л. Й. Дворкін. – К. : Видавничий дім "Кондор", 2021. – 310 с.

46. Горват А. А. Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel: Навчальний посібник / А. А. Горват, О. О. Молнар, В. В. Мінькович // Ужгород: Вид-во УжНУ "Говерла ", 2019. – 160 с. : іл.