

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**О. В. Кондращенко**

**КОРОЗИЯ І ЗАХИСТ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**  
**ТА КОНСТРУКЦІЙ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для здобувачів першого (бакалаврського) і другого (магістерського) рівнів  
вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності  
192 – Будівництво та цивільна інженерія)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2023**

УДК 628.483: 620.197

**Кондращенко О. В.** Корозія і захист будівельних матеріалів та конструкцій : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) і другого (магістерського) рівнів вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія) / О. В. Кондращенко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 91 с.

Автор

д-р техн. наук, проф. О. В. Кондращенко

Рецензенти:

**О. С. Борзяк**, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд (Український державний університет залізничного транспорту);

**С. М. Толмачов**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів (Харківський національний автомобільно-дорожній університет)

*Рекомендовано кафедрою матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій, протокол № 8 від 08.03.2023*

Конспект лекцій складено з метою надати здобувачам системні уявлення про причини руйнування будівельних матеріалів, виробів і конструкцій та способи подовження їх неперервної роботи шляхом підбору антикорозійного захисту

© О. В. Кондращенко, 2023

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
Мета і завдання дисципліни.....	5
Шляхи забезпечення довговічності будівель і споруд.....	5
<b>1 ФІЗИКО-ХІМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Природні рідкі середовища.....	10
1.2 Газоповітряні середовища та аерозолі.....	16
1.3 Тверді агресивні середовища.....	17
<b>2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ МІНЕРАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>18</b>
2.1 Класифікація факторів, що призводять до руйнування мінеральних будівельних матеріалів.....	18
2.2 Класифікація мінеральних матеріалів залежно від їх поводження в агресивних середовищах.....	18
2.3 Механізм процесів корозії мінеральних будівельних матеріалів і способи антикорозійного захисту.....	20
<b>3 ФІЗИЧНА І ФІЗИКО-ХІМІЧНА КОРОЗІЯ БЕТОНУ. ЗАСОБИ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ.....</b>	<b>27</b>
3.1 Температурні деформації бетону.....	27
3.2 Морозне руйнування бетону.....	28
3.3 Вологісні деформації.....	30
3.4 Корозія від впливу солей.....	31
3.5 Механічний знос.....	32
3.6 Вплив осмотичних явищ та контракції на процеси руйнування.....	33
<b>4 ХІМІЧНА КОРОЗІЯ БЕТОНУ ТА СПОСОБИ ЗАХИСТУ ВІД НЕЇ.....</b>	<b>34</b>
4.1 Корозія першого виду (вилуговування).....	35
4.2 Корозія бетону другого виду.....	36
4.2.1 Загальнокислотна корозія.....	37
4.2.2 Корозія у розчинах солей (магнезіальна).....	41
4.2.3 Корозія у лужних середовищах.....	43
<b>5 КОРОЗІЯ БЕТОНУ ТРЕТЬОГО ВИДУ. СПОСОБИ ЗАХИСТУ.....</b>	<b>43</b>
5.1 Сульфатна корозія бетону.....	44
5.2 Корозійні процеси між компонентами бетону.....	46
5.3 Газова корозія бетону.....	46
<b>6 ЕЛЕКТРОХІМІЧНА КОРОЗІЯ ЗАЛІЗОБЕТОНУ ТА СПОСОБИ ЗАХИСТУ.....</b>	<b>50</b>
6.1 Механізм електрохімічної корозії залізобетону.....	50
6.2 Корозія арматури в залізобетоні та способи її пасивації.....	51
6.3 Електрокорозія залізобетону та способи захисту.....	55

7 КОРОЗІЯ МЕТАЛІВ І ЇХ АНТИКОРОЗІЙНИЙ ЗАХИСТ .....	57
7.1 Характеристика металів і сплавів, як об'єктів корозії.....	57
7.2 Хімічна корозія металів.....	58
7.2.1 Газова корозія металів.....	58
7.2.2 Корозія металів у розчинах неелектролітів.....	60
7.2.3 Електрохімічна корозія металів.....	61
8 БІОЛОГІЧНА КОРОЗІЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ ЗАХИСТ .....	74
8.1 Біокорозія металів.....	74
8.2 Мікробіологічна корозія бетону.....	75
8.3 Біокорозія полімерів і лакофарбових матеріалів.....	81
8.4 Біокорозія деревини та її захист.....	83
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87
ДОДАТОК А.....	89

## **ВСТУП**

### **Мета і завдання дисципліни**

Дисципліна «Корозія і захист будівельних матеріалів та конструкцій» ставить за мету підвищення освітньо-кваліфікаційного рівня здобувачів усіх будівельних спеціальностей і вирішує такі завдання:

- надати систематизовані сучасні уявлення про причини виникнення різних видів корозії будівельних матеріалів, що експлуатуються у складних умовах, про механізм перебігу корозійних процесів;
- навчити оцінювати ступінь агресивності експлуатаційних середовищ з метою грамотного вибору способів первинного і вторинного захистів конструкцій, будівель та споруд від корозії;
- прищепити здобувачам навички застосування нормативних документів, що регламентують оцінку агресивності середовищ стосовно конструкційних матеріалів, вибір матеріалів для конкретних умов експлуатації і грамотне піклування про захист конструкції упродовж всього періоду їх експлуатації.

Лекційний курс «Корозія і захист будівельних матеріалів та конструкцій» побудовано з урахуванням взаємозв'язку процесів, що мають місце у структурі будівельних матеріалів під впливом агресивних факторів довкілля, з довговічністю та надійністю будівельних матеріалів і конструкцій. У ньому докладно розглядається механізм фізичної, хімічної, електрохімічної, електричної та біологічної корозій будівельних матеріалів і конструкцій. Зазначено вплив агресивних корозійних середовищ на стійкість і довговічність будівельних виробів. Особлива увага приділяється поведінці бетонних, залізобетонних і металоконструкцій. Дається опис методів проведення антикорозійних робіт. Відзначаються перспективні сучасні напрямки захисту будівельних конструкцій в агресивних середовищах. Лекційний курс закріплюється проведенням практичних занять або лабораторних робіт і організацією самостійної роботи здобувачів .

## Шляхи забезпечення довговічності будівель і споруд

В багатьох галузях промисловості у технологічних процесах використовуються і виділяються хімічні активні речовини, які руйнують будівельні вироби та конструкції. Отже, коли під час проектування будівель та споруд не передбачити, а під час будування не забезпечити необхідні заходи захисту конструкцій, можливо їх передчасне руйнування – корозія.

Термін «корозія» означає процес швидкого або повільного руйнування будівельних матеріалів та конструкцій внаслідок їх взаємодії з довкіллям у разі наявності хімічної, електрохімічної, мікробіологічної та інших видів агресії. Корозія завдає народному господарству величезних збитків. Наприклад, безповоротні втрати металів від корозії становлять близько 8 % від початкової маси, і за весь час масового виробництва та застосування втрачається до 75 % виробленого. А збитки від біологічної корозії оцінюються у 2–3 % обсягу промислової продукції.

За даними натурних обстежень, аналізу проектних матеріалів і експертної оцінки фахівців встановлено, що агресивному впливу піддаються в різних галузях народного господарства від 15 до 75 % будівельних конструкцій будинків і споруд.

Часто через корозійне пошкодження доводиться замінювати окремих вузол або всю конструкцію. До того ж сам ремонт конструкції чи її частини, як правило, є дорогим заходом через великі витрати праці і застосування дефіцитних матеріалів. Коли ж врахувати також витрати, пов'язані з втратами виробництва в період ремонту й аварійних зупинок, то стає зрозумілим, що корозійні процеси заподіюють великі збитки як окремим підприємствам, так і всьому господарчому комплексу країн, тому захист будівельних конструкцій від корозії є однією з головних і важливих проблем у вирішенні питань забезпечення довговічності будівель і споруд, а також економії матеріальних ресурсів і безпечної роботи підприємств.

У минулому сторіччі був накопичений великий науковий потенціал, розроблені основи теорії корозії бетону й арматури, способи забезпечення

корозійної стійкості залізобетонних і металевих конструкцій в агресивних середовищах. Ці розробки доповнюють і широко використовують у практиці будівництва і в наш час.

