

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНИ  
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

Кафедра \_\_\_\_\_ **Промислового та цивільного будівництва** \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ **другий магістрський рівень** \_\_\_\_\_  
(другий (магістерський) рівень)  
Спеціальність \_\_\_\_\_ **192 "Будівництво та цивільна інженерія"** \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)  
Освітньо-професійна програма \_\_\_\_\_ **"Промислове і цивільне будівництво"** \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ ПЦБ \_\_\_\_\_  
проф. Арутюнян І.А.  
" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ /ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)**

Карташової Ганни Анатоліївни

(прізвище, ім'я по батькові)

1. Тема роботи (проекту) \_\_\_\_\_ **Самовідновлювальні бетони модифіковані мікробіологічною** \_\_\_\_\_  
добавкою \_\_\_\_\_

керівник роботи \_\_\_\_\_ **Мішук Катерина Миколаївна доцент кафедри ПЦБ, к.т.н.** \_\_\_\_\_

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

затверджені наказом ЗНУ від " 01 " 05 2023 року № 635-С \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ **06 грудня 2023 р.** \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

**Методи наукових досліджень, науково-технічна, навчальна, нормативна та періодична література:**



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

Вступ. Розгляд бетонів як поліструктурного матеріалу. Методи та способи подовження терміну використання бетонів та залізобетонів. Використання осадження виробляється мікроорганізмами.

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

Вступ. Розвиток та використання бетону. Класифікація бетонів. Типові причини виникнення пошкоджень, тріщиностійкість бетонів. Принципи самовідновлювання матеріалів. Будівельні матеріали, з використанням осадження кальцитів.

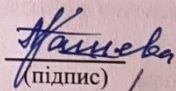
6. Консультанти розділів роботи

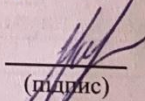
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1, 2, 3	Мішук К.М.		

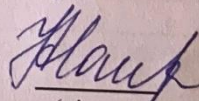
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 03 травня 2023 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1.	Бетони як основний матеріал будівельної галузі	17.10.2023	
2.	Методи подовження терміну використання бетону	15.11.2023	
3.	Самовідновлювані бетони, модифіковані мікробіологічною добавкою	29.11.2023	
4.	Оформлення дипломної роботи	01.12.2023	
5.	Підготовка до захисту	01-06.12.2023	

Студент  (підпис) Карташова Г.А. (прізвище та ініціали)

Керівник роботи/проекту  (підпис) Мішук К.М. (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено  (підпис) Данкевич Н.О. (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Карташова Ганна Анатоліївна. Самовідновлювані бетони модифіковані мікробіологічною добавкою.

Науковий керівник Мішук К.М. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. Факультет будівництва та цивільної інженерії, 2023 рік.

В роботі проведено дослідження , яке демонструє взаємозв'язок розвитку складу бетонів та бетонних сумішей від зміни потреб якості створюваних будівельних об'єктів, необхідність пошуку нових компонентів які мають вплив на поліпшення фізико-механічних властивостей. Також розглянуто процеси тріщиноутворення, методи та способи ремонту і відновлення бетонних виробів, необхідність модифікування бетонів для поліпшення їх довговічності та міцності.

**Ключові слова.** Бетони, клінкер, самоущільнювні бетони, суперпластифікатори, фібробетон, модифікований цементний композит, бактерії, мікробіологічна добавка, інтелектуальні композити, матеріали-носії, цеоліти

## ЗМІСТ

	Стор.
<b>ЗАВДАННЯ</b> .....	3
<b>АНОТАЦІЯ</b> .....	4
<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>1. БЕТОН ТА БЕТОННІ СУМІШІ, ЯК ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ СУЧАСНОЇ БУДІВЕЛЬНОЇ ГАЛУЗІ</b> .....	12
1.1. Етапи розвитку бетону та його використання в будівництві ...	12
1.2. Структуроутворення, характеристики, види бетонів .....	14
1.3. Фізико-механічні властивості бетонів .....	26
<b>2. СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ</b> .....	29
2.1. Вимоги до довговічності бетонних та залізобетонних конструкцій .....	29
2.2. Методи відновлення, посилення та ремонту залізобетонних та бетонних конструкцій сучасними матеріалами .....	37
2.2.1. Сучасні матеріали для виконання відновлюваних та ремонтних робіт .....	37
2.2.2. Види матеріалів, що застосовуються у зв'язку з необхідністю поліпшення експлуатаційних властивостей будівельних конструкцій .....	39
2.2.3. Методи посилення залізобетонних конструкцій .....	45
<b>3. САМОВІДНОВЛЮВАНІ БЕТОНИ</b> .....	50
3.1. Інтелектуальні композити, передумова розробки самовідновлюваних бетонів .....	50
3.2. Розробка самовідновлюваних бетонів методом обробки мінеральних в'язучих мікробіологічною добавкою .....	52
3.2.1. Усунення тріщин .....	52

3.2.2. Покращення механічних характеристик бетону .....	53
3.2.3. Зниження проникності бетону .....	55
3.2.4. Зменшення водопоглинання бетону .....	56
3.2.5. Підвищення корозійної стійкості .....	57
3.2.6. Класифікація матеріалів використовуваних для самовідновлювання .....	58
3.3. Теоретичні передумови створення самовідновлюваних бетонів в промислових умовах .....	58
3.3.1. Процес самовідновлення, умови необхідні для успішної його реалізації .....	58
3.3.2. Осадження кальциту мікроорганізмами .....	64
3.3.3. Види бактерій, які застосовуються для самовідновлення бетонів .....	66
3.3.4. Матеріали, що використовуються для доставки бактерій..	69
3.3.5. Хімічні аспекти процесу самовідновлення .....	70
3.3.6. Теоретичні розробки схеми для отримання бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою .....	75
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	80
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	82



## ВСТУП

На початку становлення людської цивілізації все будівництво проводилось з природних матеріалів : каміння, дерева, глини. Чим більше розвивалося людство тим більші вимоги пред'являлися до будівель і споруд. З'явилися вимоги до комфорту та затишності житла, до якості доріг та міцності мостів та мостових переходів, інших гідротехнічних споруд і т.д. Ці підвищені вимоги спонукали майстрів та науковців до пошуку і виготовлення нових матеріалів. Одним з таких рукотворних будівельних матеріалів став бетон.

Бетони почали використовуватися як будівельний матеріал у Стародавній Римській імперії. Потім забутий матеріал знову вийшов на перше місце в будівництві приблизно у 18 столітті. З цього моменту розвитку матеріалу присвячувалося багато уваги, розглядалися нові напрямлення, покращувалися властивості, розроблялися методи ремонту та відновлення. З останнім також пов'язані наукові розробки в області попередження і ліквідації утворення дефектів самого бетону та залізобетонних конструкцій.

Основним недоліком бетону є те, що з плином часу в ньому з'являються тріщини, а після потрапляння до них води руйнація матеріалу посилюється і тріщини приймають вигляд магістральних. Усуненню даної проблеми присвячено багато років досліджень. В результаті такої роботи з'явилося два напрямку вирішення проблеми: застосування поверхневих покриттів та розробка матеріалів для самостійного відновлення бетонів. Наразі найбільш перспективним, з точки зору використання та ремонту бетонних виробів, є розробка і впровадження модифікаторів які впливають на процеси самовідновлювання бетонів та залізобетонних виробів.

У роботі буде приведено результати досліджень стосовно розробки і отримання матеріалів, які мають можливість самостійно відновлювати фізико-технічні властивості бетону, різновиди використовуваних для цього бактерій,

доцільність використання біобетонів для виготовлення самовідновлюваних бетонних та залізобетонних виробів.

**Актуальність теми дослідження:** отримання високоякісних видів бетонів вирішується шляхом ретельного підбору та оптимізації складу компонентів, що входять до складу матеріалу. Одним з варіантів поліпшення якості є модифікування структури бетону комплексними добавками різного функціонального призначення.

В процесі експлуатації бетонних виробів з'являються кілька варіантів дефектів, але розглянемо основний вид - тріщини. Причиною тріщиноутворення виступають несприятливі умови навколишнього середовища, силові навантаження, недотримання технології в процесі виробництва, помилки конструювання та інше. Такого роду дефекти мають значний вплив на якість та строк експлуатації виробів. Звичайно додаткові покриття або просочення масиву спеціальними розчинами стримують руйнівні процеси, але з часом ремонт та відновлення все одно потрібні.

Як показує досвід, обслуговування та ремонт залізобетонних конструкцій вимагають значних фінансових витрат. Полімерні та металеві матеріали які використовують для ремонту мають значну вартість. З фінансової точки зору значно простіше було б ліквідувати процес утворення тріщин на самому початку їх появи або мінімізувати їх розповсюдження в масиві бетонного виробу.

Спостерігаючи за живою природою та розглядаючи відновлення організмів після травм, вчені прийшли до висновку про можливість створення умов для самостійного відновлення бетонів. Іншими словами для відновлення бетону треба створити середовище в якому будуть відтворюватися матеріали, які входять до складу самого бетону або його добавок, пов'язаних з міцністю матеріалу.

Самовідновлювані матеріали складаються з полімерів, що представляють собою молекули с довгим ланцюгом, які можуть змусити реагувати на механічні uszkodження або uszkodження пов'язані з навколишнім

середовищем. До таких полімерів вбудовуються мікрокапсули які містять заживлюючі агенти (ферменти, бактерії, інші органічні сполуки). Коли матеріал з самовідновлюваними капсулами отримує ушкодження, капсули вивільнюються і агенти заживлення активуються та за деякий період часу відновлюють ушкоджені масиви.

В процесі розробки теми науковці з різних країн експериментували з різними видами бактерій, середовищем в якому створюється середовище для підтримання їх життєздатності, типами матеріалів-носіїв відновлюваних компонентів для якісного вирішення проблем самостійного відновлення бетонів.

Наразі в Україні з'явилася нагальна необхідність масового переносу промислових об'єктів із зруйнованих або прифронтових районів у більш безпечну місцевість та будівництво житла для внутрішньо переміщених осіб та людей, що втратили житло в результаті війни. Окрім того необхідність виконання ремонтно-відновлюваних робіт з ліквідації мілких та середніх дефектів поверхонь будівель та споруд методом нанесення самовідновлюваних покриттів. Враховуючи складну ситуацію в економіці країни та воєнні дії на території України (постійна руйнація будівель та споруд в наслідок обстрілів) зниження витрат на обслуговування та ремонт будівель і споруд стає дуже актуальним питанням.

Виходячи з викладеного робимо висновок, що розробка та впровадження самовідновлюваних бетонів є актуальним для створення сприятливих умов для експлуатації бетонних споруд якомога більш тривалий термін та зниження витрат на їх утримання і ремонт.

**Метою магістерської роботи:** є дослідження теоретичних та практичних методів удосконалення експлуатаційних характеристик бетонів, шляхом їх самовідновлення та можливості застосування мікробіологічних добавок у цьому процесі.

**Об'єктом дослідження** є бетони, процеси тріщиноутворення у бетонних та залізобетонних конструкціях, методи їх відновлення.



**Предмет дослідження** – отримання самовідновлюваних бетонів та можливість модифікування залізобетонних конструкцій мікробіологічними добавками.

Для досягнення поставленої в процесі дослідження мети вирішені **наступні завдання:**

1. Аналіз виникнення бетону як будівельного матеріалу, шлях розвитку бетонів, зв'язок між розвитком цивілізаційних процесів з будівельною галуззю.
2. Розгляд властивостей бетонних сумішей, взаємозв'язок між різними компонентами бетонів, їх вплив на технологічність, довговічність та фізико-хімічні властивості виробів з бетону.
3. Вивчення сучасних методів відновлення та ремонту бетонних та залізобетонних виробів, дослідження причин виникнення самовідновлюваних бетонів.
4. На основі проведеного дослідження та аналізу існуючих підходів до створення бетонів виявити передумови до застосування біотехнологій до самовідновлювання залізобетонних конструкцій, що отримали дефекти при експлуатації.
5. Оцінити ефективність затягування тріщин, вплив добавок на такі механічні властивості як міцність, ріст та можливість формування кристалів; спороутворення; відсоток виживання різного роду бактерій.

**Методи дослідження** враховують системні підходи що допомагають вирішенню завдань з вивчення всіх аспектів виникнення, вдосконалення та розвитку самовідновлюваних бетонів та можливості їх модифікування різними добавками для вдосконалення їх властивостей.

**Наукова новизна.** У роботі розглянуто та проаналізовано дослідження розвитку технологій виготовлення сучасних самовідновлюваних бетонів модифікованих мікробіологічною добавкою, встановлено вплив добавок на відновлення міцності бетону різних типів.

**Практична цінність.** Самовідновлювані бетони мають довший строк

експлуатації та потребують менших витрат на обслуговування. Крім того вони більш екологічні бо виробляють менше парникових газів та інших забруднюючих речовин. Використовувати такі бетони доцільніше для будівництва мостів, тунелів та форм інфраструктури, що розташовані в місцях зі складними умовами для обслуговування. Як вважають розробники, самовідновлювані бетони особливо цінними стають в екстремальних умовах та в умовах проведення воєнних дій. Споруди зведені з таких матеріалів мають можливість відновлюватися без втручання зі сторони та без додаткових матеріально-технічних витрат.

*Апробація результатів магістерської роботи.* Запропонована робота виконана в Запорізькому національному університеті на кафедрі «Промислового та цивільного будівництва». Робота брала участь у III Всеукраїнській науково-практичній конференції за участю молодих науковців в жовтні 2023 року.

*Структура і об'єм магістерської роботи.* Магістерська робота складається з вступу, 3 розділів, висновку, переліку використаної літератури. Повний об'єм магістерської роботи складає 92 сторінок тексту, у тому числі 11 рисунків, 3 таблиці. Список використаних джерел містить 97 найменування.

# 1 БЕТОН ТА БЕТОННІ СУМІШІ, ЯК ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ СУЧАСНОЇ БУДІВЕЛЬНОЇ ГАЛУЗІ

## 1.1 Етапи розвитку бетону та його використання в будівництві

З перших кроків свого розвитку людська цивілізація займалася будівництвом, поступово ускладнюючі матеріали використовувані у процесі створення будинків або споруд. Коли саме з'явився бетон складно визначити, однак один з найбільш ранніх бетонів, який виявлено археологами, відноситься до 5600 р. до н.е. Його знайшли в Югославії на березі Дунаю в селищі Лапінський Вір, в одній з хатин древнього поселення кам'яного століття. У цій хатині з бетону була зроблена підлога. Бетон для підлоги готувався на гравії і червонуватому місцевому вапні. Далі будівельники експериментували з різними матеріалами, що додавалися до складу бетонів. З часом в Єгипті, Китаї, Індії почали виготовлятися штучні в'язучі матеріали такі як гіпс і вапно, які отримували за допомогою термічної обробки сировини [1]. Наслідками відкриття стало розширення області застосування будівельного матеріалу. Прикладом нової сфери застосування бетону стало спорудження доріг, склепінь, куполів та інше.

Розвиток бетону і залізобетону пов'язаний з трьома важливими подіями: повторне «відкриття» бетону, виробництво штучного цементу і використання чавуну і сталі в будівництві [2].

Повторно бетон був використаний в 1760 році англійським інженером Джоном Смітсоном для спорудження одного із шлюзів на річці Колдер. Приблизно з 1835 р. бетон починають використовувати при спорудженні основ і фундаментів у Франції [2].

Про бетон в сьогоденні значення цього слова говорять з тих пір, як існує мінеральне в'язуче – цемент. Роком його винаходу вважають

1844 рік. Історичним підтвердженням майже столітніх пошуків нового в'язучого є формулювання Ісаком Чарльзом Джонсоном двох фундаментальних умов виготовлення цементу:

- підбір правильного співвідношення вихідних компонентів;
- випалювання цих матеріалів до температури спікання близько 1450°C.

В період з 1840 по 1860 р.р. були побудовані перші заводи по випуску цементу в Англії, Франції, Німеччині. Наприкінці 1800 років у США розпочалося активне використання цементобетонного покриття у будівництві автодоріг та аеродромів [1].

В Києві вперше бетон був використаний у 1898 році при будівництві колишнього Київського художньо-промислового і наукового музею на вулиці Грушевського, 6.

Самою відомою спорудою з бетону в Україні є київський «будинок з химерами». Початок будівництва припав на 1903 рік, хоча ділянка на вул. Банковій, 10 вважалась спеціалістами непридатною для забудови через надто крутий схил. Для зміцнення стійкості схилу було вбито майже 50 бетонних набивних паль. Набивні палі розроблені інженером А.Е. Страусом. Для більшої безпеки зверху паль влаштували бетонні «подушки». Матеріалом для зведення також був обраний бетон [1].

В подальшому наукові розробки в області матеріалів для будівництва стосувалися можливостей з подовження строку використання бетонних виробів, мінімізації витрат на ремонт бетонних будівель і споруд, вплив добавок на окремі властивості матеріалу. В результаті розробок з'явилося багато варіацій штучних матеріалів та добавок. З'явилася можливість підсилювати або навпаки зменшувати вплив на певні властивості будівельних матеріалів. Одним з результатів таких досліджень стали самовідновлювані матеріали.

Самовідновлювані матеріали – це тип інтелектуальних матеріалів, які можуть відновлювати власні ушкодження, що були викликані зносом, а також факторами навколишнього середовища (наприклад коливання температури,

корозія). Такі матеріали виготовляються з комбінації полімерів, металів та інших елементів, які реагуючи на подразники вивільняють «лікуючу» речовину що відновлює ушкодження. Усуваючи незначні пошкодження, матеріали подовжують строк служби конструкції, скоротив час та гроші, що йдуть на ремонт, окрім того вони допомагають зменшити кількість відходів будівництва, зменшити потребу в енергоресурсах та інше. Тому розробки в цьому напрямі допоможуть створювати в майбутньому будівлі, споруди та об'єкти інфраструктури більш міцними, енергоефективними та екологічними.

## **1.2 Структуроутворення, характеристики, види бетонів**

В сучасному світі використовуються штучні матеріали до складу яких входить різна кількість мономатеріалів з різними властивостями, завдяки чому з'являється комплекс нових властивостей не притаманних вихідним матеріалам. Такі матеріали отримали назву композиційні будівельні матеріали [69, 5].

Номенклатура композиційних будівельних матеріалів включає бетони і розчини всіх видів, мастики, замазки, клеї, будівельну кераміку, склопластики, інші полімерні матеріали [3,5].

Основою класифікації композиційних будівельних матеріалів є загальна теорія формування їх структури, властивостей та методів дослідження [3,5,69]. З різних композиційних матеріалів в будівельній галузі найбільш використовуваними вважаються цементі бетони різних видів.

Бетон в основному застосовується для спорудження несучих конструкцій, тому найбільш важливими властивостями бетонів є міцність, довговічність та тріщиностійкість. В процесі експлуатації бетонних виробів у різних спорудах матеріал потрапляє під різного виду навантаження. Це можуть бути стиснення, згин, зріз та інше. Як і всякий кам'яний матеріал,

бетон краще за все пручається напруженням на стиск, а тому його в основному і використовують в конструкціях, які працюють на стиск [13, 17, 72].

В сучасному розумінні бетон – це будівельний матеріал, що виробляється шляхом змішування в'язучих речовин, мілкого та великого наповнювачів і води у відповідних пропорціях. Для поліпшення тих чи інших властивостей матеріалу до його складу також додаються спеціальні добавки. При розробці проекту проектувальник розраховує необхідні показники надійності споруди, яка будується. Виходячи з цих потреб підбираються різновиди бетонів. Різні елементи будівлі або споруди мають різні види впливів, а тому і виготовляються з різних марок бетону (бетонних виробів).

За своїми властивостями, способом виготовлення, характеристиками бетони мають свою класифікацію. Класифікація бетонів, згідно ДСТУ Б В.2.7-221:2009 наведена у таблиці 1.2.1 [4].

За своїм призначенням, бетони поділяють на конструкційні та спеціальні. Конструкційні бетони використовують на об'єктах промислового та цивільного будівництва для облаштування несучих та огорожувальних конструкцій будівель і споруд. Спеціальні застосовують для об'єктів з підвищеними технічними вимогами, тому що такий бетон має підвищену хімічну стійкість, жаростійкість, звукопоглинання або інші властивості відповідно до вимог їх функціонування [5].

Цемент представляє собою подрібнений клінкер до складу якого введені модифікуючі добавки і наповнювачі. В сухому вигляді це сипуча однорідна маса, яка при розведенні водою утворює пастоподібний в'язучий матеріал. Клінкер це результат нагріву вапняку та глини до температури близько 1450°C. В процесі нагріву відбувається зміна структури матеріалів та утворення гранул клінкеру. Потім вони змішуються з гіпсом та перемелюються до стану порошку [44].

Як і інші будівельні матеріали цементи мають свою класифікацію, яка закріплена певним стандартом (ДСТУ Б В.2.7-281:2011). Така класифікація обумовлена конкретними потребами промисловості України з урахуванням

вимог стандартів Європейського союзу, та стосуються як звичайних так і спеціальних цементів [7].

Цементи класифікуються за наступними ознаками:

- речовим складом (типи, що характеризуються різними видами і вмістом мінеральних добавок);
- призначенням (загальнобудівельні, спеціального, інші);

Таблиця 1.1 - Класифікація бетонів

<b>Ознаки класифікації</b>	<b>Види бетонів</b>
Основне призначення	-конструкційні; - спеціальні (жаростійкі, хімічно стійкі, декоративні, радіаційно-захисні, теплоізоляційні тощо)
Вид в'язучого	-на основі цементу; - на основі вапна та вапняних в'язучих - на основі гіпсу та гіпсових в'язучих - на основі спеціальних в'язучих
Вид заповнювача	-на щільних заповнювачах; - на пористих заповнювачах; - на спеціальних заповнювачах
Структура	-щільної структури; - поризованої структури; - ніздрюватої структури; - великопористої структури
Умови тверднення	-природного твердіння; - тверднення в умовах тепловологісної обробки при атмосферному тиску; -автоклавного твердіння (тепловологісна обробка при тиску вище атмосферного)

- видом клінкеру (на основі портландцементного клінкеру (без добавок, з добавками, шлакопортландцемент, шлаковий, пуцолановий, композиційний, тампонажний , лужний); на основі глиноземистого (високоглиноземистого) клінкеру; на основі сульфатоалюмінатного (сульфоферитного) клінкеру; лужні; на основі змішаного клінкеру);



- стандартною міцністю при стиску (класи від 10,0 до 32,5 відносяться до цементів зниженої міцності; від 32,5 до 42,5 – середньої (рядової) міцності; від 42,5 до 52,5 – підвищеної міцності; понад 52,5 – високоміцних) ;
- швидкістю твердіння (нормальнотверднучі, повільнотверднучі, швидкотверднучі, надшвидкотверднучі);
- строками тужавлення (повільнотужавіючі, нормальнотужавіючі, швидкотужавіючі);
- спеціальними властивостями (цементи до яких не висувають спеціальних вимог, за сульфатостійкістю, за об'ємною деформацією при твердінні, за тепловиділенням, за декоративними властивостями, за тампонажними властивостями).

Для кожного типу цементу встановлюються вимоги і методи контролювання показників якості та сфера застосування виробів з нього. Відповідно, приймаючи до уваги конкретні умови в яких буде працювати майбутня споруда, підбирають цемент для виготовлення бетону. Також у державному стандарті враховані основні протипоказання для використання, зведені за найменуванням та типом цементу [7, 54].

Вапно матеріал, що отримують випаленням карбонатних гірських порід, таких як вапняки, доломіт чи крейда, що переважно складаються з  $\text{CaO}$  та  $\text{MgO}$ . Для отримання вапна сировину обпалюють у спеціальних печах. Потім шматки обпаленого вапна гасять водою. В залежності від кількості води, яку застосовували для гасіння, можливо отримати наступне: гідратне вапно (кількість води 50-75% від маси вапна); вапняне тісто (кількість води у 3-4 рази більше маси вапна); вапняне молоко (кількість води у 10 разів більше маси вапна). Гідравлічне вапно достатньо швидко твердіє, а з часом набуває водотривкості. Застосовують його для виготовлення низькомарочних бетонів. Недоліками є низька міцність та низька морозостійкість.

Гіпс - це матеріал, який отримують методом термічної обробки гіпсової сировини. При твердінні гіпс має властивість розширюватися на першому етапі, в подальшому він дає усадку. Тому гіпс використовують як самостійний

матеріал для виготовлення виливок різних архітектурних деталей. В якості в'язучого використовують його властивість швидкого твердіння. Недоліком гіпсу є гігроскопічність.

Існують декілька видів заповнювачів. Щільні заповнювачі в свою чергу поділяють на дрібні та крупні. Найбільш відомим представником дрібних заповнювачів вважається пісок – природна або штучна мінеральна суміш зерен розміром від 5 до 0,16 мм. Завдяки високій міцності зерен піски можуть бути використані для практично всіх класів бетонів.

Крупний заповнювач використовується для утворення жорсткого каркасу бетону. До цього виду заповнювачів зазвичай відносять гравій та щебінь. Гравій це зернистий матеріал, утворений в результаті вивітрювання щільних гірських порід (крупність зерна від 5 до 70 мм). Щебінь – продукт дробіння гірських порід, гравію, валунів, доменних , сталеплавильних та інших шлаків.

Пористими заповнювачами вважаються матеріали з густиною зерен до 2 г/см<sup>3</sup>. Їх використовують для виготовлення легких бетонів, тепло- та звукоізоляційних засипок. Пористі заповнювачі поділяють на природні, які одержують у вигляді піску і щебню із пористих порід та штучних (керамзит та його різновиди, аглопорит, шлакова пемза, перліт та вермікуліт).

В щільній структурі зерна заповнювачів можуть торкатися одне одного (контактне розміщення) або знаходитися одне від одного на відстані (плаваюче розміщення). Бетон такої структури складається з суцільної матриці цементного каменю, в яку вкраплені зерна заповнювача. Вони використовуються у будівництві для зведення міцних та стійких конструкцій. Поризовані бетони містять внутрішні пори, які можуть бути створені додаванням пористих наповнювачів або спеціальних добавок. Він має покращені теплоізоляційні властивості і нижчу щільність, що робить його легким і економічним матеріалом.

Пористі бетони (комірчастий бетон), це особливий тип бетону, який має комірчасту структуру, що складається з безлічі дрібних порожнин. Він має

низьку щільність, відмінні теплоізоляційні властивості і хорошу акустичну ізоляцію.

Великопористі бетони: бетони мають великі повітряні порожнини або пори, що надає їм легшу структуру та низьку щільність. Вони часто використовуються в будівництві для зменшення ваги конструкцій та забезпечення хорошої теплоізоляції.

Умови твердіння: природне твердіння. Бетони цього класу залишають для твердіння під впливом навколишнього середовища, включаючи повітря та вологу. Процес твердіння відбувається природним чином і вимагає певного часу для досягнення потрібної міцності.

Тепловологісна обробка при атмосферному тиску. У цьому випадку бетон піддається контрольованому впливу підвищеної температури та вологості для прискорення процесу твердіння. Така обробка забезпечує більш швидкий та рівномірний розвиток міцності бетону.

Тепловологісна обробка при тиску вище атмосферного (автоклавне твердіння). В даному випадку бетон міститься в автоклав, де застосовується підвищений тиск та висока температура. Цей метод дозволяє прискорити процес твердіння та отримати більш міцний та щільний матеріал.

Як видно кожен з класів бетону має ті або інші особливості та недоліки. Науковці багато працювали над удосконаленням бетонів та можливістю підсилювати потрібні властивості. Розробки нашли свою реалізацію у вигляді створення різних добавок. використання добавок поліпшує характеристики розчину. Добавки, що регулюють властивості бетонних і розчинних сумішей бувають наступними [69, 61]:

- пластифікуючи, які підвищують рухливість бетонної суміші та знижують витрати води;
- водоредукуючі – дозволяють отримати високорухливі суміші з низьким вмістом води та з відносно невеликим об'ємом цементного каменю;
- стабілізуючі – забезпечують збереження консистенції суміші, що дозволяє запобігти її розшаруванню в період укладання та ущільнення;

- добавки, що регулюють збереження рухливості суміші. Особливо важливими такі добавки стають в спекотний період, при необхідності тривалого транспортування;
- добавки регулюючі повітряно- (газо) вміст суміші – підвищують морозостійкість, водонепроникність, стійкість до корозії та не впливають на міцність майбутньої конструкції;
- регулюючі кінетику твердіння бетону – вони можуть як прискорювати так і сповільнювати процес;
- підвищення міцність бетону до ударів та розколювання;
- знижують проникність речовини і підвищують щільність структури бетону;
- добавки, що підвищують корозійну стійкість бетону в умовах середовища, яке сприяє погіршенню властивостей матеріалу;
- розширювальні добавки застосовують з метою компенсувати усадку бетону в процесі експлуатації конструкції.

Під структурою бетону мають на увазі широкий комплекс понять, який включає будову матеріалу на різних рівнях, починаючи від атомно-молекулярних структур та закінчуючи макроструктурою бетону як композиційного матеріалу [13].

Розглядаючи бетон як поліструктурний матеріал, за характером та механізмами процесів структуроутворення дослідники виокремлюють три основні його структури [13, 18, 21, 44] :

- 1) мікроструктура – структура цементного каменю (конгломерат продуктів гідратації цементу, включень негідратованих зерен клінкеру, добавок та бульбашок повітря) яка може бути охарактеризована такими структурними складниками як кристалічний зросток, тоберморитовий гель, не до кінця гідратовані зерна цементу та поровий простір;
- 2) мезоструктура – структура цементно-піщаного розчину в бетоні, яку можливо розглядати як конгломератну структуру, де матрицею є цементний камінь, а заповнювачем – пісок;
- 3) макроструктура – двокомпонентна система ( розчин та крупний заповню-

вач), де в якості матриці розглядають цементно-піщаний розчин в якому розподілено крупний заповнювач.

Мікроструктура притаманна в'язучим. Вона формується при суміщенні в'язучих речовин, добавок, наповнювачів, дисперсних армуючих волокон. Властивості мікроструктури визначаються явищами, які протікають в контактї рідкої та твердої фаз, тобто кількісним співвідношенням цементу, води та наповнювачів, дисперсністю та фізико-хімічною активністю наповнювачів. В залежності від вказаних факторів формується конкретна мікроструктура цементного каменю, що володіє фізико-механічними і фізико-хімічними властивостями [36, 46, 62, 66].

Термін «нанотехнології» введений в 80-90-х р.р. ХХ століття означає мільярдну частину чого-небудь... В сучасному світі нанотехнології – це спосіб виробництва і використання матерії із заданою атомною структурою на рівні одиночних атомів, тобто усвідомлено використовуючи та направляючи атоми і молекули. Сучасні способи виробництва працюють з дозами речовин, які складаються з трильйонів атомів.

На сьогодні актуальними є розробки в області застосування нанотехнологій в будівельній галузі, а саме будівельних матеріалів. Застосування нанотехнологій дозволяє покращити властивості бетонів та інших композитних матеріалів, спрямовано регулюючи їх структуру в процесі виготовлення. Формування структури композитних матеріалів за допомогою мікро- і нанотехнологій будується на принципах ефективного використання в якості в'язучого висококонцентрованої суспензії, яка складається з цементу, мелених гірських порід та застосування, в разі необхідності, кремнеземистих наночасток з різними розмірами, а також полімерних модифікуючих добавок, в першу чергу – суперпластифікаторів. Науковцями встановлено, що введення до бетонної суміші нанорозмірних часток (зазвичай діаметром приблизно 100 нм) має суттєвий вплив на властивості бетону. Так використання наносилікатів з питомою поверхнею не менш ніж 180 м<sup>2</sup>/г і нових диспергаторів-гіперпластифікаторів на основі полікарбосилатів спеціального

молекулярного дизайну забезпечує отримання кардинально нових міцності та структури цементного каменю, утворюючи передумови для подальшого розвитку реактивних порошкових композитів з міцність на стиск близько 800 МПа, на розтягнення при вигині близько 100 МПа. При цьому наночастки карбонату кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ) дослідниками розглядаються як можливий тип прискорювача твердіння бетону. Додатковий потенціал для розвитку найбільш міцних, більш жорстких та більш довговічних конструкційних матеріалів являють собою вуглецеві наночастки, нанотрубки і нановолокна, які в промисловому масштабі виготовляються великою кількістю компаній. При введенні в цементну матрицю нанотрубок з діаметром близьким до товщини слоїв, спостерігається значна зміна її властивостей, таких як міцність при стиску та розтягненні. Хоча це збільшення не на стільки значуще в порівнянні з вартістю самих нанотрубок [14, 36, 44, 62, 63].

Ще більш важливим є питання зниження тріщиноутворення, особливо в поверхневих шарах високофункціональних цементних композитів, у «надпластичних бетонах», деформаційно ущільнюючихся цементних композитах. Нанотрубки також використовуються як датчики деформації, головним чином в конструкціях мостів та дорожнього одягу [8, 29, 44, 59]. Високим ступенем дисперсності характеризуються відходи виробництва феросиліцію – порошкоподібний кремнезем, який містить 85-95% аморфного  $\text{SiO}_2$ . Додавання його до складу цементного тіста змінює структуру цементного каменю: - збільшення кількості пор гелю діаметром  $(1-5) \times 10^{-2}$  мкм, - зменшується кількість капілярних пор діаметром пор більше  $(5-4) \times 10^{-2}$  мкм, що пов'язано зі зміною твердої фази цементного каменю – збільшення ступеню гідратації цементу та кількості дисперсних низькоосновних гідросилікатів кальцію [17, 67, 14, 33].

В сучасних технологіях виробництва бетону використовують різні хімічні добавки, що є одним з найбільш доступних, універсальних та гнучких способів впливу на регулювання структури та властивостей бетону, а також на технологію його виготовлення. В останні роки для виготовлення бетонних

сумішей нового покоління все більше застосування знаходять високоефективні полікарбонатні суперпластифікатори, що отримали назву «гіперпластифікатори» [33, 45, 50].

Окрім підбору оптимальних структурних показників, існує такий метод регулювання структуроутворення цементних композитів за рахунок активації твердіння в'язучих. Це доволі розповсюджений прийом, який використовується в будівельній галузі для отримання максимальної ефективності при виробництві залізобетонних конструкцій. Науковою основою теорії активації служить сучасні уявлення про процеси твердіння мінеральних в'язучих, дослідження закономірностей та механізмів утворення та розвитку просторових структур твердіння з урахуванням комплексу перетворення цементного каменю, води замішування, розчину і бетону [5,38,48].

Мезо- і макроструктури утворюються об'єднанням мікроструктури з мілкими та великими заповнювачами. Процес їх формування визначається наступними факторами: об'ємними долями в'язучих та заповнювачів, співвідношенням показників їх міцності і деформації, а також інтенсивністю взаємодії в контакті в'язуче-заповнювач. Заповнювачі можуть займати в бетонах до 80% і вище від кількості. Основною характеристикою якості в'язучої речовини і заповнювача при визначенні міцності композиту є величина їх міцності. Якість заповнювальної частини, характеризується окрім міцності ще комплексом показників: величиною питомої поверхні, гранулометричним, хіміко-мінералогічним, кристалохімічним складом, формою зерна, станом поверхні (топохімією), чистотою та свіжістю поверхні зерна або інших видів заповнювача, пористістю, текстурою часток, активністю по відношенню до цементного каменю, коефіцієнтами вологості та термічних деформацій [14, 18, 66].

Підвищити якість та ефективність використання дрібнозернистих бетонних сумішей можливо використовуючи технології самоущільнюваних бетонів. Їх можна отримати, якщо окремі компоненти, а особливо мінеральні



добавки, оптимально узгоджуються між собою за гранулометричними складовими і вмістом за обсягом водно-дисперсної суспензії «цемент - дисперсна добавка – вода» буде не менше 50% об'єму бетонної суміші [31].

За фракційним складом підбирають, як правило, суміші з найменшим об'ємом порожнин, через що забезпечується найменші витрати в'язучої речовини в композиті. Важливо також дотримуватися принципу найбільш рівномірного та однорідного розподілу зерен в об'ємі композиту, коли товщина найменших прошарків між зернами приблизно рівного діаметру є величиною порівняно постійною. Мінеральний зернистий матеріал різного фракційного складу розподіляється щільно у формі просторових ґраток – об'ємно-центрованої, кубічної, гексагональної, бінарної, потрійної, чотиривимірної та інше [5, 18].

В процесі утворенні контактної зони в бетонах значну роль відіграють фізико-хімічна взаємодія заповнювачів з цементним каменем (рисунок 1.2.1).

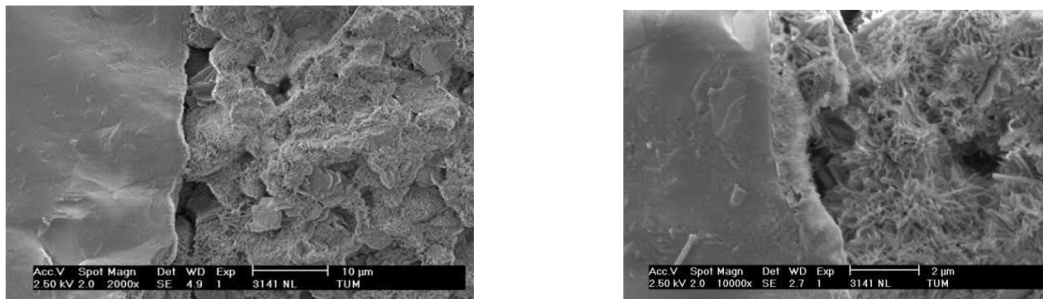


Рисунок 1.1 - Мікроструктури цементного каменю [18].

При взаємодії цементного тіста з кремнеземистими заповнювачами (мікрокремнеземом, піщаником, кварцем, туфом та інше) в нормальних умовах твердіння в контактній зоні утворюються в основному гідросилікати кальцію  $CSH(B)$ ,  $C_2SH_2$  та гідрогранати. Кварц та інші кремнеземисті наповнювачі більш повно взаємодіють в зоні контакту в алітових та белітових портландцементів, ніж з алюмінатним і алюмоферитовими портландцементами. Науковцями встановлено, що міцність адгезії цементного каменю з поверхнею вапняку набагато вище ніж з кварцем, гранітом та

іншими силікатними мінералами і породами. Мікрокристалічні новоутворення гідрокарбоалюмінати магнію і кальцію, зосереджені в контактній зоні, зростаються між собою та з поверхнею мікрозаповнювачів та зернистих заповнювачів. Хоча їх міцність не відіграє істотної ролі в міцності цементного каменю, тому що вміст  $C_3A$  в 10-20 разів менше, ніж  $C_3S + C_2S$ . Для карбонатних бетонів в якості наповнювачів та заповнювачів використовують щільні вапняки, водопоглинання яких не повинно бути більше 2-4% [14,18].

Для підвищення активності наповнювачів та заповнювачів їх можуть попередньо, до введення у в'язучу речовину або конгломерат, обробляти різними способами. Наприклад, додаванням поверхнево-активних речовин при помелі, освіженням поверхні часток, мінералізацією (при використанні органічних заповнювачів в поєднанні з неорганічними в'язучими речовинами), дробленням округлих часток, рифленням, розпушкою та інше [68, 67, 62]. Наявність лінії розділу фаз з надлишковою поверхневою енергією має значний вплив на технологічну поведінку навіть відносно грубодисперсних систем, таких як суспензія, цемент, мелені наповнювачі, колоїдних розчинах, золях, суспензіях наногідросилікатів кальцію. Область розмірів часток золь/гель характеризуються діапазоном 10-100 нм [53, 18, 38]. У цій розмірній системі дуже активна енергетика цих часток. Золь характеризується броунівським рухом. Гель має вже структурну міцність та систему пор, хоча відрізняється різким зниженням величини поверхневої енергії порівняно з золям. Це нижня межа дисперсності колоїдних часток однорідної зв'язково-дисперсної системи з рідким середовищем встановлюється по відношенню діючих на частки зовнішньої сили (сили тяжіння) і внутрішньої (сила їх зчеплення при контактній взаємодії). Значення співвідношення повинні бути менше одиниці. При низькій густині твердої фази, високій густині рідини та значній енергії контактної міжчасткової взаємодії часток розміром 100 нм відносно колоїдним наноструктурам. У цьому зв'язку розмір часток 100 мкм відносять до середньої межі розмірів наночасток в системі цемент-наповнювач-вода [8, 19, 60].