Дослідниками встановлено, що корозія відбувається відповідно до законів кінетики можливих термодинамічних реакцій і призводить до зниження вільної енергії матеріалу, в результаті чого утворюються більш стійкі в термодинамічному відношенні сполуки. З огляду на тенденцію останніх років використання у промисловості будівельних матеріалів відходів виробництва (золи, шлаків, золошлакових сумішей тощо), застосування для виготовлення бетонних і залізобетонних конструкцій безцементних в'язучих і в'язучих зі зниженим вмістом клінкерного фонду необхідно вирішувати питання довговічності цих конструкцій навіть під час експлуатації в нормальних атмосферних умовах (житлові, адміністративні будівлі тощо).

Підвищення надійності й корозійної стійкості будівельних виробів і конструкцій в агресивних середовищах може бути досягнуто створенням корозійностійких будівельних матеріалів нового покоління з використанням економічних заводських технологій і нових видів арматурних сталей високої надійності, що дозволить забезпечити економію металу на 20–40 %. Створення якісних і довговічних конструкцій охоплює кілька важливих наукових напрямів:

а) дослідження стійкості арматури бетону, сталевих зв'язок і залізобетонних на нових в'язучих. Розробка заходів забезпечення довговічності залізобетонних конструкцій під час одночасного впливу агресивного середовища і навантаження;

б) розробка бетонних і залізобетонних конструкцій високої довговічності, корозійної стійкості й стійкості у разі біологічної корозії, що виготовляються за економічними технологіями з використанням відходів промисловості і сільського господарства.

Отже, необхідно приділяти увагу вивченню такого:

– процесів внутрішньої корозії бетону під час використання місцевих сировинних матеріалів з підвищеним вмістом шкідливих домішок;

– оптимальних технологічних параметрів виготовлення нових видів високоміцних арматурних сталей, розробці захисних покриттів по арматурі і технології їхнього нанесення;

– нових видів захисних матеріалів з використанням вітчизняної сировини, критеріїв і методів оцінки їхньої довговічності;

– хімічних способів видалення продуктів корозії з поверхні арматури і корозійностійких складів для ремонту експлуатованих конструкцій;

в) розробка і впровадження методів контролю параметрів якості і довговічності будівельної продукції на заводах-виготовлювачах.

У більшості випадків основними причинами пошкоджень конструкційних елементів і самих матеріалів є корозійні процеси, що розвиваються в результаті несприятливого впливу навколишнього середовища. Більшість шляхопроводів і мостів у містах, дорожні покриття руйнуються від застосування протиожеледних реагентів, через виділення в атмосферу двигунами автотранспорту та промисловими підприємствами оксидів азоту, сірчаного та інших газів, від періодичного заморожування-розморожування бетону. Щорічні аварійні обвали комунальних тунелів, особливо колекторів стічних вод, відбуваються внаслідок газової корозії металевих і залізобетонних елементів. Велику неприємність завдають будівельникам висоли на цегельних і бетонних конструкціях житлових і цивільних будинків і споруд.

Зменшення маси будинків, індустріальність монтажу, архітектурна виразність дає дорогу новим видам конструкцій. Але зі зменшенням їх товщини будівельні конструкції стали ще більш уразливими для корозії. Результатом цього є руйнування виробів навіть до моменту здачі в експлуатацію будівельного об'єкта. Причиною, тут як правило, є погана якість самих матеріалів. Але немаловажну роль відіграє і культура виробництва та експлуатації. Вибір будівельних матеріалів і конструкцій, засобів їх захисту



треба здійснювати залежно від проєктного терміну експлуатації будівельного об'єкта.

Серед загальних вимог до будівельних конструкцій на першому місці є їх довговічність, яка крім наявності вихідних характеристик якості має задовольняти вимогам безпеки й експлуатаційної придатності з належним ступенем надійності упродовж заданого терміну служби під час різних видів впливу – це навантаження, кліматичні й технологічні фактори, поперемінне заморожування і відтавання, агресивний вплив тощо.

Сучасні європейські норми проєктування залізобетонних конструкцій містять аналіз впливів, поділяючи їх на впливи довкілля, хімічні, фізичні і непрямі впливи, розрахунок довговічності, вимоги до матеріалів, провадження робіт і якість їх виконання. Для тимчасових і унікальних споруд і будівель, що піддаються надзвичайному або незвичайному впливам, необхідний рівень довговічності має розглядатися на стадії проєктування, а також можуть знадобитися зміни в заходах, що рекомендуються, з урахуванням прямого або непрямого впливів.

Забезпечення довговічності створюється шляхом:

- використання конструктивних форм, що потребують мінімального водоцементного рівня і води замішування;
- надання конструкціям або деталям розміру і форми, що забезпечують гарне водовідведення і відсутність застою води та тріщин, через які могла б просочуватися вода.

Достатня довговічність досягається за допомогою таких заходів, як урахування вимог довговічності під час проєктування будівельних споруд; правильний вибір вихідних компонентів бетону; відповідний догляд за бетоном; захист бетону, наприклад, за допомогою просочення або покриття.

# 1 ФІЗИКО-ХІМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ

Велика кількість різновидів будівельних матеріалів та активних речовин в довкіллі, які є агресивними до будівельних матеріалів, призводить до великого різноманіття можливих корозійних процесів, які є окремими випадками корозії. Унаслідок чого виникла необхідність класифікувати корозійні впливи залежно від виду середовищ, що пов'язане зі строками служби будівель та споруд.

Агресивні середовища класифікують за їх фізичним станом на рідкі, тверді і газоподібні, і кожне з них має свої особливості. У твердому й газоподібному середовищах корозійні процеси фактично починаються і відбуваються тільки в присутності рідкої фази, тому в першу чергу слід розглянути рідкі середовища.

## 1.1 Природні рідкі середовища

Всі рідкі середовища вміщують воду, а вода є одним з головних природних мінералів, який багато в чому визначає перебіг природних і технологічних процесів. У її структурі виявлено низку аномалій, спричинені сильним взаємним тяжінням молекул води внаслідок утворення водневих зв'язків, що багато в чому визначає структуру та властивості новоутворених гідратних форм. За нормальної температури вода складається з одинарних і деякої кількості подвійних комплексів. Вода, як хімічна сполука, хоча й малою мірою, але дисоціює на іони за схемою (1.1):



Оскільки активності іонів у розбавлених розчинах приблизно дорівнюють їхнім концентраціям, а активність самої води близька до одиниці, то константа дисоціації води за схемою (1.2) дорівнює:

$$K = [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14}; [\text{OH}^-] = 10^{-2} \text{ г-моль/л.} \quad (1.2)$$

З підвищенням температури і тиску ступінь дисоціації води зростає.

Вода має високу здатність розчиняти багато речовин, що може супроводжуватися появою гідратів, а також гідролізом, що призводить до зміни

величини рН. Частина речовин (органічні сполуки і деякі гази) у воді не іонізуються і знаходяться у стані молекулярного роздроблення. У складі води зазвичай присутні розчинені неорганічні солі (сульфати, хлориди і карбонати натрію, кальцію, магнію і калію), їх розчинність наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Розчинність деяких неорганічних солей

Хімічна формула солі	Розчинність при 18 °С, г/л
CaCl <sub>2</sub>	731,9
MgCl <sub>2</sub>	558,1
MgSO <sub>4</sub>	354,3
NaCl	328,6
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	168,3
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	133,9
CaSO <sub>4</sub>	2,0
CaCO <sub>3</sub>	0,01

Велике значення для розвитку корозійних процесів має і здатність води розчиняти різні газоподібні речовини. Дані про розчинність деяких газів за температури наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Розчинність деяких газів за температури

Температура, °С	Розчинність, мг газу / 1 л розчину		
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
0	48,9	–	1 713
5	42,9	–	1 432
10	38,5	19,5	1 195
15	34,2	17,4	1 005
20	30,8	16,0	870
25	28,2	14,8	757
30	26,3	13,8	665

Загальна мінералізація природних вод залежить від кліматичних умов і типу порід, що залягають у даному районі. Її мінімальне значення притаманне регіонам з холодним кліматом і великою кількістю атмосферних опадів, а максимальне відповідає теплим посушливим областям. Контакт з легкорозчинними породами сприяє підвищенню загальної мінералізації вод

незалежно від кліматичних умов. Природні води поділяють на підземні і поверхневі.