Роблячи висновок з вищевикладеного, бачимо, що при формуванні систем, які складаються з цементу, наповнювача, добавок і води, важливими параметрами для їх вивчення є наступні: хімічна природа поверхні твердої фази; вид і кількість домішок; розмір, форму і розподіл зміцнювальних часток; термодинамічний стан системи твердої фази; зчеплення і взаємодія проміж частками в матриці композиту; ступінь переваги сил адгезії або когезії між матрицею та заповнювачами бетону; ступінь пористості з урахуванням розміру, геометрії та розподілу пор в матриці і в об'ємі всієї структури бетону.

### **1.3 Фізико-механічні властивості бетонів**

Номенклатура сучасних композиційних будівельних матеріалів достатньо різноманітний. Найбільш використовуваними композитами вважаються композити на цементних в'язучих. До них відносять цементні клеї, розчини, бетони.

Цемент є головним матеріалом для виготовлення бетону. Цей матеріал підбирають виходячи з якостей які необхідно виділити для даного виду бетону: міцність, хімічна стійкість, тепловиділення, морозостійкість, водонепроникність та інше. Якісним вважається цемент з питомою поверхнею 3 500  $\text{см}^2/\text{г}$  та більше. Середній розмір часток в'язучого складає 15-20  $\mu\text{м}$ . Науковими розробками встановлено, що максимальна міцність цементного каменю досягається при використанні цементу з питомою поверхнею 4 800  $\text{см}^2/\text{г}$ . Підвищення цього показника призводить до росту міцності цементних композитів на 30-50% в залежності від ступеня наповнення, але подальше підвищення до 6 000  $\text{см}^2/\text{г}$  не призводить до подальшого росту міцності. В сучасному виробництві, поряд з традиційними видами цементів (портландцемент, шлакопортландцемент, пуцолановий, швидкотвердіючі та інші), використовують нові ефективні види в'язучого, які отримують шляхом

додаткового помелу цементу спільно з наповнювачами такими, що активуються при помелі та додаванні суперпластифікаторів. До таких в'язучих відносять тонкомолоті багатокomпонентні в'язучі, в'язучі низької водопотреби та інше, які мають підвищену призмову міцність, морозостійкість та водонепроникність [ 19, 58, 66, 17].

Багато часу рецепт виготовлення бетону не змінювався. Не змінювалися розмірні рівні компонентів, а кількість основного компоненту – цементу знаходилися в межах 150 ... 600 кг/м<sup>3</sup>. Інші сухі компоненти бетону за своїм розмірним рівнем знаходилися на міліметричному рівні.

На сьогоднішній день є п'ять варіантів застосування сухих компонентів з різними розмірними рівнями:

1. Мікротехнологічний з обмеженою кількістю мікрочасток.
2. Мікротехнологічний з високим вмістом мікрочасток.
3. Мікротехнологічний з високим вмістом мікрочасток та необхідною кількістю наночасток.
4. Нанотехнологічний з достатньою кількістю наночасток.
5. Нанотехнологічний з супермалими дозами наночасток.

Перший варіант – це звичайний рецепт бетону: цемент; пісок; щебінь; вода. Мікрометричний масштабний рівень має цемент з розмірами часток від 1 до 100 мк зі змістом його в бетоні від 200 до 500 кг/м<sup>3</sup>, рідше до 600 кг/м<sup>3</sup>. 97% цементів випускають за технологією, коли «грубих» наночасток з розмірами 500-1000 нм не перевищує 2-4%.

Другий варіант: цемент; дисперсна мінеральна добавка; пісок; щебінь; вода. Мікрометричний масштабний рівень має окрім часток цементу, дисперсна мінеральна добавка. Доля її 40-100% від маси цементу поповнює вміст нанометричних часток верхнього рівня до 4-8%.

Третій варіант: використовуються цемент, дисперсні наповнювачі з мелених гірських порід та техногенних відходів з додаванням реакційно-активних пуцоланових добавок (мікрокремнезем, дегідратований каолін, біла сажа та інше) з нанометричним розміром часток від середнього масштабного

рівня (10-100 нм) до верхнього (100-1000 нм). Цей варіант реалізують провідні закордонні фірми [26,27,44].

Четвертий варіант: використовують додавання до цементу пуцоланових реакційно-активних добавок щільної структури (мікрокремнезема) [44,53].

П'ятий варіант (нанометричний): додавання до звичайного бетону (цемент + пісок + щебінь) дуже малих доз нанометричних часток, в основному середнього нанометричного рівня (10-100 нм). В бетони вводять 0,01-0,005 % одномірних та багатомірних нановуглецевих трубок, фулеренів, фулероїдів, астраленів, шунгітів та інше [14,28,63].

## 2 СУЧАСНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БЕТОННИХ ТА ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

### 2.1 Вимоги до довговічності бетонних та залізобетонних конструкцій

Бетон як будівельний матеріал за складом вихідних матеріалів, структурою і характером зовнішньої поверхні зазвичай атмосферостійкий і практично не вимагає регулярного оновлення. Однак такі позитивні властивості бетонних конструкцій забезпечуються, якщо при проектуванні і виготовленні дотримано всіх вимог відповідних нормативно-технічних документів. Проте у бетонних конструкціях можуть виникнути дефекти, викликані фізичними і хімічними зовнішніми впливами, котрі часто неможливо передбачити. При своєчасному виявленні ще незначних дефектів (наприклад, утворення тріщин на бетонній поверхні), їх можна успішно на довгий час ліквідувати за допомогою відповідних захисних заходів [6].

Дуже часто на практиці важко визначити справжні причини виникнення дефектів. Завдяки багаторічному досвіду проведення ремонтно-відновлюваних робіт, варто зазначити, що до типових причин виникнення пошкоджень слід віднести [6, 18]:

- помилки, допущені при підборі складу бетонної суміші (наприклад, надто малий вміст цементу, недотримання постійного водоцементного співвідношення, неправильний гранулометричний склад заповнювача) і як наслідок, невірна густина структури бетону, зменшення його міцності, утворення тріщин і корозія арматури;
- помилки допущені в процесі бетонування (наприклад, додавання води до готової суміші під час укладки бетону в форму, недостатньо ефективного його ущільнення, перерви в бетонуванні). В результаті в бетоні виникають зони

розташування, порожнини, усадочні тріщини і робочі шви. Результати помилок представлені на рисунку 2.1;

- помилки, допущені в ході обробки бетонних поверхонь, що зумовлює усадочні тріщини, відшарування піску з поверхні бетону, а також тріщини на зовнішній поверхні конструкції;
- надто мала товщина захисного шару бетону, що може бути, наприклад,



Рисунок 2.1 - Наслідки неякісного ущільнення бетону [18].

наслідком відсутності фіксаторів арматурних елементів чи недбалого розташування фіксаторів в опалубці (рисунок 2.2). Ця обставина часто може тягнути за собою вельми небезпечні наслідки, що завдають серйозних пошкоджень залізобетонних конструкцій.

Різні процеси деградації викликає корозія, обумовлена хімічними і біологічними середовищами. До теперішнього часу розроблено основи теорії корозії бетону та арматури, способи забезпечення корозійної стійкості залізобетонних конструкцій в агресивному середовищі [49,51,56].

Різні процеси деградації викликає корозія, обумовлена хімічними і біологічними середовищами. До теперішнього часу розроблено основи теорії корозії бетону та арматури, способи забезпечення корозійної стійкості залізобетонних конструкцій в агресивному середовищі [8,9,20,24,70].

Проблеми підвищення довговічності бетону та залізобетону є актуальними для будівельної галузі. Вплив різних факторів значно погіршує



фізико-механічні показники бетону і зниження несучої здатності залізобетонних конструкцій в яких механічні навантаження дуже часто приводять до утворення тріщин, які з'являються в бетонах різного виду, що в свою чергу викликає корозійні процеси в бетоні та арматурі під впливом агресивної середовища. Проблема підвищення тріщиностійкості присвячено



Рисунок 2.2 - Недостатня товщина захисного шару бетону або його відсутності [18].

багато наукових досліджень [15,5,6,8,12,14,16,20,27,37,43,51,67].

В останній час, особливо при створенні унікальних будівель та споруд, застосовують бетони з підвищеною міцністю на стиск. Не дивлячись на те, що армування сталлюю фібрую та додаванням порошків покращує властивості бетону, більшість цих матеріалів все одно залишаються крихкими. Більш того, в деяких випадках в міру підвищення міцності на стиск його крихкість росте, що зумовлює потенційну небезпеку руйнування бетону [5,27].

В переважній більшості випадків руйнування бетону відбувається в результаті проростання однієї тріщини або сімейства розгалужених тріщин через його переріз. Такі тріщини часто називають магістральними. При експлуатації бетонної споруди магістральні тріщини довгий період часу можуть зовсім не спостерігатися, а потім з'явившись вони з великою швидкістю розповсюджуються у масиві бетону і руйнують його в короткий термін. При накопиченні деформації втомі в бетоні протікають наступні фізичні процеси: утворення зародкових мікротріщин, нестабільне зростання, розповсюдження або блокування тріщин в об'ємі, який містить структурні

елементи (кордони заповнювачів, пори в порожнини різного походження), що є перешкодами для мікротріщин. Зростання магістральних тріщин визначається станом та процесами у вершині цієї тріщини. В бетоні, який представляє собою неоднорідний матеріал тріщини можуть розвиватися в різних зонах: в цементній матриці, в заповнювачі, в контактній зоні. Тріщини мають тенденцію легко проникати з більш жорсткого в менш жорсткий матеріал. Зворотне явище викликає певні труднощі, тому можлива зупинка тріщин на кордоні розділу компонентів. При дослідженнях характеру мікроруйнувань в структурі бетону найбільша кількість тріщин утворюється в контактній зоні заповнювача – цементна матриця, причому тріщини по розподілу зчеплення були відкритими та безперервними. У всіх складах речовин спостерігалось проходження тріщин зчеплення в цементній матриці через пори. Тріщини зчеплення в більшості проходили по нижній межі зерен крупного заповнювача. Невеликі нерівності зерен не впливають на безперервність тріщин зчеплення. Тонкі тріщини в цементній матриці зазвичай розповсюджувались проміж сусідніми зернами крупного заповнювача, з яких достатньо одному мати тріщину зчеплення. Тріщини зчеплення з'явилися в результаті водовідділення та диференціальних об'ємних деформацій. Тому при дослідженнях стану мікроструктури бетонних конструкцій, які експлуатуються в умовах впливу агресивного середовища, підтверджена необхідність відновлення несучої здатності конструкцій шляхом нанесення захисного шару спеціального бетону [8].

За кордоном розроблено цементний матеріал який отримав назву модифікований цементний композит, що постійно удосконалюється. Цей матеріал характеризується високою пластичністю в діапазоні 3-7%, ширина тріщин біля 60 мкм і відносно низьким об'ємним змістом волокон – 2% чи менше. Модифікований цементний композит має такі ж властивості як і звичайний фібробетон, що є інноваційним будівельним матеріалом, який представляє собою цементно-піщану суміш до складу якої входять армуючі мікрочастинки (фіброволокно або фібра). За рахунок додавання до бетону

поліпропіленових, металевих, базальтових або скляних мікрОВОЛОКОН, суттєво підвищуються основні характеристики матеріалу, а також з'являються нові властивості. Наприклад звукоізоляція, теплоізоляція, стійкість до хімічно активних речовин (луги та кислоти), підвищена стійкість до ультрафіолетового випромінювання [27,68,69].

До складу модифікованого цементного композиту в якості основних компонентів входить вода, цемент, пісок, волокно та деякі домішки. До цього часу модифікованому цементному композиті використовують різні типи волокон та різні цементні матриці та його склад повинен задовольняти певним нормам. Одним з основних механічних властивостей є можливість витримувати більш високе навантаження після першого тріщиноутворення при великих деформаціях. Армовані модифіковані цементні композити сприяють обмеженню локалізованого крихкого руйнування матриць та забезпечують більш рівномірне розподілення мікротріщин. Завдяки можливості зміщення при ковзанні за рахунок впровадження волокон цей матеріал витримує підвищене навантаження, під впливом якого утворюються нові тріщини на інших ділянках.

Ширина тріщин є ще одним важливим показником, що характеризує міцність бетонної конструкції. Після деформації на розтяг приблизно до 1% раніш утворені мікротріщини припиняють розширюватися і залишаються в більш-менш постійному стані з шириною тріщин біля 60 мкм. Модифікований цементний композит може бути спроектований таким чином, щоб утворювалися численні близько розташовані мікротріщини, ширина яких набагато менша ніж ті, що звичайно спостерігаються в залізобетоні. Більш того самоконтроль ширини тріщини можливо розглядати як внутрішні якості матеріалу, та який не залежить від коефіцієнту армування залізною арматурою та розмірів конструкції [8,18,39,59,60,61,67,68 ].

Переваги використання модифікованого цементного композиту в якості ремонтного матеріалу полягає в тому, що механізм замурування, може слугувати в якості способу підвищення довговічності відновлюваної системи.

Була надана інформація про те, що на поверхні контакту модифікований цементний композит – бетон на вершинах дефектів виникали мікротріщини, які згодом поглиналися матеріалом модифікованого цементного композиту. Через це швидко зростаючу його міцність додаткове навантаження може призвести до подальшого тріщиноутворення на поверхні розділу після блокування розповсюдження ламаних тріщин, потім до наступної появи тріщин та їх блокування [8].

Тріщини та інші дефекти у залізобетонних конструкціях можуть виникати і за інших причин, наприклад при порушенні технології виробництва при армуванні, укладанні бетонної суміші (рисунок 2.3), твердіння бетону та фіксування арматури [8].

Різні процеси деградації викликає корозія, обумовлена хімічними і біологічними середовищами. До теперішнього часу розроблено основи теорії корозії бетону та арматури, способи забезпечення корозійної стійкості залізобетонних конструкцій в агресивному середовищі [8,18].



Рисунок 2.3 - Тріщини в конструкціях, викликані порушенням проектних та технологічних вимог [18].

Одним з напрямлень при розробці шляхів вирішення проблеми довговічності будівельних бетонних конструкцій є отримання бетонів з високими експлуатаційними якістьми. При цьому піднімають питання підвищення міцності бетону, а також забезпечення його високих спеціальних експлуатаційних якостей та здатність опору дії розтягуючого напруження. Зазвичай для вирішення цієї проблеми використовують різні технологічні

заходи, наприклад: зниження водоцементного відношення бетону; підбір високоякісних вихідних компонентів для бетонної суміші; підвищення ущільнення бетону в процесі формування виробу; призначення раціонального співвідношення компонентів в одиниці об'єму бетону. Однак рішення кожної технологічної проблеми окремо, як і їх комплексне вирішення, можливо тільки при певних обмеженнях. Як показала практика використання бетону в різних областях будівництва, кардинальне вирішення такої проблеми недосяжно. Підвищення бетоном супротиву розтягуванню дозволить створити новий клас високоефективних неармованих конструкцій, де бетон використовувався би найбільш повноцінно як будівельний матеріал для різних споруд в різних умовах навантаження. Вирішення поставленої технологічної проблеми, може проводитися тільки з допомогою комплексного використання всіх чотирьох принципів технології високоміцного бетону [19].

Підвищення надійності та корозійної стійкості залізобетонних конструкцій в агресивному середовищі може бути досягнуто створенням корозійно-стійких будівельних матеріалів нового покоління використанням економічних заводських технологій та нових видів сталевих арматур і неметалевої арматури високої надійності, дозволяючих забезпечити економію металу на 20-40 %. Тобто якість та довговічність будівель та споруд можуть бути забезпечені застосуванням корозійно-стійких конструкцій [8,18,39,59,60,61,67,68].

В міжнародних організаціях, таких як Комітет з досліджень і документації галузі будівництва (СІВ) та Міжнародна рада лабораторій з випробувань будівельних матеріалів та конструкцій (RILEM) розроблена та введена в дію система проектування будівель та споруд з урахуванням необхідної довговічності та умов експлуатації. Одним з перших та важливих моментів в цьому аспекті є створення нормативного документу, який нормує проектний термін служби тієї чи іншої будівлі або споруди (наприклад 10, 20, 30, 50, 100). Встановлення заданого терміну експлуатації дозволяє

обґрунтовано вибирати матеріали, вироби, призначати первинний або вторинний захист, тривалість міжремонтного періоду та інше.

Існує система проектування будівель та споруд, вибору первинного або вторинного захисту стосовно умов експлуатації конструкцій з урахуванням властивостей будівельних матеріалів та виробів. Вимоги цієї системи викладені у СНіП 2.03.11-85 «Захист будівельних конструкцій від корозії» та ДСТУ б В.2.6-145:2010 «Захист бетонних та залізобетонних конструкцій від корозії». Невиконання вимог нормативних документів та порушення технологій виробництва будівельних робіт часто призводить до руйнації і виходу з ладу будівельних конструкцій раніше закінчення терміну їх служби. Особливо названі проблеми виявляються при експлуатації інженерних споруд. Найбільш швидко ушкоджуються такі споруди як мости та шляхопроводи; підземні переходи і переходи над залізничними коліями; комунальні тунелі та канали, колектори стічних вод; підземні споруди типу підвалів; фундаментні споруди та інше. В переважній більшості випадків основними причинами ушкоджень стають корозійні процеси, які розвиваються в результаті несприятливого впливу навколишнього середовища. Більшість шляхопроводів та мостів руйнуються від застосування реагентів проти ожеледиці, виділення в атмосферу оксиду азоту, стернистого та інших газів, що викидаються в атмосферу двигунами автотранспорту, промисловими підприємствами, від розморожування бетону [10,20,56,64]. Щорічні аварійні обвалення комунальних тунелів, особливо колекторів стічної води, відбуваються в результаті газової корозії залізобетонних елементів.

За даними різних обстежень, аналізу проектних матеріалів та експертної оцінки спеціалістів, агресивному впливу піддаються в різних напрямках господарства від 15 до 75 % будівельних конструкцій будівель та споруд. Значний вплив на довговічність будівель і споруд має якість будівельної продукції, дотримання нормативної періодичності огляду споруд та їх ремонтів, відповідальна експлуатація жилого та промислового фонду. Тобто для подовження термінів служби будівель та споруд, створених з бетону та

залізобетонних виробів треба використовувати комплексний підхід і дотримуватися нормування процесів проектування, будівництва, системи ремонтів та захисту конструкцій.

## **2.2 Методи відновлення, посилення та ремонту залізобетонних та бетонних конструкцій сучасними матеріалами**

### **2.2.1 Сучасні матеріали для виконання відновлюваних та ремонтних робіт**

Останнім часом стосовно ремонту залізобетонних конструкцій використовують такі терміни як «санация» або «лікування», тобто проводяться роботи не тільки з відновлення властивостей матеріалів та споруд, але й застосування заходів, що можуть покращити їх властивості. Тому фінішним етапом ремонтно-відновлюваних робіт є забезпечення захисту конструкції в цілому [6].

На сучасному ринку будівельних матеріалів наявний багатий асортимент ремонтних матеріалів, тому треба звертати увагу на параметри композицій, які свідчитимуть про ефективність її використання [6]:

- основні міцнісні параметри ремонтних шарів;
- швидкість набору міцності в часі;
- прилипання до бетонної основи в умовах відриву і тиску;
- коефіцієнт пружності при розтягу;
- усадка схоплювання;
- коефіцієнт Пуассона.



Але інколи, в залежності від індивідуальних умов в яких працює конструкція, що підлягає ремонту, окремі параметри по-різному можуть впливати на підбір відповідної ремонтної системи.

Підбираючи матеріали для ремонту, слід керуватися простим економічним розрахунком. Через значні фінансові витрати, що випливають з ціни матеріалів, слід особливо уважно визначати не тільки вихідні параметри для проектування ремонтних робіт, вимоги до властивостей ремонтних композицій, але й враховувати трудомісткість робіт, пов'язаних з забезпеченням можливості доступу до місця ремонту інженерних споруд – ліси, підвісні конструкції, використання техніки промислового альпінізму та інше.

Відновлення бетонних і залізобетонних конструкцій з порушеною цілісністю пов'язано з труднощами в забезпеченні монолітного та надійного з'єднання нового матеріалу з матеріалом основи.

Аналіз матеріалів, які використовують для проведення ремонтних робіт показав, що хоча для проведення ремонту бетонних та залізобетонних конструкцій застосовують рецептури мінеральної, полімерної або змішаної природи, перевага віддається останнім. Такі системи характеризуються досить високим фізико-механічними характеристиками і цікаві з погляду сполучення речовин різної хімічної природи з досягненням нових технічних результатів, і можуть бути отримані практично на будь-яких синтетичних полімерах, наповнювачах і заповнювачах. У силу різних причин, у тому числі зв'язаних з вартістю і дефіцитністю, а також вимогами до щільності, міцності, деформативності, хімічної стійкості і ряду інших характеристик, використовується невелике коло полімерів (12-15 видів). Однак проблема ремонту бетонних і залізобетонних конструкцій ускладнюється також і тією обставиною, що вибір загальновідомих матеріалів, які можна ефективно використовувати для відновлення цілісності бетону і каменю, досить обмежений [20, 6, ].

Виходячи з усього вище сказаного, важливими й актуальними проблемами для підтримки в нормальному, технічно справному, стані конструкцій інженерних споруд є розробка нових ефективних матеріалів і практичних методів підвищення довговічності залізобетонних конструкцій, що експлуатуються.

### **2.2.2 Види матеріалів, що застосовуються у зв'язку з необхідністю поліпшення експлуатаційних властивостей будівельних конструкцій**

Для конструкційних матеріалів, що застосовуються в будівництві, важливими характеристиками, що мають вплив на інші властивості, є міцність, пружнопластичні властивості, фізико-хімічний спротив, морозостійкість. Наприклад, підвищення щільності матеріалу призводить до зростання його міцності, а також фізико-хімічного спротиву і морозостійкості [7,11,18,44].

Експлуатаційні властивості матеріалу включають його здатність чинити опір агресивному впливу, який сприймається в першу чергу поверхневими шарами. Тому наскільки ефективна здатність спротиву залежить збереження всього матеріалу в цілому [27,44]. Поверхня матеріалу представляє собою поверхню розподілу контактуючих фаз. В його складі містяться зв'язані фазові елементи в різному співвідношенні. З часом матеріал граничного шару отримує стан рівноваги з зовнішнім середовищем і стає найбільш пристосованим до неї. Стає зрозумілим позитивний вплив на фізико-хімічний спротив композитів їх затвердіння з застосування середовища, які в подальшому будуть впливати на матеріал.

Обробка матеріалу, який призначається для роботи в умовах дії агресивного середовища, повинна не тільки передбачати можливість покращення якості його поверхні, тобто забезпечення меншої проникності та більшої інертності, а також позитивного впливу на внутрішні шари, зокрема

зберігати або не зменшувати в значному ступені їх міцності. Виходимо з того, що чим більш затвердів матеріал до обробки, тим більш ймовірна перебудова структури його внутрішніх шарів з критичною втратою міцності. Тому заслуговує уваги спосіб покращення експлуатаційних властивостей композитів як на органічних так і на неорганічних в'язучих речовинах, шляхом обробки їх активними речовинами, які сприяють збереженню внутрішньої основи матеріалу та забезпечувало підвищення його фізико-хімічного спротиву.

Активним вважається середовище, яке при взаємодії зі складовими матеріалами має значний вплив на його властивості. Середовище може бути фізично або хімічно активним. Однак співвідношення фізичних і хімічних процесів при лії активного середовища може бути різним. Якщо властивості матеріалу змінюються при відсутності хімічної взаємодії, то вочевидь діюче середовище називають фізично активним. Наприклад сюди можна віднести середовища, що призводять до пластифікації та адсорбуючого ефекту зниження міцності матеріалу, фізично розчинні та вимиваючі його компоненти. В тих випадках, коли зміна властивостей визначається хімічною взаємодією складових матеріалів і середовищ це є хімічно активним середовищем.

Обробка поверхонь композита активними речовинами може призводити до наступних наслідків: до отримання щільної та більш інертної до змін поверхні, ніж внутрішня частина матеріалу, поверхня, що призводить до підвищення його фізико-хімічного спротиву, іноді міцності, декоративності, покращенню їхніх властивостей; згладжування поверхневих дефектів матеріалів без змін або зі змінами змісту поверхневого шару, який сприяє підвищенню його міцності, а іноді і фізико-хімічного спротиву; до підвищення щільності поверхневого шару зі збереженням змісту, що є фактором підвищення міцності та фізико-хімічного спротиву матеріалу.

За даними наукової літератури, наслідками обробки цементного композиту активними речовинами, а відповідно і засоби поліпшення

експлуатаційних властивостей базуються на хімічній взаємодії середовища з його складниками з утворенням малорозчинних речовин, ущільнюючих та зміцнюючих структуру матеріалів. Цілеспрямований вплив спеціальних речовин дозволяє покращити властивості матеріалу – підвищити їх міцність та фізико-хімічну стійкість.

В практиці будівництва відомі явища карбонізації, ократування, флюатування цементних бетонів, коли вони піддаються впливу відповідно вуглекислою, чотирьохфтористим кремнієм та солями кремнефтористоводневої кислоти.

Карбонізація передбачає вплив на цементні композити газу, що містить діоксид вуглецю. При цьому гідроксид кальцію взаємодіє з вуглекислим газом з утворенням малорозчинного з'єднання – вуглекислого кальцію. Сенса ократування – обробка цементних матеріалів парами чотирьохфтористого кремнію з метою підвищення їх щільності, сульфатостійкості та кислотостійкості. Метод був розроблений фірмою з Голландії «Ократ» та отримала її ім'я. Флюатування – просочення цементних бетонів різного ступеню карбонізації розчинами флюату (солями кремнефтористо-водневої кислоти). Найбільше застосування для цих цілей знаходить флюат магнію. Отримані нерозчинні у воді речовини  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$  відкладаються у порах та ущільнюють поверхневий шар цементного бетону. В результаті зменшується його водопоглинання та підвищується фізико-хімічний спротив. За такою ж методою був розроблений спосіб підвищення стійкості бетону шляхом обробки його поверхні розчином кремнефтористо-водневої кислоти.

Аналізую експериментальні дані, що приведені у науковій літературі, можна відмітити ефект від обробки матеріалу активними речовинами визначається його структурою та складом, режимом попередньої термообробки, вологістю, концентрацією середовища та часом дії. Однак поєднання таких факторів може мати як позитивний так і негативний вплив на експлуатаційні властивості цементних матеріалів. Міцність та фізико-хімічна стійкість бетону при кремнефторуванні знаходиться у залежності від тиску

газу, його концентрації, тривалості обробки. Міцність цементного бетону при карбонізації також може бути збільшена або зменшена. За оптимальних параметрів середовища і бетону тривалість його обробки вуглекислим газом, яка приводить до збільшення міцності, може займати від кількох годин до однієї доби [9,52,70]. Підвищення міцності при оптимальних параметрах середовища і бетону може досягати 50-100%. Зміна міцності матеріалу залежить від виду цементу та змісту в ньому клінкерної складової. Так дослідження властивостей зразків, які пройшли процес прискореної карбонізації 9% CO<sub>2</sub> при 20°C та відносною вологістю 65%, показали, що при наявності клінкеру в цементі більше 40%, міцність композиту може підвищитися до 70%, якщо менше 40%, то вона може знизитися на 50%. Самою реакційною складовою у цементному камені є гідроксид кальцію, що вочевидь зміна міцності залежить від його змісту. Якщо це гранична величина, то навіть незначна за тривалістю карбонізація може знизити міцність через розпад з'єднань цементного каменю через порушення лужного середовища. Зниження рН порової рідини порушує умови стійкості гідратованих мінералів цементного каменю, які піддаються гідролізу аж до гідроксидів кремнію, алюмінію, заліза, а всі основні оксиди перетворюються в карбонати [6,25,32,38,46].

Крива змін міцності має екстремальний характер і при обробці цементного бетону фтористим воднем. Концентрація HF в дослідах становила 0,01; 0,1 та 1 мг на 1 л, а відносна вологість – 100, 96 та 70%. Встановлено, що зразки з цементно-піщаного розчину складом 1:4 та розміром 30 x 30 x 30 мм спочатку збільшують міцність, потім по мірі витримки в середовищі з концентрацією HF 0,1 і 1 мг/л знижують її. При концентрації HF 0,01 мг/л зниження міцності розчину не було виявлено. Можливо припустити, що час обробки в цьому випадку було недостатнім для того, щоб прореагувало гранична кількість гідроксиду кальцію, перевищення якого веде до перекристалізації гідросполуки цементного каменю. При оптимальних режимах обробки цементних матеріалів активними середовищами відмічалось

утворення щільної, міцної й більш інертної структури, а відповідно і з більш високим хімічним супротиву. При цьому збільшилася середня густина матеріалу, зменшилось його водопоглинання. Кремнефторування збільшує масу зразків від 2 до 10%, водопоглинання знижувалося на 8%. Збільшення маси зразків при карбонізації також знаходилося в прямій залежності від їх зміцненні. Якщо вплив активним середовищем перевищувало допустимі межі, то це приводило до втрати маси матеріалу та його руйнуванню. Встановлено, що відсутність вологи хімічна взаємодія  $\text{CO}_2$  і  $\text{SiF}_4$  з цементним каменем не відбувається. Цементно-піщаний розчин карбонізується з найбільшою швидкістю при вологості 1-3%, а пористий бетон – при 10-25%. Найбільша швидкість поглинання  $\text{SiF}_4$  відмічалася при початковій вологості бетону 0,5-1%. При підвищенні вологості на поверхні з'являються краплі вологи і процес згасав. Мокрий бетон під дією  $\text{SiF}_4$  руйнувався.

Утворення міцної та щільної плівки на поверхні цементних композитів відбувається тоді, коли система збережена в своїй основі, а поверхневий шар утворюється за участю процесів, які направлені на збереження матеріалу. Для підвищення міцності та фізико-хімічного спротиву цементних матеріалів необхідно підібрати такі активні речовини та умови обробки, які сприяли б реакції з утворенням мало розчинних, менш активних, ніж вихідні продукти, речовини, міцно пов'язані з основою без порушення його рівноваги. При цьому інтенсивність впливу не повинна перевищувати межу, за якою йде розпад основних структуроутворюючих мінералів цементного каменю.

Суттєвим недоліком звичайних бетонів є розгалужена мережа пор, капілярів, різних мікродефектів, що утворюються при формуванні бетонних і залізобетонних виробів, їх твердінні та при експлуатації. Дефекти і пори знижують міцність бетону та його довговічність, а також стійкість до впливу агресивного середовища, тому що відкривають доступ всередину бетону. Властивості бетону можливо змінити, якщо пори та капіляри заповнити іншою речовиною. Для цього готові бетонні та залізобетонні вироби або конструкції піддають спеціальній обробці, яка включає сушіння, вакуумування,

просочення спеціальним розчинами і полімеризацію при просочуванні мономерами. Остаточні властивості матеріалу залежать від властивостей бетону, що оброблюється; речовини яка використовується для заповнювання пор; технології обробки. Ці матеріали називають бетонополімерами. Окрім мономерів, для просочення використовують термоактивні смоли, полімерсилікатні, сірчані та інші композиції. Полімери твердіють в порах бетону, мономері полімеризуються в процесі просочення конструкції і тим самим знижуючи пористість, збільшуючи щільність, водопроникнення та інші показники якості поверхні або всього об'єму бетонної конструкції в залежності від глибини просочення. Таким чином, в результаті просочення бетону отримують матеріал, що має більш високу хімічну стійкість а інколи покращені міцність та показники деформації.

Технологічно обробка поверхні залізобетонної або бетонної конструкції може в спрощеному варіанті виглядати як закриття тріщин методами просочення та ін'єктування. Закриття тріщин методом просочування показано на рисунку 2.4. Зазвичай просочення має на увазі заповнення тріщин матеріалом без додаткових пристроїв та без примусового тиску. Цей метод вважається найбільш простим з точки зору технології. Перед початком процедури просочення поверхня конструкції повинна бути очищена від бруду та пилу за допомогою промислових пилососів, або струменя стиснутого повітря. Ін'єктування – заповнення тріщин матеріалом через спеціальні пристрої, які мають назву ніпелі (пакери) під тиском (рисунок 2.5). При використанні такого способу ремонту необхідно застосування додаткового



Рисунок 2.4 - Закриття тріщин методом просочення

обладнання. Для перемішування і нагнітання ін'єкційних матеріалів застосовують як ручні інструменти так і змішувачі та нагнітаючі пристрої (насоси, компресори) [18].

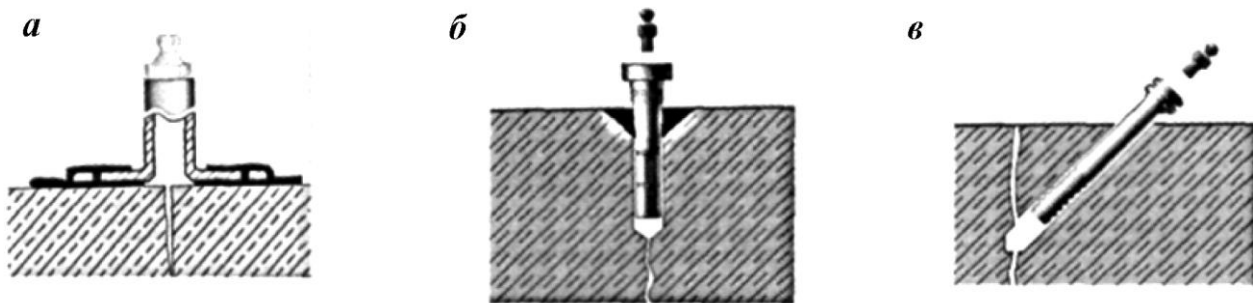


Рисунок 2.5 - Види пакерів для заповнення тріщин методом ін'єктування: а – пакер, що наклеюється; б – пакер, що встановлюється в отвір; в – пакер, що встановлюється в отвір під кутом [18].

### 2.2.3 Методи посилення залізобетонних конструкцій

Відновлення захисного шару залізобетонних конструкцій методом нарощування виконується шляхом нанесення на підготовлену поверхню ушкодженої конструкції шару розчину або бетону з розрівнюванням. Спосіб відновлення та нарощування захисного шару використовується при ремонті та посиленні сильно ушкоджених залізобетонних конструкцій будівель та інших споруд. Міцність зчеплення та інші властивості покращуються при відновленні захисного шару залізобетонних конструкцій шляхом нанесення під тиском стислого повітря на підготовлену поверхню конструкції одного або кількох шарів розчину або бетонної суміші. Метод відновлення та посилення шляхом використання торкет-бетону в розчинній суміші, що наноситься методом набризку, отримав назву «торкетування». Цей процес не забезпечує однорідність щільності бетону по перерізу шару, який наноситься. Ближче до поверхні відновлений шар має меншу міцність та більш рихлу структуру, ніж



в зоні контакту з поверхнею конструкції, що ремонтується, у старого та нового бетону, різні властивості деформації. У відновленого шару низька міцність та корозійна стійкість, висока матеріало- та енергоємність.

Посилення збільшенням перерізу (нарощуванням) в залежності від посилюваного та підсилюючого матеріалу и значних об'ємах робіт може здійснюватися також прикріпленням додаткових штучних бетонних або залізобетонних елементів. Підсилюючий елемент може бути як з аналогічним підсилюваному матеріалу, так і з іншого [15,74].

Для підвищення міцності щеплення захисного шару, що наносять, з покращеними показниками водопроникності, морозостійкості та корозійної стійкості при укладанні бетону пропонується використовувати вібраційний щит. При нанесенні на підготовлену поверхню залізобетонних конструкцій за допомогою вібраційного щита шару бетонної суміші більший ефект досягається коли одночасно ущільнюють поверхневу та глибинну зони контакту з поверхнею залізобетонної конструкції. Це сприяє також віброактивації цементу, тому що вібраційна обробка руйнує коагуляційні структури його зерен, що прискорює реакції гідратації з формуванням більш щільної структури цементного каменю.

Світовою наукою досліджуються методи найбільш ефективного застосування ремонтних матеріалів з використанням силікатних, полімерних та інших композицій, що використовують у вигляді просочення і покриттів [5,35,56]. Матеріали, які отримують на основі просочування бетону мають переваги але їх промислове виробництво виправдано тільки в тому випадку, коли будівельна конструкція має значний нормативний термін експлуатації (наприклад для мостів та інших споруд транспортної структури він складає більш ніж 100 років). В іншому випадку через більшовартість застосування бетонополімерних виробів є недоцільним. В таких випадках ефективно застосовування різних покриттів, які виконують захисні функції та функції відновлення. Найбільш поширені композиції для отримання самозагасних і вогнетривких покриттів є композиції на основі кремнійорганічних смол, а

також вони містять похідні галогенів. Завдяки вмісту великого проценту кремнію, а також специфічній будові макромолекули кремнійорганічних полімерів покриття на їх основі здатні витримувати вплив відкритого полум'я. Такі композиції можуть використовуватися для вогне- та антикорозійного захисту бетонних, металевих та дерев'яних поверхонь, використовуваних в хімічно агресивному середовищі, а також для поліпшення фізико-механічних та експлуатаційних показників поверхні, що оброблюється.

Головними недоліками цих композицій є дорожнеча та велика кількість добавок. Також недоліком є низька твердість. Окрім того покриття з вмістом великої кількості кремнійорганічних або інших смол потребують спеціальних умов затвердіння, наприклад високих температур, що ускладнює їх широке використання.

До теперішнього часу активно використовуються методи посилення залізобетонних та інших конструкцій за допомогою металевих елементів, що дуже часто замінюють полімерними матеріалами. Армовані пластики – високоміцні лінійно-пружні матеріали як основа для зовнішнього армування залізобетонних конструкцій є альтернативним варіантом по відношенню до сталевих елементів підсилення. Для ремонту залізобетонних конструкцій зазвичай використовують елементи у вигляді стрічок та полотен, однак в останні роки із композиційних матеріалів виготовляють також гладку та рифлену арматуру, дріт, канати, пасма, каркаси та оболонки, які використовують в основному при новому будівництві.

Посилення залізобетонних конструкцій шляхом зовнішнього армування попередньою напругою арматурних пучків використовуються як будівельний метод з 50-х років минулого сторіччя. В теперішній час попередня напруга арматурними пучками використовується для посилення залізобетонних конструкцій у США, Японії, Швейцарії та інших країнах. Одна група композитів ґрунтується на використанні тканин (полотен) з розташуванням волокон в одному або декількох напрямках. Полотна постачаються в рулонах і застосовуються при «мокрому» способі посилення. Вони наклеюються на

поверхню конструкції, що посилюється, пошарово за допомогою спеціальних епоксидних та інших смол з просочуванням смолами кожного шару. Композит формується при затвердінні смоли в природних умовах. Композити іншої групи (ламінати) жорсткі. Вони виробляються в промислових умовах шляхом просочування тканини полімерними речовинами з наступним формуванням пакету із необхідної кількості шарів тканини та протягуванням через систему валків з пресуванням і термообробкою до повного затвердіння смоли. В результаті отримують жорсткі стрічки. Ламінати виготовляють довжиною до 250 м, шириною 5-15 см та товщиною 1,2-1,5 мм. Їх доставляють на будівельний майданчик в рулонах і вже на місці розрізають спеціальним інструментом на відрізки необхідної довжини. Вартість ламінатів значно вища вартості полотен, однак трудомісткість робіт при їх використанні може бути нижче ніж при «мокрому» (пошаровому) методі посилення.