Найважливішою характеристикою води, яка багато в чому визначає співвідношення різних форм іонів у розчині є показник рН.

У поверхневих водах значення рН перебуває в діапазоні від 4,5 до 8,5, а в ґрунтах – від 4,0 до 9,0. У широких межах рН (4,5) повністю розчинними є тільки солі лужних металів (K, Na) і меншою мірою лужноземельних (Ca, Mg), а також галоїди (Cl, F). Більшість солей металів у кислих розчинах перебуває у формі катіонів, але з підвищенням рН вони зазвичай випадають у формі гідроксидів і основних солей. На значення рН впливають такі чинники, як температура розчину, його концентрація, іонна сила тощо. Для більшості елементів з підвищенням температури значення рН осадження гідроксидів зростає.

Виходячи з умов формування природних вод за значенням рН, їх можна розділити на чотири групи:

1. Сильнокислотні (рН менше 3). Кислотність у них обумовлена наявністю вільної сірки або соляної кислоти.

2. Кислі й слабкокислі (рН у діапазоні від 3 до 6,5). Кислотність залежить від присутності органічних кислот і вуглекислоти.

3. Нейтральні й слабколужні (рН у діапазоні від 6,5 до 8,5), що викликано наявністю  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ .

4. Сильнолужні (рН більше 8,5), що пов'язано з присутністю карбонату натрію.

Не менш важлива характеристика водних розчинів – їхній окислювально-відновний потенціал – Eh. Величина Eh відображає співвідношення різних форм елементів у водному розчині. Перебігу окислювальних процесів сприяє наявність у воді розчиненого кисню і відкритий контакт із повітряними масами, що містять вільний кисень. Окислювачами можуть бути й інші елементи, здатні приймати електрони. Зі зменшенням вмісту кисню у воді вона стає більш відновлювальним середовищем, ніж окислювальним. У відновлювальному

середовищі кисню немає, тому значення Eh низькі – як правило, менше 0,1 В. Поглинання кисню в природних водах зазвичай відбувається в результаті біохімічних процесів і процесів окислювання вуглеводних органічних речовин.

Ступінь мінералізації і хімічний склад ґрунтових вод визначаються в основному мінералогічним складом гірських порід і ґрунтів, що залягають на шляху руху ґрунтового потоку, а також кількістю опадів і кліматичних умов даного регіону. Найбільш типовою у ґрунтових водах є присутність іонів  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  і  $\text{HCO}_3^-$ . Ці води за характером утворення поділяються на води вилуговування і континентального засолення.

Хімічний склад ґрунтових вод вилуговування є різноманітним. Ґрунтові води вилуговування характерні для лісостепових і степових районів.

Ґрунтові води континентального засолення зустрічаються в сухих степах, де мало опадів і висока швидкість випару води. Значній засоленості відповідає висока мінералізація вод легкорозчинними солями  $\text{NaCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , а незначній – мала мінералізація вод гідрокарбонатно-натрієвими і менше сульфатно-натрієвими солями.

Властивості міжпластових вод необхідно враховувати під час будівництва підземних споруд. Ці води відрізняються від ґрунтових більш постійним складом (для кожного горизонту), що не залежить від кліматичних і сезонних факторів. Однак ступінь мінералізації та іонний склад цих вод і їхня агресивність щодо бетону можуть бути різними.

Річкові води зазвичай слабомінералізовані й у більшості випадків характеризуються агресивністю вилуговування. Хімічний склад річкової води може змінюватися як у період паводка, так і внаслідок впадання інших річок або потрапляння стічних вод – промислових, побутових тощо.

Хімічний склад озерних вод коливається в широких межах (від 0,02 г/л до 360 г/л) і залежить від того, чи є з них стік води, що визначається насамперед рельєфом місцевості. Озерні води, як і ґрунтові, можуть характеризуватися усіма видами агресії.

Води морів (океанів) є найпоширенішим видом природних вод і належать до сильномінералізованих. Основними їх компонентами є хлориди і сульфати натрію та магнію.

*Промислові й стічні води*, виходячи з вмісту домішок, підрозділяють на забруднені й умовно чисті. Забруднення розрізняють за хімічним складом і фізичним станом. За хімічним складом забруднення підрозділяються на мінеральні й органічні, за фізичним станом – залежно від ступеня дисперсності: розчинені, колоїдні й нерозчинені. До нерозчинних домішок належать всі частки у вигляді зависів з розмірами більше десятих часток міліметра, а також суспензії, емульсії та піни з розмірами часток від десятих часток міліметра до 0,1 мкм. До мінеральних домішок стічних вод відносять пісок, глину, частки руди, шлаку, мінеральні солі.

Концентрація забруднень під час визначення складу стічних вод виражається в мг/л і залежить від норми водовідведення: чим ця норма більше, тим нижче концентрація. Також концентрація забруднень залежить від часу доби (вночі вона мінімальна), сезону (взимку підвищується, тому що менше водовідведення), змінюється і температура стічних вод.

Промислові води відрізняються великою розмаїтістю, їх можна підрозділити за складом на такі групи:

- вміст переважно мінеральних забруднень (від підприємств металургійної промисловості й промисловості будівельних матеріалів);
- переважна кількість органічних забруднень (підприємства харчової промисловості);
- зі змішаним забрудненням (підприємства хімічної промисловості).

Під час змішування різних стічних вод їхні складові частини швидко взаємодіють. У результаті утворюється осад у вигляді шламу, а у разі зміни рН і Eh можуть випадати гідроксиди металів, утворюватися їхні сульфідні і виділятися газоподібні продукти у виді  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  та інше. Для стічних вод важливо знати такі показники, як здатність домішок осаджуватися, спливати на

поверхню, коагулювати, фільтруватися, а також їх питома електрична провідність, величини рН і Eh, температура, швидкість руху тощо.

Від фізичних властивостей механічних домішок і швидкості руху стічних вод залежать швидкість механічного зносу будівельного матеріалу або конструкції та умови їхнього зарощування.

Питома електрична провідність стічних вод визначає їх корозійну активність стосовно бетону й арматури конструкцій. Вона відбиває загальний ступінь іонізації речовин, що знаходяться у стічних водах, і дозволяє дати побічну оцінку їхній реакційній здатності.

Величина рН показує ступінь агресивності води за загальнокислотною ознакою. Нижньою межею стійкості продуктів гідратації цементів прийнято значення рН = 6,5. Тому стічні води за ступенем їх агресивності можна поділити на дві групи – з рН більше 6,5 і з рН менше 6,5. Оцінка ступеня впливу стічних вод на металеві закладні деталі та інші металеві елементи конструкцій більш диференційована: так, води з рН = 4–6 є сильноагресивними стосовно заліза і сталі, із рН = 6–6,5 – агресивні; із рН = 6,5–8,5 – слабкоагресивні.

Показник Eh стічних вод також впливає на оцінку ступеня їх агресивності до бетону і сталевий арматури. Якщо Eh більше 0, то середовище є окислювальним (аеробним) і містить кисень. При Eh менше 0, стічні води вважаються відновними, тобто анаеробними. Вільний кисень відсутній, а в контакті зі стічними водами можуть знаходитися CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S та інші агресивні гази. Перебіг відновлювальних реакцій забезпечують мікроорганізми, що розкладають органічні речовини. У цих умовах Fe<sup>3+</sup> і Mn<sup>4+</sup> переходять у форми з більш низькою валентністю, а сульфати – у сульфіди. Присутність сірководню приводить до утворення малорозчинних сульфідів металів.