Посилення залізобетонних конструкцій композиційними матеріалами може реалізовуватися шляхом зовнішнього армування – приєднання до існуючої конструкції за допомогою полімерного клею або сполучного на мінеральній основі. Композиційні матеріали на полімерному в'язучому, які використовують для ремонту і посилення будівельних конструкцій, розподіляють на дві групи: ті, що формуються на будівельному об'єкті при виконанні робіт; промислового виготовлення. Композити для зовнішнього армування дуже дорогі, але вони не мають альтернативи за показниками міцності та опору втомі. Наприклад, вуглеволокно за цими показниками в два рази перевищує сталь. Вуглецеві волокна безперервно вдосконалюються, підвищується їх міцність, зростає асортимент. Один з перспективних шляхів зниження ціни – використання нафтових та інших пеків (тяжких поліхроматичні сполуки) в якості вихідної сировини. Вуглецеві волокна і композити з них мають чорний колір, добре проводять електрику, що визначає та обмежує галузь їх застосування. Посилення вуглепластиками дозволяє проводити реконструкцію в короткі терміни, є більш економічним в порівнянні з традиційними методами, збільшує термін служби елементів. Переваги

систем зовнішнього армування на основі вуглепластику: елементи посилення мають невелику масу в порівнянні з поширеними рішеннями з посилення сталевих елементів; для монтажу систем високоміцного посилення не потребує спеціальної техніки для підйому вантажів, всі матеріали легко пересуваються вручну [5,15, 44,47,68].

### 3. САМОВІДНОВЛЮВАНІ БЕТОНИ

#### 3.1 Інтелектуальні композити , передумова розробки самовідновлюваних бетонів

Якість бетонних конструкцій головним чином залежить від декількох параметрів: міцність на стиск, проникність та стійкість до дії агресивного середовища. Зазвичай коли в бетоні розповсюджується тріщина проводяться огляди та ремонти шляхом їх заповнення шпаклівками на основі епоксидної смоли, латексних та інших сполучних речовин, приклеювання склопластикових, металевих та інших елементів. Однак традиційні прийоми мають безліч несприятливих особливостей, таких як різні коефіцієнти теплового розширення бетону та посилюючого матеріалу, слабе зчеплення, небезпека для оточуючого середовища та здоров'я, а також висока собівартість.

Останні роки, поряд з постійним вдосконаленням існуючих матеріалів, обумовлюючих суттєвий технічний та економічний ефект дякуючи унікальному поєднанню властивостей, з'явилися тенденції створення нових матеріалів, здатних до активної взаємодії з зовнішніми факторами [40,65,68]. Такі матеріали отримали назву «інтелектуальних». Вони можуть «відчувати» свій фізичний стан, зовнішній вплив та особливим чином реагувати на ці «відчуття», тобто здатні здійснювати самодіагностику з виникнення та розвитку дефекту, його усунення та стабілізувати свій стан в критичних зонах. В наслідок різноманіття властивостей «інтелектуальних» матеріалів їх застосування дозволяє контролювати і прогнозувати стан різних конструкцій та споруд в необхідний момент часу і навіть на важкодоступних ділянках, значно підвищити ресурс систем та їх надійність [28,66,68,77].

Дослідники розробляли різні хімічні методи створення самовідновлюваних бетонів [77,83]. Згідно декількох припущень відновлювана речовина вміщала в середину мікрокапсул. Коли бетон розтріскувався вони руйнувалися, відновлювана речовина вивільнялася та заповнювала тріщини. Випробувано багато відновлюваних речовин: епоксидних смол, ціанакрилати, розчини діоксиду кремнію в лугах та інші. Виявлено, що матеріал може відновлювати свою механічну міцність майже такою ж мірою, як при цементуванні тріщин вручну. Такі засоби мають деякі загальні якості, а саме низку в'язкість для забезпечення більш широкої області ремонту і відмінного зчеплення між поверхнею тріщин, а також достатньої капілярної сили для переміщення відновлювального засобу в глибину тріщини. При використанні мікрокапсул після застосування всієї капсули в цьому місці в бетоні утворюється постійна порожнина. Капілярні трубки, які використовуються в медицині для взяття аналізу крові, можуть також використовуватися для «лікування» бетону в якості інкапсулюючих трубок. Ще одним методом є використання безперервних скляних трубок для закриття великих тріщин, що дозволяють замінювати відновлюючий засіб, а також є можливість передбачити подання додаткового засобу. Однак при використанні деяких хімічних речовин, які від самого початку призначені для ущільнення тріщин, бетон стає більш тендітним. Отже при реалізації цього підходу існує ймовірність зниження терміну служби бетону [14,41,42,75,83].

Однією з проривних технологій в області отримання ефективних будівельних матеріалів є біотехнології, засновані на використанні мікроорганізмів. До теперішнього часу на високому науково-технологічному рівні розроблені матеріали, що тримані за допомогою мікробіологічного синтезу. До них в першу чергу відносять пластики з деревини, клеї, біосуперпластифікатори та пінобетони [58,65,66,68,73].

Багато дослідників вивчали застосування виробляемого бактеріями кальциту для підвищення терміну експлуатації цементних споруд та

відновлення будівель методом усунення тріщин, підвищення міцності бетону, зниження проникності, зменшення водопоглинання [8,9,11,15,28,30,39,46,72].

В більшості випадків бактеріальний бетон застосовували для обробки з метою ліквідації наслідків тріщиноутворення. Це не можна вважати чистим процесом «самовідновлення», тому що його застосовували після розтріскування. В таких дослідженнях було виявлено ефективно закупорювання тріщин і відновлення механічної міцності бетону, обумовлене наявністю в матриці достатньої кількості органічних речовин через присутність мікробної біомаси. Проведено всього декілька досліджень самовідновлювання бактеріального бетону в прямому сенсі цього поняття. Також невелика кількість експериментів по самовідновлюванню модифікованих цементних композитів з додаванням мікроорганізмів. Їх результати демонструють, що іммобілізовані бактерії є проміжною ланкою при осадженні мінералів. Встановлено, що бактерії та деякі види необхідних поживних речовин не мають негативного впливу на характеристики міцності бетону. Через це можливо зробити висновок про потенційну можливість лікування тріщин в бетоні під контролем бактерій в результаті утворення мінерального осаду.

## **3.2 Розробка самовідновлюваних бетонів методом обробки мінеральних в'язучих мікробіологічною добавкою**

### **3.2.1 Усунення тріщин**

Більш ефективну ліквідацію тріщин за рахунок застосування мікроорганізмів порівняно з традиційними способами ремонту проводили з використанням ґрунтових бактерій виду *Bacillus pasteurii*, іммобілізованих та

захищених в поліуретановому полімері, вапні, тонкому кремнеземному порошку і золи-віднесення. В результаті міцність на стиск та жорсткість відновленого бетону значно підвищилася. При цьому виявилось, що міцність на стиск була приблизно на 5% вище ніж у зразках з відсутністю іммобілізованих мікроорганізмів в порожнинах матеріалу.

Результатами досліджень підтвердили позитивну перспективу використання виробленого бактеріями *Bacillus sphaericus* карбонату для усунення тріщин в бетоні. Дослідницька група повідомила про повну герметизацію штучно створених тріщин шириною 0,3 мм та глибиною 10 мм та відмітила, що проникність бетону була значно менша ніж при загортанні тріщин цементним розчином. Також повідомлялось, що при обробці кальцитом мікробіологічного походження міцність на стиск зразків, що були оброблені може бути відновлена до 84% [6,18,22,23,83].

### **3.2.2 Покращення механічних характеристик бетону**

В закордонній практиці проведені випробування з метою вивчення доцільності використання біологічного бетону для підвищення міцності на стиск бетону і цементного розчину [79,80]. При проведенні експериментальних досліджень до бетонної суміші вводили різні мікроорганізми. Вивчалось включення в цементний розчин бактерій виду *Bacillus pasteurii* в різних концентраціях. На 7-й та 28-й день спостерігалось значне збільшення міцності на стиск бетонів, обумовленого наявністю у матриці достатньої кількості органічних речовин завдяки бактеріальній біомасі.

В дослідженнях [73,79] вивчали вплив нового типу термофільних анаеробних мікроорганізмів виду *Shewanella* на міцність на стиск зразок цементного розчину. На 28-й день зазначено підвищення цього показника на



25-30%. Інші вчені [11,19,37,49,70,84] вибрали для впровадження в зразки бетону бактерії видів *Bacillus pseudofirmus* та *Bacillus cohnii* та виявили 10% збільшення міцності на стиск. В цей же час вивчалися бактерії виду *Sporosarcina pasteurii*, введені в кубики цементного розчину, та відмітили збільшення міцності на стиск на 17%. 22% збільшення спостерігали дослідники в результаті обробки зразків цементного розчину мікроорганізмами виду *Arthrobacter crystallopoietes*. В цьому дослідженні з чотирьох вибраних видів мікроорганізмів, а саме *Sporosarcina soli*, *Bacillus massiliensis*, *Arthrobacter crystallopoietes* та *Lysinibacillus fusiformis*, найбільше збільшення міцності зумовили бактерії виду *Arthrobacter crystallopoietes*.

Також вивчався вплив бактерій виду *Sporosarcina pasteurii* на міцність на стиск цементного бетону з додаванням золи-віднесення. Повідомлялося, що максимальне збільшення цього параметру – на 22%. В дослідженні зола-віднесення вводилася до цементу в кількості 10, 20 та 30 % маси та трьома різними концентраціями бактеріальних клітин (103, 105 та 107 % клітин/мл). Збільшення міцності на стиск відбувалося за рахунок осадження кальциту на поверхні бактеріальних клітин та осідання цих клітин в порах.

Деякі дослідники зосередилися на багаторівневому дослідженні механічних властивостей бетону з додаванням відновлювального засобу на основі бактерій, які не мають уролітичної активності. В процесі дослідження в якості макромасштабних механічних змін для оцінювання механічних властивостей бетону в процесі його руйнування та відновлення проведено випробування на згин з додаванням зосередженого навантаження в чотирьох місцях та зміною ультразвукового імпульсу. Окрім того, визначалася наноміцність шляхом вдавлювання кульки в якості наномеханічного випробування для дослідження наномеханічних якостей осаджених мінералів та сили їх зчеплення з бетоном. Результати експерименту показали, що на ефективність затягування тріщин сильний вплив має джерело кальцію. Випробування на визначення швидкості ультразвукового імпульсу та на згин з додаванням навантаження в чотирьох місцях показали, що максимальний

ефект живлення (максимальний коефіцієнт відновлення міцності при згині та максимальний модуль пружності) отриманий при двокомпонентному самовідновлюванні в присутності глютамату кальцію. Згинальні характеристики модифікованих цементних композитів з додаванням мікроорганізмів демонстрували кращі результати ніж контрольні суміші, які не включали відновлювані суміші [82].

### 3.2.3 Зниження проникності бетону

Важливою характеристикою, що має вплив на тривалість терміну експлуатації бетону є проникність. До бетону з високою проникністю просочується вода і забруднюючі речовини, які мають вплив на структурну цілісність та довговічність бетону. Тому бетон з низькою проникністю має більш тривалий термін експлуатації [83,84].

Осадження бактерій головним чином відбувається на поверхні, тому відкладення кальциту можливо розглядати як утворення ізолюючого шару [73]. Проникність вивчається за результатами випробування на карбонізацію, оскільки відомо, що зниження газопроникності внаслідок обробки поверхні призводить до підвищення стійкості до карбонізації та проникнення хлоридів.

Також отримані дані про підвищення стійкості бетону до дії лугу, циклу заморозки – відтавання, усадці при висиханні та зменшенні проникності, які спостерігаються при додаванні бактеріальних клітин [73].

Є результати вивчення залежності проникності бетону від утворення осаду карбонату кальцію шляхом внесення мікроорганізмів виду *Bacillus sphaericus* до кубиків цементного розчину. При цьому спостерігалось значне зниження проникності порівняно з необробленими зразками цементного розчину [79]. В дослідженнях також відзначалось зниження водопроникності кубиків цементного розчину, оброблених бактеріями *Sporosarcina pasteurii*.

Вважається, що більш низька проникність кубиків з інкорпорованими бактеріями можливо обумовлена наявністю більш щільного міжфазного кордону, створеного між заповнювачем та бетонною матрицею в наслідок осадження кальциту [81].

Також вивчався вплив на водопроникність бактерій виду *Bacillus pasteurii* та спостерігався аналогічний результат. Окрім того, в порівнянні з необробленим зразком кубики цементного розчину з інкорпорованими бактеріями *Bacillus pasteurii* продемонстрували шестиразове зниження поглинання води.

Дослідники спостерігали восьмиразове зменшення проникності хлорид-іонів в процесі вивчення впливу бактерій виду *Sporosarcina pasteurii* на цементний бетон з додаванням золи-віднесення. Вважається, що таке зниження проникності може бути пов'язане з наявністю осадженого кальциту. Окрім того, повідомляється про зниження водопроникності на 68% коли для дослідження процесів самовідновлення в зразок цементного розчину помістили інкапсульовані в гідрогель спори *Bacillus sphaericus* [73,74].

### **3.2.4 Зменшення водопоглинання бетону**

Спостерігалось чотириразове скорочення поглинання води бетоном з додаванням золи-віднесення на сьомий день проводили згідно стандарту ASTM C 642. Відмічено, що при введенні бактерій в бетон з додаванням золи-віднесення його здатність до водопоглинання зменшується у міру збільшення концентрації бактерій. Максимальне зниження показника спостерігалось при концентрації бактерій 105 клітин/мл для всіх зразків бетону з додаванням золи-віднесення, включаючи зразок який містив 10% у бетоні. Водопоглинання такого зразка становило 3,25 % (мінімум). В цьому дослідженні наявність бактерій призвело до значного зниження поглинання

води порівняно з контрольними зразками. Осадження шару карбонату кальцію на поверхні та всередині пор бетонних зразків обумовило зменшення коефіцієнту сорбції. Данні, що наводять показали значення коефіцієнту сорбції для 28-денних біологічно оброблених зразків цементного розчину з додаванням тонкого кремнеземного порошку та без нього було на 42-48% та на 57-64% нижче, ніж відповідні значення для необроблених зразків. Отримані результати демонструють, що у випадку звичайних зразків навіть при значному зниженні сорбційної здатності бактеріальна обробка зразків з тріщинами не зменшувала величину цього параметру до того ж значення, що і у зразків без тріщин. Значення коефіцієнтів сорбції зразків, з додаванням тонкого кремнеземного порошку, що пройшли бактеріальну обробку, були дуже близькі до значення коефіцієнтів сорбції біологічно оброблених зразків без тріщин [78].

### **3.2.5 Підвищення корозійної стійкості**

Однією з основних причин втрати несучої здатності або стійкості будівельних конструкцій вважається корозія заліза в бетоні. Проникність та корозія пов'язані один з одним. Проникність зумовлює потрапляння в бетон хлорид-іонів та домішок, що тягне за собою корозію металу, отже це має вплив на тривалість терміну служби бетону. Зазначено, що осадження карбонату кальцію сприяло зниженню проникності через закупорювання шляхів проникнення домішок в бетонну матрицю [80].

### **3.2.6 Класифікація матеріалів використовуваних для самовідновлювання**

З урахуванням хімічної природи базових речовин, що використовуються в процесі самовідновлення, їх можливо віднести до двох різних категорій: залежні і автономні. Залежним матеріалами, які приймають участь у загоєнні тріщин, для стимулювання процесу необхідний зовнішній вплив (нагрівання або освітлення). Автономним матеріалам зовнішні стимули не потрібні. Наявність ушкодження вже є сигналом для початку процесу самовідновлення [80].

Інша класифікація – поділ самовідновлюваних матеріалів на зовнішні та внутрішні. По перше процес загоєння заснований на застосуванні зовнішніх регенеруючих компонентів, таких як мікро- або нанокапсули [57,62,80]. Для того, щоб матеріал отримав здатність самовідновлюватися до їх матриці спеціально вбудовують капсули, які при появі ушкодження вміст цих капсул діє як рухлива фаза. На відміну від цього для внутрішніх самовідновлюваних матеріалів ніяких особливих регенеруючих речовин не треба, зазвичай проходить процес внутрішнього самовідновлення. Хоча він не завжди можливий [80,81].

### **3.3 Теоретичні передумови створення самовідновлюваних бетонів в промислових умовах**

#### **3.3.1 Процес самовідновлення, умови необхідні для успішної його реалізації**

Самозатягування тріщин – природний процес їх усунення, який може виникнути в бетоні при наявності вологи та відсутності напруження розтягу. Завдяки самозатягуванню поступово зменшується проникнення води через тріщини, а в граничних випадках – повна герметизація тріщин. Основними причинами смозатягування тріщин були набухання та гідратація цементної

пасти, осадження кристалів карбонату кальція, блокування шляху потоку забрудненою водою та частками бетону, які відкололися від поверхні тріщин, в наслідок тріщиноутворення [74,77,74,75]. Найбільш важливим фактором відновлення є осаджування карбонату кальцію [74]. В багатьох дослідженнях висунуто припущення, що ширина тріщини є критичним фактором для здійснення процесу самовідновлення в бетоні. Вона повинна бути менше 200 мкм, а краще менше 50 мкм.

Науковцями винесена на розгляд версія більш вдосконаленої технології виробництва біологічного бетону з використанням спеціально підібраних бактерій роду *Bacillus* та поєднаних з ними поживних речовин для утворення в бетоні відновлюваного засобу [81]. За допомогою такого самовідновлювального бетону можливо ущільнити тріщини шириною більше 100 мкм. Тому ця область досліджень перспективною альтернативою екологічно небезпечним методами ремонту з використанням цементу. При такому підході бактерії у лужному середовищі перетворюють  $\text{CO}_2$  у карбонат іони, які потім взаємодіють з іонами  $\text{Ca}$  з бетонної матриці. Це призводить до утворення кристалів карбонату кальцію. Окрім того  $\text{CO}_2$  безпосередньо вступає в реакцію з гідроксидом кальцію матриці, що обумовлює осад кальциту. Поява кристалів карбонату кальцію більшого розміру за участю бактерій, інкорпорованих до самовідновлюваного бетону, забезпечує змогу до самовідновлення у порівнянні з традиційними або новими, хоча і екологічно небезпечними самовідновлюваними цементними матеріалами [80].

Самовідновлювані матеріали – це особливий тип матеріалів регенеруючих свої властивості міцності після незначних руйнувань, що відбуваються впродовж терміну його служби. Технологія самовідновлення особливо корисна у випадках композитних матеріалів, оскільки останні мають низьку здатність до виявлення ушкоджень та сприйнятливі до раптового руйнування[55,68,81]. Сучасні штучні матеріали мають відмінні механічні якості, хоча їм бракує здатності до самовідновлення. Тому у випадку пошкодження виникає ймовірність втрати механічної міцності, а з часом і

поступової втрати функціональної довговічності за відсутності втручання людини [76,80].

Утворення пошкоджень розглядаються як внутрішнє розділення матеріалу на два фрагменти, розділених тріщиною [8,16,24,25]. В основному при розробці всіх конструкційних матеріалів використовували концепцію «захист від ушкоджень», а не концепцію «управління ушкодженнями» [80]. Це означає оптимізацію якостей міцності і жорсткості конструкцій з цих матеріалів для попередження або затримання утворення пошкоджень [82]. Хоча попередити пошкодження в процесі експлуатації практично неможливо. З іншої сторони, в живих організмах процес керування пошкодженнями здійснюється автономно та не потребує втручання людини. Тобто за допомогою замкнутих систем циркуляції пошкодження сприймається на біохімічному рівні і на пошкоджену ділянку подаються відповідні речовини. Ця специфічна біологічна функція наштовхнула дослідників на розробку штучних самовідновлюваних матеріалів з практично однаковими властивостями.

Для реалізації механізму самовіднолювання чутливі матеріали повинні знайти пошкодження, а також ініціювати процес регенерації. Обов'язковою умовою для запуску є наявність всередині системи рідкої компоненти [82]. Сучасні матеріали і композити є тверді речовини. Для забезпечення реалізації механізму самовідновлення необхідно введення до цих матеріалів рідких компонентів за умови збереження механічних властивостей системи [82]. Існує багато способів введення рідкої складової до конструктивної системи споруди. Один з практично здійснених варіантів полягає у створенні штучної системи циркуляції. Нещодавно розробили декілька конструкцій каналів мікронних розмірів для розповсюдження необхідних для заживлення тріщин рідких речовин по всьому матеріалу. При руйнуванні ця рідина надходить до ушкодженої ділянки та цементує тріщину. Іншим варіантом введення рідкої компоненти є використання того ж зовнішнього фактору, який обумовив ушкодження [76,82].

Процес самовідновлення різних штучних матеріалів, таких як метали, кераміка, полімери, композиційні матеріали, заснований на одному спільному принципі, навіть якщо внутрішні властивості цих матеріалів різні. На рисунку 3.1 показано основний принцип, на якому засновано здатність різного класу матеріалів до самовідновлення. Покрокова процедура наступна [46,60,70,82]:

- рисунок 3.1 a-b, спочатку під впливом механічного навантаження в матеріалі з'являється тріщина;
- рисунок 3.1 c, у відповідності з загальним принципом, виникнення пошкодження або під впливом зовнішніх факторів формується «рухлива фаза»;
- рисунок 3.1 d, далі спостерігаємо процес переносу речовини до ушкодженої ділянки, де ушкодження може бути усуненою в результаті місцевої реакції відновлення. Це досягається зрощуванням поверхні тріщин на основі фізичної взаємодії або виникненню хімічних зв'язків;
- рисунок 3.1 e, після усунення тріщини та повного відновлення механічних властивостей матеріалу рухлива компонента знову знерухомлюється (імобілізується).

Хоча це загальна схема для всіх матеріалів, через відмінності їх внутрішніх властивостей деякі характеристики (ефективна температура; розмір пошкодження, що усувається) варіюється в залежності від типу матеріалу.

Окрім того, розмір пошкодження, яке усувається, залежить від кількості речовини яка вводиться [76].

Виходячи з наукової літератури та проведених досліджень, для реалізації самовідновлення потрібно створити п'ять умов [22,52,57,66,68,]:

1.Наявність води. Всі дослідження показували, що наявність води має велике значення для полегшення заживлення тріщин .



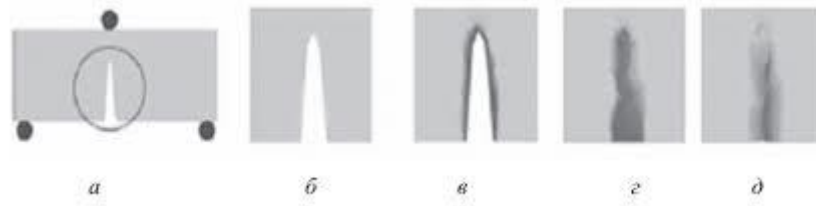


Рисунок 3.1 – Загальні принципи самовідновлювання матеріалів: а – механічне навантаження, яка викликає утворення тріщин; б – вид тріщини; с – утворення «рухомої фази»; d – усунення тріщини «рухомою фазою»; е – іммобілізація, після усунення тріщини [76].

2. наявність хімічних сполук. Достатні концентрації деяких необхідних хімічних речовин, зазвичай карбонат- і бікарбонат-іонів та розчинених вільних іонів кальцію, які грають важливу роль в реалізації механізмів відновлення.
3. Ширина тріщини. Контрольована ширина тріщини – важлива умова, яка фактично пов'язана з ефективністю самовідновлення цементних матеріалів. Ширина тріщини не повинна перевищувати 150 мкм, переважно менше 50 мкм. Для заповнення тріщини меншої ширини потрібно менша кількість відновлюваних речовин, які будуть легше зростати на обох її поверхнях.
4. Тиск води. Якщо вода швидко протікає через тріщину, самовідновлення не відбудеться. Тому тиск води не повинен бути дуже високим. Для тріщини певної ширини ця умова залежить від співвідношення натиску води та товщини елемента.
5. Тріщина, що стабільно розповсюджується. Щоб гарантувати, що тріщина не з'явиться знову, вона повинна знаходитися в стабільному стані.

Осадження кальциту, який виробили мікроорганізми, є формою автономного внутрішнього механізму самовідновлення, який все більше приваблює увагу дослідників. Цілий ряд бактерій, які можливо знайти в ґрунті, піску і природних мінералах, мають властивість виділяти карбонат кальцію як в природних так і в лабораторних умовах [84].

У природі три групи організмів можуть виробляти кальцити [77,81]:

- 1) фотосинтезуючі бактерії, наприклад ціанобактерії і водорості, які можуть поглинати  $\text{CO}_2$ ;

- 2) сульфатредуючі бактерії, які виконують дисиміляційне відновлення сульфатів;
- 3) організми, які приймають участь в одному з циклів перетворення азоту і його утворень в живих організмах (амоніфікація амінокислот, відновлення нітратів, гідроліз сечовини. Гідроліз сечовини за допомогою ферменту уреазу є самим простим зі всіх механізмів осадження виробленого мікроорганізмами кальциту.

Повідомлялося, що система закупорювання тріщин, в основі якого лежить продукування мікроорганізмами мінеральних речовин, залежить від осадження карбонат-іонів. Найбільш підходящим способом їх отримання є гідроліз сечовини тому, він супроводжується підлужуванням навколишнього середовища. Тому такі бактерії повинні бути в змозі діяти як каталізатор реакції гідролізу сечовини. Зазвичай це уреазопозитивні бактерії. Здатність розщеплювати сечовину широко розповсюджена серед бактерій, що живуть в ґрунті і підземних системах [87,74].

Більша частина уреазопозитивних бактерій належить до роду *Bacillus*, *Sporosarcina*, *Clostridium*, *Desulfotomaculum*. В бетоні, який тільки що виготовлений створюється сильнолужне середовище з характерними значеннями рН від 11 до 13. Тому бактерії, що додаються до бетону повинні витримувати механічні навантаження, які виникають в процесі перемішування, а також впродовж тривалого часу виживати в умовах високої лужності. Безпосереднє додавання бактеріальних клітин до складу композиту неможливо з двох причин. Перша полягає у зниженні життєдіяльності бактерій в високолужному середовищі бетону (рН > 12). Друга пов'язана з можливістю руйнації бактеріальних клітин в процесі гідратації. Відомо також, що через зменшення діаметру пор цементної матриці в процесі гідратації бактерії гинуть [79].

Встановлено, що високолужному середовищу можуть виживати штами бактерій роду *Bacillus*, які зазвичай утворюють спори у вигляді пристосованих до певних умов клітин, витримуючих великі навантаження, спровоковані

механічними і хімічними факторами. Окрім цього, ці спори демонструють низьку активність метаболічного обміну та дуже довгий життєвий цикл. Відомі види бактерій, спори яких життєздатні до 200 років. Бактерії у складі бетону повинні бути толерантні до кисню, який після проникнення в матрицю, утворює аеробне середовище [79].

Таким чином більшість бактеріальних агентів, що представляють інтерес, імовірно повинні бути аеробними спороутворчими бактеріями роду *Bacillus* або, наприклад *Sporosarcina*, які перекваліфіковані з роду *Bacillus* у самостійний рід. Із раніш опублікованих наукових даних слід зазначити, що в цементних матеріалах і бетоні частіш за все використовували бактерії видів *Sporosarcina pasteurii* та *Bacillus sphaericus*, які утилізують сечовину. Тому певною мірою вивчені види *Shewanella*, *Bacillus lentus*, *Bacillus halodurans*, *Bacillus pseudofirmus*, *Bacillus cohnii*, *Arthrobacter crystallopoietes* та інше [79,81,88,74].

Виходячи з цього можливо зробити висновок, що вибір мікроорганізмів грає значну роль в підвищенні міцності бетону.

### **3.3.2 Осадження кальциту мікроорганізмами**

Різні види бактерій, наряду з абіотичними факторами, такими як мінералізація величини рН навколишнього простору, температура, наявність поживних речовин і середовище проживання, грають значну роль в процесі осадження карбонату кальцію в широкому діапазоні різних середовищ [44,72,77].

Існують чотири ключових фактори, що визначають осадження кальциту, який вироблюють мікроорганізми:

- 1) концентрація кальциту;
- 2) концентрація розчиненого неорганічного вуглецю;

3) значення рН;

4) наявність центрів утворення зародків [77].

Фермент уреазы, який виробляють бактерії розкладають сечовину на іони амонію та карбонат-іони. Нижче наводимо рівняння хімічної реакції [77,88]:



Іони амонію ( $\text{NH}_4^+$ ), які вивільняються в процесі гідролізу сечовини, підвищують локальне значення рН та ініціюють осадження карбонату кальцію. Високе значення рН в локалізованій області збільшує тенденцію перетворення бактерій в центри утворення зародків кристалу кальциту. Осадження кальциту проходить в результаті поєднання іонів карбонату ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), утворюваних при гідролізі сечовини, іон кальцію ( $\text{Ca}^{2+}$ ) з доданого до бетону з'єднання кальцію [88].

Оскільки поживне середовище є основним джерелом енергії для бактерій, дуже важливо забезпечити ті з них, що виробляють кальцит, необхідними поживними речовинами в достатній кількості. Вони поставляються бактеріями на стадії їх вирощування, або на стадії бетонування, чи на стадії відновлення конструкції в залежності від конкретного застосування. Звичайні нутрієнти для бактерій включають  $\text{CO}_2$ , N, P, K, Mg, Ca та Fe [87]. В дослідженнях спостерігали зниження ефективності осадження карбонату кальцію у вигляді тонкої плівки мілких кристалів, поряд з дуже швидким осадженням бактеріального карбонату кальцію у вигляді окремо зростаючих кристалів [84,88]. Також зазначають, що ромбоєдричні кристали кальциту виявляли гарний зміцнюючий ефект порівняно з невеликими його кристалами. Багаточисленні дослідження процесу утворення осаду кальциту з використанням різних джерел кальцію, а саме хлориду кальцію ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), лактату кальцію, глутамату кальцію, ацетату кальцію ( $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) та

нітрату кальцію ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) [71,81,83,86]. Повідомлялось, що гарним вибором є лактат кальцію, тому що він починає розчиняється вже в процесі змішування і не має впливу на час схоплення бетону [79,82]. В той же час хлорид кальцію не є оптимальним джерелом цього мікроелементу через різні типи поживних речовин, які використовуються для вирощування кальцинуючих мікроорганізмів і продуктів життєдіяльності бактерій, також їх вплив на виживання, їх зростання, утворення біоплівки і формування кристалів.

### 3.3.3 Види бактерій, які застосовують для самовідновлюваних бетонів

Класифікацію бактерій зазвичай проводять за трьома ознаками [41,42]:

- за формою (рисунок 3.2),
- забарвленням по Граму (рисунок 3.3),
- потребою у кисні.

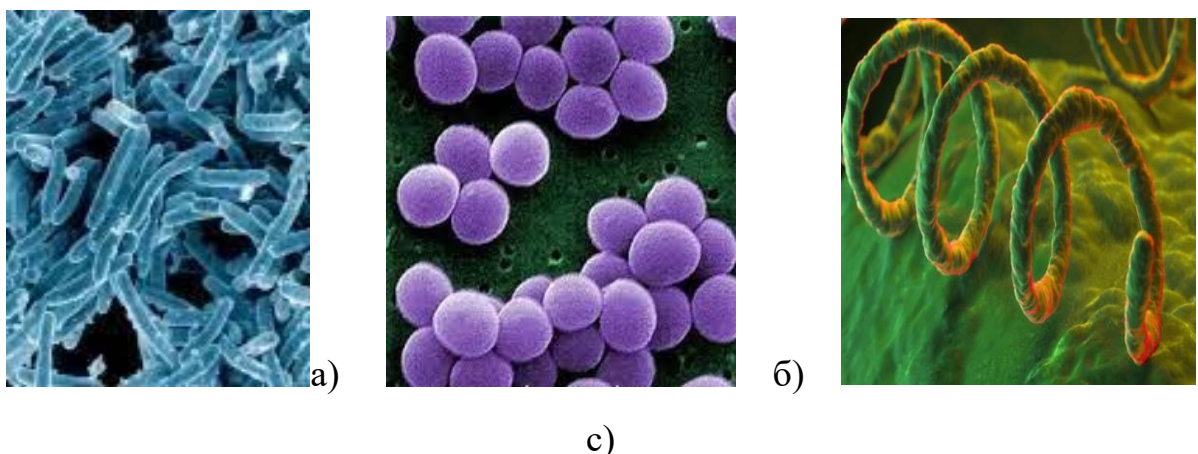


Рисунок 3.2 - Класифікація бактерій за формою: а – паличкоподібні, б – кулясті, с – спіральні

Метод фарбування за Грамом – це мікробіологічний метод, який використовується для диференціації видів бактерій на дві групи (грам-позитивні та грам-негативні) на основі хімічних властивостей їх клітинних стінок. Цей метод оснований на властивостях клітинної стінки бактерій. після процедури забарвлення, грам-позитивні бактерії залишаються фіолетовими, а грам-негативні змінюють колір на рожевий або червоний колір [41].

Окрім води, багато мікроорганізмів мають потребу у кисні. За потребою у кисні бактерії поділяються на аеробні та анаеробні. Аеробні – це бактерії, що

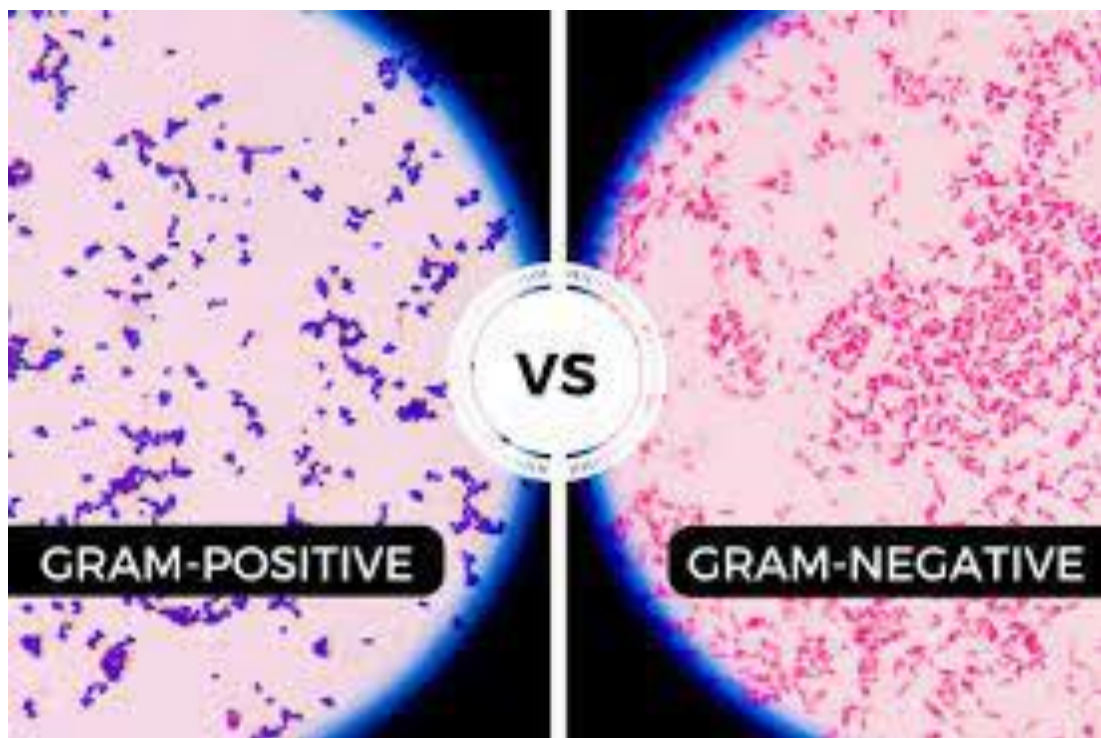


Рисунок 3.3 - Класифікація забарвлення по Граму

живуть у безкисневому середовищі. Анаеробні – бактерії які потребують вільний молекулярний кисень для нормальної життєдіяльності [41,42].

Існують різного виду бактерії, які можуть бути використані в сфері будівництва. В таблицях 3.3.3.1 та 3.3.3.2 надані інші області застосування бактерій [41,42,86,82,87].

Таблиця 3.1 - Огляд різних будівельних матеріалів з використанням осадження кальциту, який виробляється мікроорганізмами

Матеріал	Мікроорганізм	Метаболізм	Поживна речовина	Посилання
Біологічний будівельний розчин	Bacillus Cereus	Окисне дезамінування амінокислот	Середовище для зростання (пептон, екстракт дріжджів, $KNO_3$ , $NaCl+CaCl_2 \cdot 2H_2O$ , актикал, натаміцин)	W. De Muynck et al. [96]
Ліквідація тріщин в бетоні	Bacillus Subtillis	Гідроліз сечовини	Поживний бульйон, сечовина $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ , $NH_4Cl$ , $NaNCO_3$	S.K. Ramachandran et al. [89]
Ліквідація тріщин в бетоні	Bacillus sphacticus	Гідроліз сечовини	Екстракт дріжджів, сечовина $CaCl_2 \cdot 2H_2O$	W. De Muynck et al. [92]
Біобетон	Bacillus Subtilis	Гідроліз сечовини	Поживний бульйон, сечовина $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ , $NH_4Cl$ , $NaNCO_3$	W. De Muynck et al. [98]
Біобетон	Bacillus Subtilis	Окисне дезамінування амінокислот	Пептон 5 г/л, $NaCl$ 5 г/л, екстракт дріжджів 3 г/л	M. Seshagiri Rao et al. [91]

Таблиця 3.2 – Мікроорганізми, що використовуються для осадження карбонату кальцію в бетоні.

Тип мікроорганізму	Система	Тип кристалу	Посилання
Фотосинтезуючий організм: Gl.24	Мікромектичне озеро	Кальцит ( $CaCO_3$ )	C.Y. Tai, F.B. Chen [90]
Фотосинтезуючий організм: Chlorella	Люцернове озеро	Кальцит ( $CaCO_3$ )	S. Sanchez-Moral, J. Canaveras [95]
Сульфатредукуючі бактерії: Ізолят SRB, L Vform 6	Аноксигенний гіперсолений лиман	Доломіт ( $Ca(Mg)CO_3$ )	M.T. Gonzaez - Murioz [97]
Азотний цикл Bacillus Subtilis	Розпад сечовини в синтетичному середовищі	Кальцит ( $CaCO_3$ )	S. Castanier et.al. [93]
Азотний цикл Bacillus Subtilis	Амоніфікація та відновлення нітратів	Кальцит ( $CaCO_3$ )	S. Castanier et.al. [94]
Азотний цикл Bacillus Subtilis JC3	Амоніфікація (розпад амінокислот)	Кальцит ( $CaCO_3$ )	M. Seshagiri Rao et al. [91]

### 3.3.4 Матеріали, що використовують для доставки бактерій

Вміщені до бетонної суміші бактеріальні спори можуть бути додатково захищені шляхом їх іммобілізації в носіях. В якості носіїв при іммобілізації ферментів та цілих клітин широко використовуються поліуретани та силікагель завдяки їх механічною міцністю та біохімічною інертністю. Іммобілізовані в силікагелі бактерії мають більш високу активність ніж бактерії, іммобілізовані в поліуретани. Однак в останньому випадку спостерігалось більш висока регенерація властивостей міцності і більш низький ступінь водопроникності. Хоч в поліуретанових матрицях зберігається висока метаболічна активність клітин, незрозуміло чи залишається незмінною швидкість їх зростання [79,74,81,37,40].

В дослідженнях в якості носія бактерій та поживних речовин використовували керамзит з розміром зерна приблизно 2-4 мм. Однак відмічалось, що керамзит займає великий об'єм матриці, що в свою чергу негативно впливає на міцність бетону [79]. В якості відповідного матеріалу-носія для аеробних та анаеробних бактерій в біоскрубері, при очищенні стічної води та в сильнолужному середовищі бетону успішно використовували діатомову землю, яка складається з високопористих, легких, хімічно стабільних та інертних діатомових кістяків з розміром від 10 до 200 мкм. Пористі осередки гранул діатомової землі можуть утримувати кисень, воду та поживні речовини для збереження життєдіяльності інкорпорованих в гранули бактеріальних колоній та забезпечити середовище для життя мікробів. Раніше публікувалися результати досліджень з використанням пемзи в якості носія в процесах видалення токсичних сполук з промислової стічної води [86]. Пемзу можливо розглядати в якості потенційного матеріалу для іммобілізації мікроорганізмів, враховуючи її достатньо високу та стабільну денитрифікаційну активність в динаміці, добрі механічні властивості, низьку собівартість та низькі енергозатрати при її виробництві. Клиноптилоліт



(мінерал з групи цеолітів) також є перспективним матеріалом для іммобілізації мікроорганізмів в наслідок своєї шорсткості, більшій питомій поверхні і високій пористості. Цеоліт широко використовується в якості матеріалу для іммобілізації бактерій в процесах очистки стічної води завдяки своєму широкому розповсюдженню в природі, доступності та можливості технічної реалізації, рентабельності, великій питомій поверхні, жорсткості структури, функціональності поверхні, термічній, механічній і радіаційній стабільності [34,35,22].