Оскільки температура стічних вод може коливатися від 4 °С до 90 °С і вище, необхідно враховувати і цей фактор під час проектування конструкцій. Слід дотримувати норм, наведених у СНіП 2.03.11-85 [1], де вказується, що агресивність рідких середовищ збільшується в середньому на одну ступінь, якщо їхня температура підвищилася від норми (25 °С) до 70 °С.

## 1.2 Газоповітряні середовища та аерозолі

У чистій і сухій атмосфері бетон, залізобетон, сталь і природні кам'яні матеріали без видимих змін експлуатуються багато сотень і навіть тисяч років. Звичайна земна атмосфера складається з таких компонентів: азоту – 78 %, кисню – 20,95 %, аргону – 0,93 %, вуглекислого газу – 0,03 %. Залишок, що складає 0,1 відсоток, приходить на водень, неон, криптон, гелій, радон, аміак, йод, пероксид водню та деякі інші компоненти. Однак в атмосфері є і забруднення, що потрапляють до неї в результаті господарської діяльності людей. Забруднення повітря газами відбувається внаслідок роботи промислових підприємств, а також сільськогосподарських – тваринницьких і птахівничих комплексів. У атмосфері підземних споруд можлива присутність вуглекислоти або сірководню у підвищеної кількості. Основні забруднювачі повітря – продукти згоряння палива на теплових електростанціях, у котельнях, у різних паливних пристроях, двигунах внутрішнього згоряння тощо. Агресивність газового середовища значно підвищується у приміщеннях і на території промислових підприємств, у технологічному процесі яких переробляються гази, агресивні щодо бетону, сталевій арматури або металоконструкцій. Такі умови можуть бути в прибережних морських районах, в яких агресивність повітряному середовищу додають аерозолі солей морської води.

Найбільш небезпечним забрудненням, характерним для індустріальних районів, є діоксид сірки  $SO_2$ , потім іде вуглекислий газ  $CO_2$  та оксиди азоту  $NO$  і  $NO_2$ . Практично завжди в атмосфері присутня суміш різних газів, крім цього в цехах підприємств хімічної, нафтохімічної, металургійної та інших галузей промисловості повітря може бути забруднено молекулярним хлором  $Cl_2$ , парами соляної кислоти  $HCl$ , сірководнем  $H_2S$  та іншими газами.

Відповідно до відносної вологості атмосферне повітря поділяється на сухе ( $W$  менше 60 %), нормальне ( $W = 61-75$  %) і вологе ( $W$  більше 75 %). Відносна вологість, температура і концентрація газів є основними характеристиками газоподібних середовищ, що визначають ступінь їхньої агресивності стосовно матеріалів згідно зі СНіП 2.03.11-85 [1].



Частинки пилу й аерозолі, що перебувають в атмосфері, підрозділяються: на корозійно-активні; депасиватори; ті, що збільшують під час розчинення питому електричну провідність півки електроліту; адсорбенти; інертні. Пилоподібні забруднення також поділяються на малорозчинні, малогігроскопічні, легкорозчинні гігроскопічні. Оцінку ступеня агресивності газоповітряних і твердих середовищ здійснюють за СНіП 2.03.11-85 [1].

В індустріальних районах необхідно враховувати розташування споруди щодо джерела виділення агресивних газів, напрямку вітру, відстань від джерела агресивного впливу та його вид. Варто враховувати також перспективи промислового будівництва і підвищення вимог до газоочисних систем підприємств. Під час будівництва поблизу морів або солоних озер слід враховувати, що солі можуть накопичуватися в порах бетону, а це залежить, у свою чергу, не тільки від їхньої наявності в атмосфері приморських районів, але і від напрямку вітрів і вологості клімату.

### **1.3 Тверді агресивні середовища**

До твердих агресивних середовищ, з якими можуть контактувати залізобетонні конструкції, належать сухі мінеральні ґрунти й різні сипучі хімічні матеріали: добрива, фарби, гербіциди та інші хімікати. Корозійні процеси в твердих середовищах за звичайною температурою без участі рідкої фази не відбуваються.

Агресивність сухих ґрунтів обумовлюється кількістю і складом солей, що містяться в них, умовами зволоження і вологістю клімату.

Для внутрішніх приміщень ступінь агресивності порошкоподібного твердого середовища визначається зволоженням за рахунок конденсаційної вологи, що обумовлена капілярною конденсацією між частками порошку і гігроскопічністю матеріалу.

А корозійні процеси між твердими агресивними середовищами і бетоном стають можливими тільки з появою рідкої фази або в результаті безпосереднього зволоження твердого середовища атмосферними опадами, ґрунтовими або поверхневими водами або технологічними розчинами.

## **2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ МІНЕРАЛЬНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

### **2.1 Класифікація факторів, що призводять до руйнування мінеральних будівельних матеріалів**

Залежно від зовнішнього впливу на будівельні матеріали мінерального походження корозію класифікують на фізичну, хімічну, електрохімічну, біологічну тощо. Під час вибору матеріалів для будівельних робіт з точки зору їх корозійної стійкості треба враховувати такі фактори й умови:

- під час експлуатації матеріалів у практично неагресивних зовнішніх умовах вибір ведуть тільки за марочною міцністю;
- під час постійного впливу кліматичних і атмосферних чинників без насичення водою враховують атмосферостійкість і марочну міцність;
- за можливого епізодичного впливу температур нижче 0о С у водонасиченому стані беруть до уваги морозостійкість і водонепроникність;
- у разі поперемінного заморожування та відтаванні, якщо відбувається епізодичне насичення водою, враховують морозостійкість і водонепроникність;
- у разі механічного стирання за постійного або епізодичного водонасичення і впливу знакозмінних температур враховують міцність, щільність і морозостійкість;
- у разі впливу всіх видів агресивних чинників, відповідно до існуючої класифікації, враховують корозійну стійкість.

### **2.2 Класифікація мінеральних матеріалів залежно від їх поводження в агресивних середовищах**

Корозійною стійкістю будівельних матеріалів називають їх здатність чинити опір процесам руйнування, що протікають у матеріалах під час впливу на них зовнішніх агресивних факторів. Ця властивість може бути притаманна будь-якому будівельному матеріалу незалежно від його природи та складу. Матеріали, які є стійкими в одних умовах експлуатації, стають нестійкими в

інших умовах. Корозієстійкими називаються такі матеріали, що відрізняються корозійною стійкістю в різних агресивних середовищах і практично не потребують додаткового захисту.

До мінеральних будівельних матеріалів належать природні камені, кераміка, бетони, будівельні розчини та інші, які відрізняються від металевих своїми структурними і фізико-механічними властивостями, а також механізмом взаємодії з агресивними факторами довкілля. Багато з цих будівельних матеріалів мають характерну для неметалічних матеріалів молекулярну структуру, якій притаманний іонний зв'язок. Такі матеріали відносно легко реагують з водою з утворенням іонних розчинів і ще більш інтенсивно взаємодіють з кислотами, лужними чи мінералізованими водами.

Важливою особливістю більшості мінеральних будівельних матеріалів, особливо штучних їх різновидів, є значна пористість. Це призводить до можливості фільтрації і підсмоктування води, зволоження внаслідок конденсації парів води, а також до інтенсивної взаємодії матеріалів з рідкими середовищами через пори. Ще однією особливістю більшості матеріалів цієї групи є неоднорідність і полімінеральність їх структури, що часто переходить у конгломератну. Наприклад, більшість гірських порід складаються з кількісного числа мінералів (граніти, діорити, сієніти, доломіти, порфіри та інше), а такі відносно однорідні гірські породи, як вапняки, містять сторонні домішки і вкраплення, що можуть істотно змінювати їх властивості. Ще більш складні за структурою і складом штучні кам'яні матеріали і конструкції з них, наприклад, бетони, силікатна цегла та інше. Корозійна стійкість цементуючої частини таких мінеральних матеріалів є їх найбільш слабким місцем.

Можливість перебігу процесів корозії обумовлена хімічними властивостями всіх складових частин будівельного матеріалу, щільністю структури і концентрацією агресивних компонентів експлуатаційного середовища. Розвиток корозійних процесів у конструкціях і спорудах, виконаних з мінеральних будівельних матеріалів, обумовлений різними факторами, повністю врахувати які досить важко. Усі найбільш поширені в

будівництві матеріали мінерального походження можна умовно розділити на три групи залежно від їхнього поведіння в агресивних середовищах.

До *першої* групи належать:

- природні вапняки і доломіти;
- звичайні бетони і залізобетон на портландцементі та його різновиди;
- оздоблювальні та розчини для кладки;
- азбестоцементні вироби;
- силікатні будівельні матеріали.

Всі ці матеріали єднає те, що до їх складу входять гідрати або карбонати кальцію і магнію. Характерними їх властивостями є відносно висока лугостійкість і досить низька кислотність.

До *другої* групи належать:

- кислі гірські породи, що переважно складаються з кремнезему, алюмосилікатів тощо;
- бетони на основі рідкого скла з кремнієфтористим натрієм.

Такі матеріали мають досить високу стійкість не тільки до кислот, але і до лугів низьких і середніх концентрацій за нормальної температури завдяки своїм властивостям, таким як висока щільність і міцність.

До *третьої* групи належать керамічні матеріали.

Усі керамічні матеріали, особливо з великою щільністю, мають високу кислотостійкість.

### **2.3 Механізм процесів корозії мінеральних будівельних матеріалів і способи антикорозійного захисту**

*Корозія будівельних матеріалів з природного каменю.* Будівельні вироби і конструкції, що виготовлені з природних кам'яних матеріалів, відзначаються такими самими фізико-хімічними властивостями гірських порід, з яких вони вироблені. Так, вивержені гірські породи, як кристалічні, так і аморфні, відрізняються високою кислотостійкістю і достатньою лугостійкістю, а породи з щільною структурою до того ж є морозостійкими. Їх широко використовують

під час зведення будинків і споруд, наприклад, для блоків фундаментів, стінових виробів тощо.

Породи осадового походження теж широко використовують у будівництві, але вони не мають високої корозійної стійкості, за винятком механічних осадових порід (гравій, пісок), що зберегли властивості первинних порід. Низьку кислотостійкість мають вапняки ( $\text{CaCO}_3$ ), магнезити ( $\text{MgCO}_3$ ), доломіти ( $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ ) і щільні кремнеземисті вапняки. Відомо, що звичайні вапняки обмежено стійкі до дії води, що містить  $\text{CO}_2$  у кількості менше ніж 15–20 мг/л, а у разі підвищення його концентрації утворюється бікарбонат кальцію, що легко розчиняється у воді. Це і призводить до руйнування.

Природний гіпсовий камінь ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) і ангідрит ( $\text{CaSO}_4$ ) легко піддаються корозійному руйнуванню під впливом кислот і легко розчиняються у воді (розчинність гіпсу складає 2,5 г/л), але дещо краще чинять опір впливу лугів.

Корозійна стійкість деяких піщаників залежить від характеру природного цементу, що зв'язує його кварцовий кістяк. Наприклад, вапнякові піщаники, зцементовані  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , досить кислото- та лугостійкі. Залізовмісні піщаники (бурий і червоний залізняк), зцементовані гідратованими окислами заліза, не відрізняються високою корозійною стійкістю а їх морозо-, соле- та водостійкість залежать від пористості й природи цементуючої речовини. Так, періодичне зволоження і сушіння піщаників з домішками глини і мергелю знижує їх морозостійкість.

З метаморфічних порід у будівництві широко використовують гнейси, кварцити і мармури. Кварцити, які є різновидом піщаників і складаються з зерен кварцу, зцементованих кремнеземистим цементом або без цементації, мають високу кислото- та лугостійкість. Аналогічно кварцитам корозійностійкими є і гнейси, які близькі за складом до гранітів.

Мармур – це різновид вапняків або доломітів. Він складається із зерен  $\text{CaCO}_3$  чи  $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ , скріплених за рахунок зчеплення кристалів. Мармур

широко застосовують як оздоблювальний матеріал, але він не атмосферостійкий і в зовнішньому застосуванні піддається руйнуванню, що особливо швидко розвивається на неполірованих поверхнях. Корозія мармуру виникає у разі наявності в повітрі сірчаного газу і вологи. Тоді на поверхні мармуру утворюється сірчана кислота і як наслідок – гіпсовий порошок, який розчиняється. Цей хімічний процес доповнюється фізичною корозією – розпушенням кальциту зі збільшенням об'єму на 10–15 %.

У цілому стійкість матеріалів цієї підгрупи залежить не тільки від якості гірської породи, форми виробу й умов експлуатації, але і від інтенсивності захисних заходів у тих чи інших умовах. Правильне і своєчасне застосування захисних заходів підвищує термін служби конструкцій і виробів, зберігає декоративну якість і природне забарвлення матеріалу на тривалий час. Вибір захисних заходів залежить від особливостей кам'яного матеріалу та умов його роботи. Також негативно впливає пористість матеріалу, тому найбільш надійним способом захисту виробів і конструкцій з природних кам'яних матеріалів від руйнування є виключення можливості проникнення води у середину. Здійснюють захист конструктивними і хімічними способами.

До конструктивних заходів відкритих частин будівельних споруд, таких як цоколі, карнизи, парапети, колони тощо, відносять надання їм такої форми, яка полегшує відведення води або полірування їх поверхні, що забезпечує швидке стікання дощової і талої води.

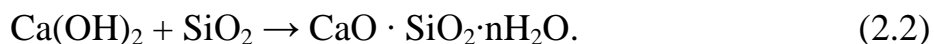
До хімічних заходів належить ущільнення поверхні матеріалу насиченими водяними розчинами речовин, що вступають у хімічну взаємодію з мінералами каменю і переводять речовини мінералів у нерозчинні сполуки. Такий метод захисту конструкції називається кремнефторизацією або флюатуванням. Застосовують флюати магнієвої солі і алюмінієвий флюат. Водопоглинання каменю, обробленого хімічним способом, значно знижується. Наприклад, просочування розчином флюату у результаті реакції з карбонатом кальцію суттєво ущільнює поверхню каменю за схемою (2.1):



Ущільнення поверхні каменю досягається також послідовним просочуванням спиртовим розчином калійного мила й оцетокислого глинозему. У цьому випадку в порах каменю відкладається глиноземиста сіль.

Останнім часом усе більше застосовуються методи ущільнення поверхні кам'яних виробів шляхом просочування їх полімерними матеріалами, які мають гідрофобні властивості.

*Корозія штучних мінеральних будівельних матеріалів.* Відомо, що силікатні матеріали, наприклад, силікатна цегла виготовляється із суміші кварцового піску з вапном, і її твердіння відбувається в автоклавах за реакцією (2.2):



Подальше зміцнення силікатної цегли відбувається у звичайних умовах шляхом карбонізації.

Наявність у складі силікатних матеріалів вапна і вуглекислого кальцію робить їх нестійкими навіть у слабких водяних розчинах мінеральних і органічних кислот. Наприклад, якщо у воді присутній розчинений вуглекислий газ, то вуглекислий кальцій переходить у розчинний гідрокарбонат і силікатна цегла руйнується. Крім того, під час висихання цегли, яка періодично насичується лужними розчинами, в її порах утворюються кристалогідрати, що призводить до виникнення напружень розтягування, а це, в свою чергу, призводить до зниження міцності конструкції чи виробу.

Під час зволоження силікатні матеріали також стають нестійкими, а за температури відбувається розширення силікатної фази, що теж призводить до руйнування матеріалу. Але силікатна цегла, що містить до 90 % кремнезему, дуже стійка проти дії деяких лужних розчинів, але тільки слабкої концентрації.

Поряд із силікатною цеглою в будівництві широко застосовують такі силікатні вироби, як великі стінові блоки, оздоблювальні плити, сходи тощо, але їх фізико-хімічні властивості близькі до силікатної цегли.