Існує багато факторів, що впливають на міцність зчеплення клітин з інертними поверхнями. З них розмір пор матеріалу-носія був описаний як найбільш важливішим фактором, що має більший вплив, ніж макроскопічна шорсткість поверхні та загальна її площа. Оптимальний діаметр пор відповідає діапазону від одного до п'яти діаметрів мікроорганізму, тому матеріали з розміром пор в діапазоні 1-10 мкм оптимально підходять для іммобілізації бактеріальних клітин [78, 74].

### **3.3.5 Хімічні аспекти процесу самовідновлення**

В даний час конструювання структури бетону з необхідним рівнем спротиву руйнуванню здійснюється з урахуванням використання відомих закономірностей фізико-хімії, механіки деградування матеріалу. Підвищення тріщиностійкості можливе за рахунок переходу до виробництва бетонів з псевдопластичним типом руйнування [77,74, 73].

Сьогодні запропоновані біологічні методи підвищення надійності бетонних та залізобетонних конструкцій. Було висловлено припущення, що іммобілізовані в бетонну матрицю бактеріальні спори, які знаходяться в стані спокою, але життєздатні, стають метаболічно активними, як тільки через тріщини, що тільки но з'явилися проникає волога. Потім ці тріщини

затягнуться через утворення кальциту – продукту метаболізму мікроорганізмів.

Різні види бактерій, а також абіотичні фактори (мініралізація і склад середовища) різним чином приймають участь в осадженні карбонату кальцію в широкому діапазоні середовищ. Його осадження є хімічним процесом, який регулює головним чином чотири основних фактора:

- 1) концентрація кальцію;
- 2) концентрація розчиненого неорганічного вуглецю;
- 3) величина рН;
- 4) наявність центрів кристалізації [77].

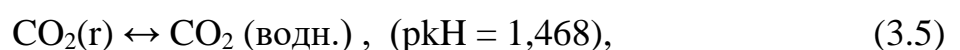
Для осадження  $\text{CaCO}_3$  необхідно достатня кількість іонів кальцію і карбонат-іонів, щоб іоновий коефіцієнт активності продукту реакції перевищував константу розчинності ( $K_{so}$ ) (формули 3.3 та 3.4). Стан насичення ( $\Omega$ ) системи можливо визначити, порівнюючи показники іонового коефіцієнту активності продукту реакції та константу розчинності. Якщо  $\Omega > 1$ , то система перенасичена і цілком ймовірно утворення осаду:

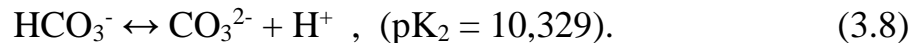
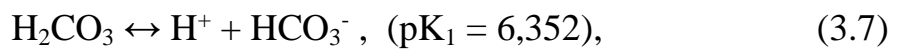
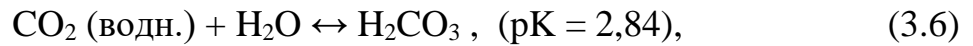


$$\Omega = a(\text{Ca}^{+2})(\text{CO}_3^{2-}) / K_{so} \quad (3.4)$$

У кальциту при  $25^\circ\text{C}$ ,  $K_{so} = 4,8 \times 10^{-9}$ .

Концентрація фонів карбонату пов'язана з концентрацією розчинного неорганічного вуглецю та величиною рН у цій водній системі. Окрім того концентрація розчинного неорганічного вуглецю залежить від кількох параметрів навколишнього середовища, а саме від температури і парціального тиску діоксиду вуглецю (для систем, відкритих до дії впливу атмосферних впливів). Рівноважні реакції і константи, що регулюють процес розчинення  $\text{CO}_2$  в водному середовищі ( $25^\circ\text{C}$  і 1 атм) наведені в рівняннях (3.5)-(3.8):





При  $\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$  мікроорганізми можуть мати вплив на процес осадження, змінюючи практично будь-якого з наведених параметрів осадження або окремо, або в різних комбінаціях один з одним [77]. При осадженні карбонату кальцію проходять різні реакції.

Перша схема включає в себе цикл сірки, зокрема відновлення сульфатів.

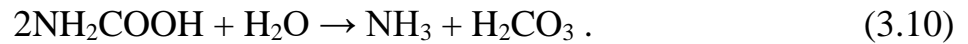
Друга схема включає азотний цикл:

- 1) окисне дезамінування амінокислот в аеробіозі;
- 2) відновлення нітратів в умовах анаеробіозу або мікроаерофілії;
- 3) розклад сечовини або сечової кислоти в умовах аеробіозу (уреалітичними бактеріями).

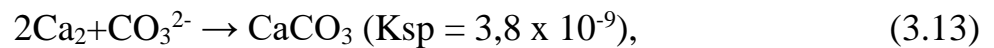
Другий мікробний процес, який веде до збільшення як рН, так і концентрації розчиненого неорганічного вуглецю, представляє собою утилізацію органічних кислот. Цей процес широко використовується в експериментах по осадженню карбонату мікроорганізмами. Наведені механізми осадження зустрічаються в природі та пояснюють осадження карбонату під впливом мікроорганізмів, підтверджуючи висновки вчених, що у відповідних умовах більшість бактерій індукують осад карбонату.

Системою осадження карбонату, під впливом мікроорганізмів яка частіше всього вивчається є гідроліз сечовини з допомогою ферменту уреазу у багатому кальцієм середовищі. Уреаза каталізує гідроліз сечовини до  $\text{CO}_2$  і аміаку, що призводить до підвищення рН і концентрації карбонату у бактеріальному середовищі. В процесі мікробної активності уреазу 1 моль сечовини гідролізують внутрішньоклітинно до 1 молю аміаку та 1 молю карбонату, який мимовільно гідролізує з утворенням додатково 1 молю аміаку та вуглекислоти наступним чином (з бактеріями):





У воді ці продукти приходять у рівновагу, утворюючи бікарбонат, 1 моль амонію і гідроксид-іони, які обумовлюють підвищення рН:



де  $K_{\text{sp}}$  – це розчинність продуктів реакції. Вчені дослідили серію явищ, що відбуваються в період уреазолітичного накопичення солей кальцію, доводячи важливість величини рН і метаболізму кальцію в цьому процесі [77].

На рисунку 3.3.5.1 показано спрощене уявлення про процеси, які відбуваються при осадженні індукованого мікробами карбонату.

В розчині іони кальцію притягуються до стінки клітини бактерій завдяки негативному заряду. При додаванні о бактерій сечовини в мікросередовищі бактерій (А) виробляють розчинені неорганічні вуглеці і амоній. У присутності іонів кальцію це може призвести до локального пересичення і гетерогенному осадженню карбонату кальцію на стінці клітини бактерії (В).

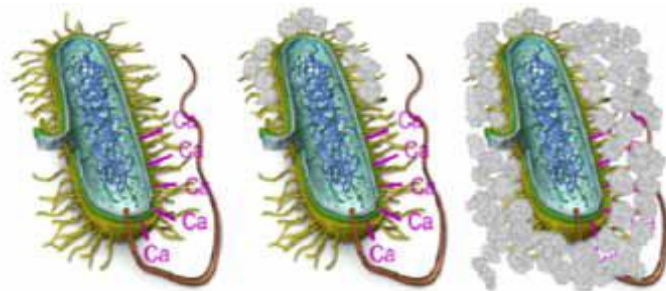


Рисунок 3.4 - Осадження кальциту бактеріальною клітиною [84]

через якийсь час вся клітина інкапсулюється (С). Обмеження надходження поживних речовин призводить до її загибелі.

На рисунку 3.5 показані результати процесу лікування тріщини. Цифри на фото – товщина тріщин в мм.

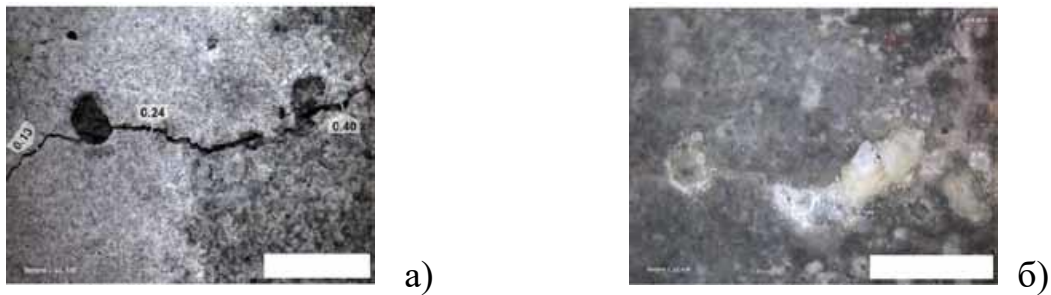
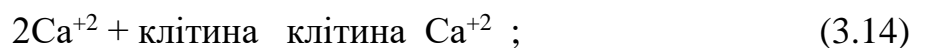


Рисунок 3.5 - Мікрофотографії поверхні бетону до лікування тріщини а) та після її лікування протягом 100 діб [84]

Основну роль бактеріям відвели через їх здатність утворювати лужну середу в результаті їх різної фізіологічної активності.

Бактеріальні поверхні грають важливу роль в осадженні кальцію. При нейтральному значенні рН та наявності декількох негативно заряджених груп позитивно заряджені іони металів можуть прикріплюватися до поверхні бактерій, сприяючи гетерогенному процесу утворення зародків [57]. Як правило, карбонатні осади розвиваються на зовнішній поверхні бактеріальних клітин з наступним розшаруванням, тому бактерії можуть бути вбудовані в зростаючі кристали карбонату [87].

Можливі біохімічні реакції в середовищі сечовини –  $\text{CaCl}_2$ , де проходить осадження  $\text{CaCO}_3$  на поверхні клітини, можливо узагальнити наступним чином:



Це спрощене уявлення процесів, що відбувається в період осадження карбонату, індукованого мікробами. Однак фактична роль бактеріального осаду є предметом дискусій. Деякі автори досліджень вважають цей осад небажаним та випадковим побічним продуктом обміну речовин, тоді як інші

вважають, що це особливий процес, який дає екологічну перевагу для організмів які осаджуються [74].

### **3.3.6 Теоретичні розробки схеми для отримання бетонів, модифікованих мікробіологічною добавкою**

Бетон є міцним та відносно дешевим будівельним матеріалом, який найбільш широко використовується у всьому світі. В той же час в роботах різних спеціалістів відмічають, що масштабне виробництво бетону негативно впливає на навколишнє середовище через велику кількість відходів [5,63].

Цілісність споруд із бетону та інших цементних композитів порушується через їх схильність до розтріскування, в результаті чого знижується їх довговічність. Проблеми, обумовлені міцністю конструкцій, зазвичай вирішують шляхом проведення в процесі експлуатації, огляду та ремонту цементними композиціями, наповненими складовими на основі епоксидної смоли або інших синтетичних в'язучих.

Інженерія, технології та біотехнологія - такий симбіоз здатний подолати декілька вищеназваних проблем в будівництві, щоб зробити будівлі частиною природи. Саме про такі нововведення в будівництві будівель говорив Мартін Дейд-Робертсон – професор нових технологій Ньюкаслського університету, співдиректор Центру біотехнологій у побудованому середовищі створили новий дослідницький центр для вивчення можливості злиття будівельних технологій та біології. Центр працює над розробкою напрямків і методів коли людина зможе зробити будівництво частиною живої природи.

Один з напрямків це будівлі, які загоюють тріщини. Ця біотехнологія дозволить створювати практично вічні будівлі, адже вони будуть володіти здатністю самовідновлення.

На початку 2000 років одразу декільком вченим, у різних країнах світу (Нідерланди, США, Південна Корея) прийшла думка про можливість використання бактерій для відновлювання бетонних споруд та виробів. Для самовідновлювання бетонів було запропоновано використовувати полімери які можливо змусити реагувати на механічні та іншого роду ушкодження матеріалу. До полімерів запропонували вбудовувати мікрокапсули, що несуть у собі ферменти, бактерії та інші органічні сполуки. Самовідновлювані капсули починають діяти в той момент, коли матеріал зазнає ушкоджень. Захисна оболонка капсул розчиняється, що дає можливість почати діяти агентам які активуються та через певний час відновлюють ушкоджені ділянки. Основою для таких матеріалів стали бактерії, результатом життєдіяльності яких стає вапняк. З часом тріщини закупорюються і бетонні споруди відновлюються.

Головною проблемою при розробці такого роду матеріалів стала необхідність довгострокового підтримання життєздатності бактерій. Тобто в сухому бетоні бактерії перебувають у стані анабіозу, але варто тільки з'явитися навіть мікроскопічній тріщині, крізь яку просочується всередину вода, то бактерії оживають, починають свою життєдіяльність, результатом якої стає зростання кальцитів і «самозагоювання» бетону.

Один з найбільш перспективних методів отримання такої бетонної суміші належить групі дослідників на чолі з Хенком Йонкерсом професором Делфотського Університету технології. Ця група дослідників проводила роботу з бактеріями роду бацил, які можуть існувати у лужному середовищі, а їх спори десятиліттями виживають без їжі та води.

Ще одним відомим дослідником вважається професор Віктор Лі з Мічиганського університету. Самовідновлюваний бетон, що створила ця група вчених стверджує, що новий матеріал пройшов випробування ділянці бетонної дороги Curtis Road в США.

В Голландії група науковців під керівництвом Єрика Шлангена розробила асфальтове покриття зі стальними волокнами. Під дією магніту

мілкі тріщини затягуються. За підрахунками вчених таке покриття дорожче при виготовленні, але в двічі подовжує термін служби мінімум вдвічі. Покриття тестується а 12 дорогах Голландії. Інший проект групи Шлангена – удосконалений бетон з підвищеною міцністю за рахунок введення бактерій, які продукують карбонат кальцію.

Корейська команда вчених, якими керує Чан Мун Чун презентували розробку покриття для бетону, що використовує свій агент, а не кальцит. Після нанесення шару мікрокапсул цього полімеру на фібробетон на мікроскопічному рівні було підтверджено, що при його ушкодженні заживлюючий засіб вивільняється в результаті розриву мікрокапсули та заповнює ушкоджену ділянку.

У 2020 році було анонсовано будівництво підводного тунелю в м. Антверпен (Бельгія). Частину конструкції, а саме плиту даху випробувального майданчику, виконано з біобетону. Самовідновлювані біоагенти – бактерії разом з нутрієнтами було додано до бетонної суміші в промисловий міксер. Далі бетон доставлено на будмайданчик де з нього відлили плиту та встановили її на проектне місце [71].

Окрім того, самовідновлювані матеріали можуть бути більш екологічними, ніж традиційні будівельні матеріали. Ці матеріали виготовляються з полімерів, що біологічно розкладаються і це означає, що їх легше перероблювати або перепрофілювати, ніж традиційні матеріали. Це допомагає зменшити вплив будівництва на навколишнє середовище, а також допоможе скоротити кількість відходів (при виконанні будівельних робіт) і зберегти природні ресурси.

Нарешті самовідновлювані матеріали можуть знизити кількість енергії, що використовується в процесі будівництва. Оскільки матеріали не потребують регулярного технічного обслуговування і ремонту, тобто зменшується кількісна потреба використання машин і механізмів для ремонту та заміни матеріалів, що призводить до зменшення викидів до навколишнього середовища.



Формування властивостей бетонних сумішей, а також тверднучих матеріалів починається з моменту їх приготування та продовжуються при транспортуванні, укладанні, ущільненні та твердінні. Перелічені операції багато в чому визначають якість бетону в конструкціях, його експлуатаційні характеристики. Найважливішим елементом технології в комплексі бетонних робіт є приготування суміші, тому що на цьому етапі формується потенційний рівень якості бетону. Приготування бетонних сумішей не має значних технічних та технологічних труднощів, оскільки необхідні пристрої існують та використовуються у виробництві, виключення складає блок для приготування біодобавок. Процес приготування суміші на основі цементних в'язучих складається з наступних технологічних операцій: приймання, зберігання та сушка матеріалів, підготовка води замішування і наповнювачів; підготовка біологічних та інших добавок; підготовка мілких та крупних заповнювачів; перемішування компонентів. В'язучі і мінеральні компоненти (портландцемент, наповнювачі, мілкі та крупні заповнювачі) надходять від постачальників різними видами транспорту та зберігаються в спеціальних бункерах. Цемент та інші компоненти, зважені в дозаторах. Передаються в бетонозмішувач. Рідкі та тверді хімічні добавки, як правило, надходять в спеціальних ємностях або герметичних мішках. Гірські породи, що йдуть на приготування мінеральних наповнювачів з приймальних бункерів за допомогою стрічкового конвеєру передаються на молоткову дробарку, потім до сушильного барабану. З проміжного бункеру за допомогою шнеку матеріали надходять до кульового млину, де перемелюються до питомої поверхні 3 000-5 000  $\text{cm}^2/\text{г}$ . Мілкий та крупний заповнювачі подаються в гідрокласифікатор, потім в сушильний барабан та молоткову дробарку, а потім на фракціонування [5,63, 69].

Технологія виготовлення відновлюваного засобу на основі бактерій: культура на рідкому поживному середовищі вирощують в термостаті. Бактеріальні клітини отримують шляхом центрифугування, потім клітини суспендують у фізіологічному розчині (9 г/л NaCl). В якості вихідного

матеріалу для утворення карбонату кальцію використовують лактат кальцію ( $\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$ ), ще додають необхідні для бактерій сечовину як джерело ферменту уреазу і дріжджовий екстракт як джерело вуглецю та азоту. Інгредиенты оброблюються в автоклаві, потім змішуються, щоб запобігти утворенню осаду.

В процесі змішування поживні речовини розчиняють у частині води для замішування, інша частина замінюється суспензією іммобілізованих в цеоліт або пемзу бактерій. Технологічна схема виготовлення бетонної суміші з біодобавкою наступна: всі тверді матеріали (пісок, цемент, золу-віднесення) попередньо перемішують, потім в міксер додають води та збільшують швидкість, додають воду та суперпластифікатор додають до отримання однорідної маси, останній етап додавання в міксер волокон полівінілового спирту двома порціями.

## ВИСНОВКИ

Проведено аналіз наукової літератури, пов'язаної з розробками в області вивчення причин виникнення бетону як будівельного матеріалу, шлях розвитку бетонів.

Розглянуто технології виготовлення, оптимізації складу та застосування цементних композитних матеріалів. Виявлено, що найбільший ефект може бути досягнуто, якщо при їх виготовленні застосовуються суперпластифікатори і поєднання різних наповнювачів.

Показано, що бетонні конструкції за період експлуатації постійно знаходяться під впливом різного роду факторів, що призводить до розтріскування матеріалу. В свою чергу це призводить до погіршення якості і скороченню терміну їх експлуатації. Тріщини можуть виникати під впливом зовнішніх факторів (екстремальні навантаження, неправильний порядок виконання будівельних робіт або помилки конструювання).

Розглянуто способи відновлення та посилення залізобетонних виробів та конструкцій, що мають тріщини, методами нарощування, просочування структури бетону полімерними та іншими композиціями, нанесення монолітних покриттів або приклеювання металевих, полімерних та інших елементів.

Розглянуто сучасні методи відновлення та ремонту бетонних та залізобетонних виробів та теоретичні причини створення самовідновлюваних бетонів та усунення тріщин за допомогою бактерій.

Сформульовано загальний процес самовідновлювання матеріалів, на кінцевій стадії якого відбувається затягування тріщин рухомою фазою та іммобілізація після усунення тріщин. Наведені формули хімічних реакцій осадження карбонату кальцію. Найбільш ефективним способом отримання іонів карбонату є гідроліз сечовини за допомогою бактерій роду *Bacillus*, *Sporosarcina*, *Clostridium*, *Desulfotomaculum*. Для їх роботи необхідне поживне

середовище, в якості якого рекомендується лактат кальцію. Бактеріальні спори, що вміщені в бетонну суміш, повинні бути захищені шляхом їх іммобілізації в носії (пемза, цеоліт).