Більшість керамічних матеріалів, особливо великої щільності, мають високу корозійну стійкість до дії кислот і задовільну до лугів. Однак керамічна

цегла, що складається переважно з кремнезему і глинозему, не стійка проти дії водяних розчинів лугів, що утворюють з глиноземом легкорозчинні солі, які вимиваються. Цегла легко руйнується під розпірно-розклинювальною дією кристалогідратів, що утворюються з розчинів солей, особливо сульфідів натрію і магнію. До цього слід додати, що незалежно від хімічних процесів звичайне зволоження керамічних виробів саме по собі сприяє зниженню їхньої міцності й морозостійкості. Тому керамічна цегла швидше піддається фізичній і хімічній корозії в місцях впливу систематичного зволоження, зокрема у фундаментах і в стінах вологих приміщень.

Слід відзначити, що хімічний вплив води на керамічні матеріали найбільше виявляється в теплу пору року, а фізичний вплив – у зимовий період, коли в порах збільшується об'єм вологи, що замерзає, і її нагромадження в зоні замерзання внаслідок конденсаційних і міграційних процесів. Морозостійкість цегли в значній мірі можна передбачити технологією її виробництва, тобто заздалегідь забезпечити рівномірну щільність виробів за всім обсягом і рівномірний розподіл вологи на проміжних етапах технології виробництва продукції.

Завдяки вмісту алюмосилікатів керамічні плитки досить стійкі проти впливу всіх органічних і мінеральних кислот, крім плавикової. Але їх лугостійкість залежить від складу і щільності матеріалу.

*Бетон як штучний будівельний матеріал.* Він мінерального походження, найбільш широко використовується в сучасному цивільному, промисловому, гідротехнічному, теплоенергетичному, дорожньому та інших видах будівництва. Крім цього існують бетони спеціального призначення, наприклад, кислототривкий, жаротривкий тощо.

Україна в рік випускає 25–30 млн м<sup>2</sup> бетону та залізобетону, а втрати від корозії становлять 4 відсотки від величини національного доходу, причому 15 % від кошторисної вартості йдуть на заходи щодо захисту від корозії, що приблизно становить 1 млн доларів, тому велика увага приділяється розробкам щодо вдосконалення складів і технології приготування бетону.



Властивості бетону залежать від його хімічного складу, який обумовлений насамперед мінералогічним складом цементу. У свою чергу, хімічний склад цементного каменю визначається наявністю гідросилікатів кальцію типу CSH-B – тоберморитоподібних,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – гідроалюмінатів кальцію і  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – гідроксиду кальцію [2].

Під час перебігу процесів тужавлення і твердіння цементу, залежно від термодинамічних умов, продукти гідратації у своєму розвитку проходять через різні стадії дисперсного стану – від появи зародків (розміром менше 1 нм), потім часток колоїдного ступеня дисперсності (від 1 нм до 100 нм) до утворення кристалів (розміром більше 100 нм). У результаті утворюється цементний камінь, що складається з цементного гелю і кристалічної фази. Гель представлений переважно C-S-H-фазою, а кристалічна фаза – CH, C-A-H, C-F-H і C-A-C<sub>s</sub>-H – фазами. Відповідно до наявних даних C-S-H-фаза містить у собі гідросилікати кальцію, фаза C-H представлена кристалами  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , C-A-H – гідроалюмінатом кальцію  $\text{C}_4\text{AH}_{19}$ , а C-A-C<sub>s</sub>-H – еtringітом  $3\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , який має голкоподібну будову. У процесах твердіння можуть утворюватися і вторинні продукти, в першу чергу кальцит  $\text{CaCO}_3$ .

Клінкерні мінерали цементу в процесі гідратації забезпечують надходження в рідку фазу значної кількості гідроксиду кальцію, що збільшує значення рН до 12–13 (якщо В/Т = 0,5). Величина окислювально-відновного потенціалу E<sub>h</sub> витяжок порового електроліту з цементного тесту залежно від В/Т коливається від +0,1 В до +0,3 В. Отже, цементний камінь має слабкоокислювальне середовище з високим значенням рН порової рідини.

У бетонах розрізняють три види структур: мікроструктуру (структура цементного каменю), мезоструктуру (структура двокомпонентного цементно-піщаного розчину), макроструктуру (структура бетону, що складається з щебеню і цементно-піщаного розчину).

Для свіжевиготовленого цементного тіста характерна коагуляційна мікроструктура, в якій зчеплення між елементами здійснюється під дією

міжмолекулярних Ван-дер-Ваальсових сил. Конденсаційна – формується в міру зв'язування води й утворення між частками міцних кристалізаційних контактів. У кристалізаційних мікроструктурах зв'язок між частками обумовлений головними валентними зв'язками, що і забезпечує міцне зрощення часток. Структура цементного каменю зрілого віку має явно виражений коагуляційно-кристалізаційний характер.

Загальна пористість щільних бетонів, що утворюється за рахунок седиментаційних процесів і повітровтягування складає 8–15 відсотків, а для бетонів з ніздрюватою структурою доходить до 85 відсотків. Під час вивчення впливу на бетон і залізобетон агресивних агентів важливо знати також об'єм пор, якими рухаються агресивні потоки. Об'єм відкритих пор, якими може рухатися рідина або газ, називають проникністю, або ефективною пористістю. Велике значення має штучне створення великих замкнутих пор за рахунок уведення повітровтягувальних добавок, які сприяють підвищенню морозо- та солестійкості бетонів [2].

Здатність бетонів до опору впливу агресивного середовища визначається саме ефективною пористістю, що обумовлена наявністю наскрізних капілярів, пор, мікротріщин різного походження, каверн, свищів тощо. Вважається, що усі бетони є більше або менше проникними, тому у капілярно-пористому тілі бетону, під час контакту з водою відбуваються процеси поверхневого розчинення і гідроліз складових частин структури. Під напором води може спостерігатися і частковий винос продуктів розчинення, що призводить до зниження міцності.

Заповнювачі бетону представлені в основному магматичними гірськими породами, такими як граніт, щільними карбонатними породами, а дрібний заповнювач – силікатним піском. Оскільки заповнювачі в бетоні складають близько 80 відсотків його об'єму, то їхня корозійна стійкість і властивості поверхні мають дуже велике значення. Якщо хімічна стійкість гранітів і пісків сумнівів не викликає, то стійкість вапняків варто враховувати, бо під час дії кислот їхнє руйнування буде випереджати руйнування цементного каменю.

Особливе місце серед заповнювачів займають породи, що містять аморфний кремнезем (опал, халцедон, кремій). Такі породи в результаті взаємодії їх з лугами у складі цементу, викликають корозійний процес.

### **3 ФІЗИЧНА І ФІЗИКО-ХІМІЧНА КОРОЗІЯ БЕТОНУ. ЗАСОБИ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ**

До факторів, які призводять до фізичної корозії бетону, відносять нагрівання і охолодження, поперемінне насичення водою, заморожування і відтавання, циклічне насичення розчинами солей за наявності поверхні випару. Всі ці фактори призводять до розвитку внутрішніх напружень і деструктивних процесів у бетоні за рахунок температурних об'ємних змін компонентів, фазових перетворень води, кристалізації солей тощо.

#### **3.1 Температурні деформації бетону**

Температурні деформації неминучі в масивних гідротехнічних конструкціях через внутрішню екзотермію. Вільні температурні деформації характеризуються коефіцієнтом лінійного розширення бетону, що залежить від складу і віку бетону, виду заповнювача і вологісного режиму. У разі порушення вологісної рівноваги між бетоном і середовищем через нерівномірний перебіг дифузії вологи в об'ємі бетону, в ньому можуть виникати усадочні деформації (під час висушування) або набрякання (під час насичення водою). Загальна усадка складається з усадки, викликані контракційними явищами, і усадки за рахунок хімічної взаємодії компонентів бетону з навколишнім середовищем (наприклад, карбонізації). Загальна усадка цементного каменю пов'язана з видом цементу, величиною В/Ц та іншими факторами. Портландцементи з високим ступенем помелу дають більшу усадку, ніж звичайні цементы, що пояснюється значним вмістом гелю в цементному камені. Усадка також залежить від витрати цементу і вмісту заповнювачів у бетоні [3]. Чим масніше бетон, тим вище його вологісна усадка. Деформації набрякання тим сильніші,

чим вище витрати цементу. Однак з підвищенням вмісту цементу за того ж режиму вологості ступінь зволоження гелю знижується. Абсолютні ж значення деформації набрякання бетону набагато менші ніж деформації усадки.

### **3.2 Морозне руйнування бетону**

При морозному руйнуванні на бетон впливають не тільки температура і вологість, але і фазові перетворення води й осмотичні сили. Це досліджували такі вчені, як С. В. Шестоперов, Г. І. Горчаков, Б. Г. Скрамтаєв, А. М. Підвальний, В. Б. Ратінов [2] та інші. Установлено, що важливий вплив на процеси морозного руйнування бетону має характер капілярно-пористої структури матеріалів, що впливає на швидкість тепломасообміну з довкіллям. Морозостійкість будівельних матеріалів, у тому числі бетону, пов'язана головним чином з капілярною пористістю, яку необхідно звести до мінімуму за рахунок зниження В/Ц до 0,3–0,4. Доцільніше регулювати В/Ц за допомогою пластифікаторів, це забезпечить легке укладання бетонної суміші, рівномірність розподілу пор за всім обсягом і мінімальну загальну пористість [3].

Щоб пояснити особливості морозного руйнування цементного каменю і бетону, необхідно враховувати колоїдно-хімічні й осмотичні явища, що супроводжуються процесами фазового переходу води у лід. Уперше на цю обставину звернув увагу О.Є. Власов. Відповідно до його теорії перехід води в лід здійснюється в дві послідовні стадії: на першій стадії – під час зниження температури у воді утворюються більш великі асоційовані комплекси, що складаються з 3–4 молекул. Через нерівномірність розподілу температури в об'ємі бетону виникають ділянки з різними концентраціями цих комплексів, унаслідок чого з'являється осмотичний тиск, що у разі поступового промерзання сприяє переміщенню води від центру до периферії. Тому у гелі цементного каменю тільки від дифузії води за рахунок різниці в концентраціях асоційованих комплексів можуть виникати значні напруження.

Досвід свідчить, що великі пори в осмотичному відношенні є небезпечними, тому що об'єм усього порового електроліту в них набагато більше об'єму льоду, що утворюється. Практично безпечні і дуже дрібні пори (особливо пори гелю), оскільки вода в них замерзає за нижчих температур, ніж звичайно. Найбільш небезпечні ті пори, в яких виникнення льоду з порового електроліту проходить досить швидко і разом з цим ступінь виморожування достатньо високий. В цей час різко змінюється концентрація розчинених солей і вода з гелю переходить у поровий електроліт, у результаті гель починає стискуватися. Отже, під час замерзання води в порах вода з гелю надходить у великі пори і гелеві перегородки між цими порами деформуються. Небезпечним є те, що ці вища мають циклічний характер, оскільки при розморожуванні вода рухається в протилежному напрямку і деформації періодично змінюють знак. Тобто на гелеві перегородки в зоні циклічної дії знакозмінних температур діє не тільки термічне напруження, але і впливають знакозмінні осмотичні сили. Вплив осмотичних явищ жодним чином не зменшує ролі деформацій, що викликані розширенням льоду під час його утворення в порах, але це може мати суттєве значення за наявності в бетоні замкнених пор, заповнених водою.

Тому під час проектування морозостійких бетонів треба по-перше, враховувати кліматичні умови служби бетону (кількість циклів заморожування і відтавання і найбільш низьку температуру), а по-друге, здійснювати підбір оптимального складу бетону з мінімальною капілярною пористістю. Якщо водонепроникність не відіграє вирішальної ролі, то слід створювати цементний камінь, у структурі якого небезпечні капілярні пори чергуються з великими порами, заповненими повітрям.

Особливо інтенсивно руйнується бетон під час заморожування з одночасним впливом розчинів солей. У цьому випадку порушується не тільки термічна, вологісна, але і хімічна рівновага.

Марка за морозостійкістю призначається з урахуванням кліматичних умов. Для одержання бетонів підвищеної морозостійкості використовують

чисто клінкерні цементи зі вмістом  $C_3A$  менше 8 %, а заповнювачі – щільні. Склади бетону підбирають так, щоб вони мали значну щільність з мінімальним В/Ц, мінімальну капілярну і загальну пористості. Для створення резервних пор рекомендується використовувати повітряновтягувальні і гідрофобні добавки.

При заморожуванні водонасиченого залізобетону відбувається набрякання бетону й укорочування арматури, що викликає зниження адгезії бетону до арматури. Щоб забезпечити необхідну морозостійкість залізобетону, важливо виключити або хоча б звести до мінімуму тріщини та інші дефекти бетонних конструкцій, які можуть виникати під час їх виготовлення. Для цього використовують перевірені на практиці м'які режими теплової обробки і виключають етап сушіння.

### **3.3 Вологісні деформації**

Небезпечною є дія води. Також, коли вона знаходиться в газоподібному та рідкому станах. Так, у разі збільшення вологості навколишнього повітря або обводнення виробу, що твердіє, починається його водонасичення: пори та капіляри заповнюються водою, гелі в цементному тесті починають набухати, в результаті виріб збільшує свій об'єм, що викликає шкідливі напруження в цементному камені, але менші, ніж у разі його усадки. Усадка та набухання бетону залежать від мінералогічного складу цементу – чим більше в клінкері  $C_3S$ , тим менше цемент схильний до усадки, тому що утворюється щільніший камінь. Зменшують усадку також: грубіший помел цементу, зниження В/Ц та введення в цемент активних добавок. Також знижують усадку у бетоні заповнювачі.

Усадка відбувається за перші 4–8 годин після заливання суміші у форму або опалубку. Це відбувається, якщо волога здатна швидко випаровуватися зі свіжозалитої суміші. Товщина деформування становить близько 3 мм/м і відповідає обсягу вологи, що випарувалася.

Причинами появи усадки можуть бути: хімічні реакції між компонентами цементу та водою (гідратація) або внаслідок втрати вологи (під час висихання бетону). Зазвичай усі деформації спостерігаються у перші 3–4 місяці –

у середньому лінійне зменшення розмірів дорівнює 2 мм/м. Потім процес сповільнюється у кілька разів. Зменшення обсягу цементного каменю у бетоні практично не перевищує один відсоток. Допустимий коефіцієнт усадки відповідно до ДСТУ становить максимум три відсотки. Загальна усадка цементного каменю також передбачає усадку за рахунок контракції та усадку в результаті хімічної взаємодії компонентів бетону з навколишнім середовищем (наприклад, карбонізація). Загальне усадження цементного каменю, що зберігалось на повітрі, залежить: від виду цементу; витрати цементу; В/Ц; змісту заповнювачів. Так тонкомолоті види портландцементу дають більш високу усадку, ніж звичайні цементи, що пояснюється значним вмістом гелю в цементному камені. Чим жирніший бетон, тим вища його вологісна усадка. Чим вище В/Ц, тим більша усадка. Заповнювачі ж, навпаки, знижують усадкові явища. Важкі бетони дають меншу усадку, ніж легкі (вони пористі та усадка може досягати 1 см/м). Тут працює правило: чим менші розміри заповнювача, тим менше усадка. Деформації набухання тим сильніше, чим вища витрата цементу. Абсолютні значення деформацій набухання бетону набагато менше деформацій усадки.

### **3.4 Корозія від впливу солей**

Сольова корозія бетону - це вид фізичної корозії, що виникає внаслідок кристалізації солей у результаті капілярного підсосу та випаровування мінералізованих вод в умовах експлуатації бетону за позитивних температур. Особливо небезпечно, коли в порах бетону спочатку кристалізуються безводні солі, а потім, з появою відповідних умов, ці солі перетворюються в кристалогідрати. Такі перетворення, як правило, супроводжуються збільшенням об'єму твердої фази у 1,5–3 рази, виникненням значних внутрішніх напружень у тілі бетону і значними деформаціями. У разі підсмоктування розчину 5 відсоткової концентрації кристалізаційний тиск може досягати: для  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 4,4 МПа;  $\text{MgSO}_4$  – 3,6 МПа;  $\text{NaCl}$  – 2,7 МПа;  $\text{CaSO}_4$  – 0,09 МПа.