На основі проведеного дослідження та аналізу існуючих підходів до створення бетонів виявити передумови до застосування біотехнологій до самовідновлювання залізобетонних конструкцій, що отримали дефекти при експлуатації.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дорошенко О.Ю., Дорошенко Ю.М. Історія розвитку і використання цементного бетону в будівництві. Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. 2010. № 7. С. 99-102. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal\\_2010\\_7\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal_2010_7_22).
2. Гетун Г., Безклубенко І., Кошева В., Кошева І. Етапи розвитку бетону та досвід використання залізобетонних конструкцій. Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2022. № 10. С. 42-55. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/budktp\\_2022\\_10\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/budktp_2022_10_7).
3. Дворкін Л.Й. Будівельне матеріалознавство: навчально-довідковий посібник. Рівне: НУВГП. 2017. 355с.
4. ДСТУ Б В.2.7-221:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Класифікація і загальні технічні вимоги. [Чинний від 2010-10-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України. 2010. 14 с.
5. Дворкін Л.Й., Лаповська С.Д. Будівельне матеріалознавство: підручник. Рівне: НУВГП, 2016. 448с.
6. Мірошник Т.П., Петрикова Є.М, Лунін О.Д. Матеріали та технології для продовження терміну експлуатації бетонних і залізобетонних конструкцій. Реконструкція житла. 2006. № 7. С. 207-216. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/recj\\_2006\\_7\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/recj_2006_7_26)
7. ДСТУ Б В.2.7-281:2011 Цементи. Класифікація. [Чинний від 2012-10-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України. 2012. 31 с.
8. Ключко Б.Г., Кушвид А.А. Тріщиноутворення бетону в процесі експлуатації конструкцій. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2004. № 3. С. 124-126. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt\\_2004\\_3\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2004_3_25)
9. Бабушкін В.І. Захист будівельних конструкцій від корозії, старіння та зносу. Харків: Вища школа. 1989. 168 с.

10. Вагнер Г.Р. Фізико-хімія процесів активізації цементної дисперсії. Київ: Наукова думка. 1980. 200 с.
11. Голишев О.Б. Проектування посилення залізобетонних конструкцій. Київ. Логос. 2001. 175 с.
12. Грушко І.М., Глущенко Н.Ф., Ільїн А.Г. Структура та міцність дорожнього цементного бетону. Харків. 1965. 135 с.
13. Гусев Б.В., Зазимко В.Г. Вібраційна технологія бетону. Київ. Будівельник. 1991. 158 с.
14. Калашніков В.І. Бетони: макро-, нано-, пікомаштабні сировинні компоненти. Реальні нанотехнології бетону. Дні сучасного бетону. Від теорії до практики. Запоріжжя. 2012. С. 38-50
15. Калашніков В.І., Ананьєв С.В., Єрофєєва І.В. Вплив вуглецевих волокон на міцність порошкового бетону: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Praha. 2015. С. 63-64.
16. Коротких Д.М., Кесарійський О.Г., Чернишов Є.М. Особливості процесу деформування високотріщиностійких бетонів з багаторівневим дисперсним армуванням. Вісник одес. держ. акад. буд. та архіт. Одеса. Вип. 47 ч.1. с. 193-200.
17. Пащенко О.О., Сербін В.П. Армування цементного каменю мінеральним волокном. Київ. УкрНПНТІ. 1970. 45 с.
18. Дворкін Л.Й. Будівельні в'язучі матеріали: підручник. Рівне: НУВГП. 2019. 622с.
19. Пшинько О.Н., Красьнюк О.В, Пунагін В.М. Проблеми отримання бетонів з високими експлуатаційними властивостями. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2004. Вип. 4. С. 203-205. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt\\_2004\\_4\\_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2004_4_37)
20. Коваленко О.В. Сучасні матеріали для ремонту та відновлення бетону гідротехнічних споруд водогосподарсько-меліоративного комплексу. Меліорація і водне господарство. 2016. Вип. 106. С. 108-112. URL:

[http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mivg\\_2016\\_104\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mivg_2016_104_20)

21. Шишкіна О.О. Застосування модифікованого нанокаталізатору для отримання дрібнозернистого бетону. Наука та будівництво. 2016. Т. 10. № 4. С. 20-23.

22. Шишкін О.О., Шишкіна О.О. Вплив колоїдних поверхнево-активних речовин на міцність мілкозернистих бетонів. Наука та будівництво. 2016. Т. 7. № 1. С. 10-13.

23. Олексієнко О.Б., Вергун Л.Ю. Вплив величин дійсної адгезійної міцності на визначення умов нанесення герметизуючих полімерних матеріалів. Наука та будівництво. 2023. Т. 35. № 1. С. 43-47

24. Жарко Л.О., Тарасюк В.Г., Овчар В.П., Фесенко О.А. До питання міцності і класу бетону на стиск в конструкціях. Наука та будівництво. 2020. Т. 23. № 1. С. 27-35.

25. Тарасюк В.Г., Жарко Л.О., Овчар В.П., Борецька Н.С. До визначення міцності бетону. Наука та будівництво. 2019. Т. 20. № 2. С. 31-37.

26. Трофимова Л.Є. Аналіз деяких особливостей процесів структуроутворення у будівельних композитах. Наука та будівництво. 2018. Т. 4. № 18. С. 38-43.

27. Дворкін Л.Й., Бордюженко О.М. Технологічні властивості високоміцних фібробетонів із суперпластифікаторами різних типів. Наука та будівництво. 2018. Т. 6. № 2. С. 10-17.

28. Ушеров-Маршак О.В., Кабусь О.В. Функціональна сумісність компонентів – фактор розвитку сучасного бетону (на прикладі добавок до бетону). Наука та будівництво. 2018. Т. 15. № 1. С. 27-33.

29. Колчунов В.І., Дем'янов О.І., Яковенко І.А., Гарба М.О. Приведення у відповідність дослідних даних тріщиностійкості залізобетонних конструкцій їх теоретичним значенням. Наука та будівництво. 2018. Т. 15. № 1. С. 42-49.

30. Кровяков С.О., Мішутін А.В. Підвищення довговічності легких конструкційних бетонів для гідротехнічних і транспортних споруд шляхом оброблення поверхні пористого заповнювача. Наука та будівництво. 2017. Т.

13. № 3. С. 50-58.

31. Павлюк І.М. Дисперсноармовані дрібнозернисті бетони з покращеними експлуатаційними властивостями на основі модифікованих золоцементних в'язучих речовин. Нові технології в будівництві. 2011. № 1(21). С. 26-31.

32. Драплюк М.В., Пилипенко В.М. Дослідження ресурсозберігаючої технології модифікованого бетону з димпфуючими компонентами. Нові технології в будівництві. 2016. № 30. С. 50-53.

33. Толмачов С.М., Беліченко О.А. Вплив сумісності суперпластифікаторів з цементами на властивості бетонів. Нові технології в будівництві. 2016. № 31. С. 58-63.

34. Клапченко В.І., Краснянський Г.Ю., Азнаурян І.О., Кузнецова І.О. Використання відходів металургійного виробництва в технології бетону. Нові технології в будівництві. 2017. № 33. С. 89-93.

35. Шишкін О.О., Шишкіна О.О. Управління міцністю бетону модифікованими поверхнево-активними речовинами. Нові технології в будівництві. 2020. № 37. С. 69-76.

36. Шишкіна О.О. Застосування комплексного наномодефікатора в технології пінобетону. Нові технології в будівництві. 2020. № 37. С. 77-83.

37. Шишкін О.О., Шишкіна О.О. Вплив міцел, наповнених реакційними порошками, на міцність бетону. Нові технології в будівництві. 2021. № 39. С. 61-68.

38. Кравченко С.А., Постернак О.О., Зінченко С.В., Агаєва О.А., Столевич І.А. Дослідження міцнісних і деформативних властивостей керамзитобетону на цементно-зольному в'язучому. Нові технології в будівництві. 2021. № 39. С. 54-60.

39. Мітрофанов В.П., Мітрофанов П.Б. Розрахунок міцності бетонних елементів з тріщинами на основі спеціального розподілу напруження за краєм тріщини. Нові технології в будівництві. 2023. № 42. С. 18-28.

40. Стабніков В.П. Наукові засади створення біотехнологій



біоцементації для використання в охороні довкілля і промисловості: автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 03.00.20. Київ. 2018. 48 с.

41. Мікробіологія: підручник/М.Г. Сергійчук, В.К. Позур, Т.М. Фурзікова та ін. Київ. Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет». 2008. 541 с.

42. Мікробіологія: підручник / С.П. Гудзь, С.О. Гнатуш, І.С. Білинська. Львів. Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка. 2009. 360с.

43. Страхов Ю.М., Бернштейн С.М. Активація цементних сумішей електрогідравлічним способом. Застосування електрогідравлічного ефекту в технологічних процесах виробництва. Вип. 3. Київ. 1970.

44. Дворкін Л.Й., Соломатов В.І., Вороний В.М., Чудновський С.М. Цементні бетони з мінеральними наповнювачами. Київ. Будівельник. 1991.135 с.

45. Щуров О.Ф. Дисперсна структура та міцність гідросилікатів кальцію. *Гідросилікати кальцію та їх використання*: тези доп. всес. сем. м. Каунас. 1980. С. 159-161.

46. Щуров О.Ф., Ершова Т.О. Природа крихкого руйнування цементного каменю. Фізика крихкого руйнування. Київ. 1976. С. 99-102.

47. Саліх Ф., Коваль С.В. Підвищення безпеки бетонної суміші при поетапному введенні добавок. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2013. Вип. 1. С.145-151. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba\\_2013\\_1\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba_2013_1_25)

48. Єгоров О.В., Петрик І.Ю. Вплив модифікаторів на фізико-механічні властивості цементних бетонів. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2013. Вип. 1. С.152-157. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba\\_2013\\_1\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba_2013_1_26)

49. Забезпечення стійкості бетону в умовах агресивного середовища. Ключко Б.Г. вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2004. Вип. 4. С. 188-191. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt\\_2004\\_4\\_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2004_4_33)

50. Гивлюд М.М., Сташко Н.Г., Марголь І.В. Вплив модифікованого бетону на його експлуатаційні властивості. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. 2013. № 755. С. 73-76. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt\\_2004\\_4\\_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2004_4_37)

51. Шейніч Л.О., Ігнатова І.В., Миколаєць М.Г., Іонов Д.С., Мазер Є.О. Захист та відновлення бетонних конструкцій матеріалами ІЗО. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. 2012. Вип. 43. С. 197-199. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs\\_2012\\_43\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs_2012_43_35)

52. Шаповалов Р.О. Аналіз ушкоджених бетонних покриттів і методи їх усунення. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. 2013. Вип. 49. С. 150-153. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs\\_2013\\_49\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs_2013_49_26)

53. Баженов Ю.М. Сучасна технологія бетону. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. 2010. Вип. 36. С. 10-17. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs\\_2010\\_36\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/bmvs_2010_36_3)

54. Дорошенко О.Ю., Дорошенко Ю.М., Гудіменко К.В. Історія розвитку і використання цементного бетону в будівництві. Вісник національного транспортного університету. 2010. № 21(1). С. 27-30. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu\\_2010\\_21\(1\)\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2010_21(1)_8)

55. Ваганов В.Є., Петрунін С.Ю., Смирнов Є.В. Розумні бетони. Актуальність напрямку, перспективи розвитку та застосування. Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Серія: Стародубські читання. 2013. Вип. 67. С. 77-86. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmssc\\_2013\\_67\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmssc_2013_67_17)

56. Маруха В.І. Підвищення роботоздатності пошкоджених бетонних і залізобетонних конструкцій ущільнювально-зміцнювальними ін'єкціями. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2013. Т. 49, № 1. С. 7-17. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM\\_2013\\_49\\_1\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2013_49_1_3)

57. Большаков В.І., Приходько А.П., Савін Л.С., Салей А.А., Савін Ю.Л., Сторчай Н.С. Фізико-хімічні основи виробництва модифікованих цементів, бетонів. Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-

гражданского, промышленного и транспортного назначения. 2008. Вип. 47. С. 129-140. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit\\_2008\\_47\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2008_47_22)

58. Рунова Р.Ф., Троян В.В. Основы разработки современных высокопрочных бетонов. Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. 2008. Вип. 47. С. 514-522. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit\\_2008\\_47\\_87](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2008_47_87)

59. Москалькова Ю.Г. Межі мікротріщиноутворення для бетонів різних видів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2014. вип. 29. С. 281-285, 286-291. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs\\_2014\\_29\\_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2014_29_41) , [http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs\\_2014\\_29\\_42](http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2014_29_42)

60. Гапоненко Є.О., Мішутин О.В. Підвищення стійкості бетону до мікротріщиноутворення. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2013. Вип. 50. С. 67-73. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba\\_2013\\_50\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba_2013_50_15)

61. Тофанило В.Ю., Коробко О.О., Вировий В.М. Вплив наповнювачів на формування структури бетону. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2013. Вип. 26 . С. 442-46. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs\\_2013\\_26\\_62](http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2013_26_62)

62. Марущак У.Д. Концепція наномодифікування цементуючих систем для швидкотверднучих високофункціональних бетонів. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. 2013. № 844. С. 146-151. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB\\_2016\\_844\\_23](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2016_844_23)

63. Толмачов С.М., Беліченко Є.О. Перспективи застосування наночасток в бетонах транспортного призначення. Будівельні матеріали та виробу. 2017. № 1-2. С. 38-41. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii\\_2017\\_1-2\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii_2017_1-2_16)

64. Кіщинський С.В., Володько В.П., Думанський О.М., Доценко О.М. Цементорганічні бетонні суміші – ефективний матеріал для будівництва і ремонту автомобільних доріг. Дороги і мости. 2006. Вип. 5. С. 259-266. URL:

[http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim\\_2006\\_5\\_21](http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim_2006_5_21)

65. Назаренко В.В. Інтелектуальні бетони врятовують дорожні конструкції. Дороги і мости. 2008. Вип. 10. С. 187-189. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim\\_2008\\_10\\_32](http://nbuv.gov.ua/UJRN/dim_2008_10_32)

66. Пунагін В.В. Керування властивостями бетону. Кривий Ріг. Мінерал. 2001. 155с.

67. Солодкий С.Й. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах: монографія. Львів. Видавництво Національний ун-ту «Львівська політехніка». 2008. 144.

68. Шишкіна О.О. Бетони нового покоління: навч. посібник. Кривий Ріг. Чернявський Д.О. 2021. 97 с.

69. Барабаш І.В., Кучеренко О.А. Технологія бетону. Одеська державна академія будівництва та архітектури. Одеса. Астропринт. 2003. 270 с.

70. Фомін С.Л., Шеймус Касем, Давиденко О.І., Поклонський В.Г. Міцнісні та деформаційні властивості бетону за підвищених температур сталезалізобетонних конструкцій. URL: [78-435-441.pdf \(lpnu.ua\)](#)

71. Tim Van Mullem, Elke Gruyaer, Robby Caspeel and Nele De Belie. First Large Scale Application with Self-Healing Concrete in Belgium: Analysis of the Laboratore Control Tests. Magnel-Vandepitte Laboratory, Department of Structural Engineering and Building Materials, Faculty of Engineering and Architecture, Ghent University 23 February 2020 y. P. 1-21

72. Михайлова Є.О., Мороз М.О., Сінческул О.Л. Хімічне осадження карбонату кальцію різних кристалічних модифікацій. URL: [Михайлова Є.О. Стаття2.pdf \(hneu.edu.ua\)](#)

73. Ahmad S. Effects of Key Factors jn Compressive and Tensile Strengths of Concrete Exposed to Elevated Temperatures// Arabian Journal for Science and Engineering.2014. 36(6). P. 4507-4513.

74. De Muynck W., Debrouwer D., De Belie N., Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials // Cement and Concrete Res. 2008. Vol. 38, N 7. P. 1005—1014.

75. Bang S.S., Galinat J.K., Ramakrishnan V. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii* // *Enzyme and Microbial Technology*. 2001. Vol. 28, N 4—5. P. 404—409.

76. Hammes F. Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation// *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2002. Vol. 1 № 1. P. 3-7.

77. Hua Xia Self-healing of Engineered Cementitious Composites (ECC) in Concrete Repair System// MAsc thesis, Delft University of Technology, Netherlands. 2010. P. 1-56.

78. Jonkers H.M. Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete// *Ecological engineering*/ 2010/ Vol. 3 №62. P. 230-235.

79. Jonkers H.M. At two component bacterial based self-healing concrete // *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*. 2009. №3. P. 215-220.

80. Jonkers H.M. Development of a bacteria-based self-healing concrete// *Tailor Made Concrete Structures – New Solution for Society*. 2008. P. 425-430.

81. Jonkers H.M. Self-healing concrete: a biological approach// *Self-healing Material: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, Springer. 2007. P. 195-204.

82. Mukherjee A. Biocalcification by *Sporosarcina pasteurii* using corn steel liquor as nutrient source// *Industrial Biotechnology*. 2010. Vol. 6 № 3. P. 170-174.

83. Raijiwala D. B. High Performance Green Concrete// *Civil Engineering and Architecture*. 2013. Vol 1 (1). P. 1-6.

84. Річардсон А., Ковентрі К., Песлі Дж. Мікробіологічне осадження кальциту: застосування для лікування тріщин. Northumbria University. 2016. С. 1-4.

85. Van Tittelboom K., De Belie N., De Muynck W., Verstraete W. Use of bacteria to repair cracks in concrete // *Cement and Concrete Res*. 2010. Vol. 40, N 1. P. 157—166.

86. Wang J.Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N. Self-healing concrete by

use of microencapsulated bacterial spores // *Cement and Concrete Res.* 2014. Vol. 56. P. 139—152.

87. Mitchell J.K. Clouser to «Biological Considerations in Geotechnical Engineering». 2005. Vol. 131 № 10. P. 1222-1233.

88. Stocks-fischer S., Galinat J.K., Bang S.S. Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub> // *Soil Biology and Biochemistry.* 1999. P. 31. 22. Wiktor V., Jonkers H.M. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete // *Cement and Concrete Composites.* 2011. Vol. 33, N 7. P. 763—770.

89. Ramakrishan V. A novel technique for repairing cracks in high performance concrete using bacteria // *Proc. International conference on high performance high strength concrete.* Perth. Australia. 1998. P. 597-618.

90. Production in seawater of thermostable alkaline protease by a halotolerant strain of *Bacillus licheniformis* / M.G. Fortina, P.L. Manachini // *Biotechnol. Lett.* 1998. Vol. 20. P. 527-529.

91. Achal V. Lactose mother Liquor as an alternative nutrient source for microbial concrete production by *Sporosarcina pasteurii* // *Journal of Industrial Microbiology Biotechnology.* 2009. Vol. 36. № 3. P.433-438.

92. Bacterial roles in the precipitation of carbonate minerals / S. Castanier, G. Le Metayer-Level, J.P. Perthuisot, R.E. Riding, S.M. Awramik // *Microbial sediments.* Heidelberg: Springer-Verlag. 2000. P. 32-39.

93. Bacterially induced Mg-Calcite formation: Role of Mg<sup>2+</sup> in development of crystal morphology / M.T. Gonzalez-Munoz, K. Ben-Chekroun, A. Ben-Aboud, J.M. Arias, M. Rodriguez-Gallego // *Journal of Sedimentary Research.* 2000. Vol. 70. P. 559-564.

94. Caporaso J.G. Ultra-high-throughput microbial community analysis on the Illumina HiSeq and MiSeq platforms // *ISME J.* 2012. P. 1-4.

95. Biomineralization of carbonates by *Halomonas eurihalina* in solid and liquid media with different salinities: crystal formation sequence / M.A. Rivadeneyra, G. Delgado, A. Ramos-Corenzana, R. Delgado // *Res Microbiol.* 1998. Vol. 149. P. 277-287.

96. De Muynck W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete // *Construction and Building Materials*/ 2008. Vol. 22(5). P. 875-85.

97. Day M. Lantana: Current Management Status and Future Prospects // ACIAR, Canberra, ACT, Australia. 2003.