Внаслідок солевої корозії у низці південних регіонів спостерігається руйнування конструкцій на висоті 10–50 см від поверхні ґрунту.

У такому випадку треба враховувати й термічні напруження, хімічні й фазові перетворення, що сприяють розвитку осмотичних явищ, а також циклічний характер впливу розчинів солей. Так, зміна температурних режимів вдень і вночі сильно змінює розчинність солей, умови підсмоктування та їх кристалізації, причому найбільш небезпечні в осмотичному відношенні є добре розчинні солі [4].

Для того, щоб запобігти цьому виду корозії, треба застосовувати бетони з відкритою пористістю не вище двох відсотків, вводити гідрофобізуючі добавки, наприклад, етиленсиліконат натрію, бавовняне мило чи милонафт (у кількості приблизно 0,1 відсоток) або використовувати гідроізоляцією.

### **3.5 Механічний знос**

Механічний знос теж належить до фізичних факторів і враховує всі види механічних впливів: удари хвиль, дію стирання завислих часток, ударні і вібраційні навантаження тощо. Усі ці фактори необхідно враховувати під час розрахунків конструкцій з бетону і залізобетону на міцність і довговічність.

Абразивний знос бетону та залізобетону проявляється внаслідок руху сипучого матеріалу їхньою поверхнею або ударної дії частинок матеріалу, тобто спостерігається ефект чистого стирання або комплексний ефект. Абразивний знос у більшості випадків супроводжується корозійним зносом, чому сприяє наявність у сипучому матеріалі вологи і солей. До конструкцій, які експлуатуються під впливом подібних навантажень, належать бункери, лотки, лійки тощо.

З метою захисту від ударних впливів бетонних і залізобетонних конструкцій використовують захисні футеровки, наприклад, листи сталі, шлакове лиття, що має дуже високу корозійну стійкість. Таке лиття придатне і для покриття підлоги на підприємствах чорної металургії [5].



З усього різноманіття фізико-хімічних факторів, що впливають на довговічність цементного каменю, бетону і залізобетону, варто виділити осмос, контракційні явища і вилуговування. Вони можуть виступати як самостійні чинники, так і як супутні з іншими чинниками.

### **3.6 Вплив осмотичних явищ та контракції на процеси руйнування**

Осмотичні явища спостерігаються у рівноважних колоїдних системах, де різниця хімічних потенціалів зв'язаної і вільної рідких фаз компенсується осмотичним тиском. Осмотичний тиск залежить від концентрації зовнішнього розчину (порового електроліту) і зв'язаний зі зміною електрокінетичних властивостей гідратних новоутворень, а також продуктів корозії, що мають дуже малі розміри (стадія колоїдного ступеня дисперсності).

Найбільш яскравим прикладом руйнування бетону під впливом осмотичних сил є корозія бетону в результаті реакції взаємодії лугів цементу з заповнювачами у вигляді активного кремнезему. Цей вид корозії пов'язаний з тим, що цементний камінь, а також продукти його взаємодії з заповнювачами в тонких шарах здатні виявляти властивості, характерні для напівпроникних перегородок. Якщо по один бік такої перегородки міститься розчин будь-якої солі, а по інший – вода або розчин цієї самої солі меншої концентрації, то розчинник проникає в концентрованіший розчин, доки концентрації по обидва боки мембрани не вирівнюються.. Коли ж концентрований розчин знаходиться в замкнутому осередку, оточений напівнепроникною плівкою (мембраною), усередині цього осередку виникає осмотичний тиск, що діє на її стінки.

Запобігти цьому виду корозії можливо такими заходами [4]:

- обмежити вміст лугів у цементі до 0,3 відсотка (у перерахунку на  $\text{Na}_2\text{O}$ );
- за можливістю використовувати тонкомелені гідравлічні добавки (в кількості не менше 15 відсотків від маси цементу);
- регулювати пористість шляхом уведення хімічних добавок.

На довговічність бетону впливають і контракційні явища, які супроводжують гідратацію цементу, що може тривати практично упродовж

усього терміну його експлуатації. У процесі гідrataції цементу об'єм твердої фази збільшується, а об'єм введеної води зменшується. За повної гідrataції портландцементу обсяг продуктів гідrataції перевищує обсяг вихідного цементу в середньому у 2,2 рази. Однак обсяг продуктів гідrataції завжди менше обсягу реагуючих фаз разом узятих, так як продукти, що утворюються, мають більшу щільність, ніж сумарна щільність реагуючих речовин. Зменшення абсолютного об'єму реагуючої системи, що отримало назву контракції (стягнення), тим більше, чим більша гідравлічна активність в'язучого.

У результаті цих явищ у цементному камені з'являються напруження розтягування, які зосереджуються на перемичках між мікропорожнинами. Величина напруження залежать від швидкості й ступеня гідrataції клінкерних мінералів та інших факторів. Іноді дія такого явища призводить до розриву плівок цементного каменю, що знижує його фізико-механічні властивості.

#### **4 ХІМІЧНА КОРОЗІЯ БЕТОНУ ТА СПОСОБИ ЗАХИСТУ ВІД НЕЇ**

Хімічну корозію бетону і залізобетону викликають впливи рідких, газоподібних і пилоподібних середовищ. Корозія в рідких середовищах – це самий небезпечний й найпоширеніший вид корозії. За видами хімічної взаємодії іонів середовища з іонами порового електроліту бетону можна виділити дві групи реакцій корозії:

– обмінні реакції з утворенням легкорозчинних солей або важкорозчинних сполук, які не пов'язані між собою;

– з утворенням важкорозчинних добре закристалізованих солей.

Аналіз реакцій першої групи показує, що найбільш небезпечними у розчині, який контактує з бетоном є катіони  $H^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $NH_4^+$ . Вони у разі взаємодії з гідроксильними іонами порового електроліту утворюють добре розчинні солі або незв'язані аморфні гідроксиди. Водночас

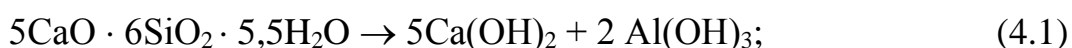
знижується величина рН порового електроліту, що сприяє виникненню процесу гідролізу продуктів гідратації цементу і розвитку деструктивних процесів.

У протіканні реакцій другої групи особливе значення мають реакції з сульфат-іонами, а найбільш небезпечними є поєднання з катіонами  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  та  $\text{Cu}^{2+}$ . Розчини цих солей за агресивністю можна порівняти з сірчаною кислотою.

Використовують дві класифікації видів хімічної корозії бетону: за видом агресивного середовища і за механізмом агресивного впливу середовища на матеріал [5].

#### **4.1 Корозія першого виду (вилуговування)**

До першого виду хімічної корозії бетону й залізобетону (за класифікацією В. М. Москвіна) відносять корозію вилуговування, яка виникає в цементному камені, бетоні або залізобетоні під час дії слабкомінералізованих вод. Вплив такого виду корозії зазнають наливні й ємкісні споруди, труби, греблі, мостові конструкції, причальні стінки морських і річкових портів, палі підвалин тощо. Вилуговування виникає в цементному камені у разі дії вод з малою жорсткістю, що призводить до фізико-хімічного розчинення продуктів гідратації цементу, а для конструкцій, які працюють під тиском таких вод спостерігається винесення розчинених складових цементного каменю разом із водою, що фільтрується крізь конструкції. Поки немає фільтрації, усі гідратні сполуки цементного каменю знаходяться в рівновазі із  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , розчинність якого досить висока і дорівнює 1,2 г  $\text{CaO}/\text{л}$ . У процесі фільтрації вапно вилуговується і починається східчає розчинення всіх гідратних сполук цементного каменю за схемами (4.1) та (4.2):



Відповідно до нормативних документів агресивність води залежить від ступеня підвищення концентрації бікарбонат-іонів  $\text{HCO}_3^{1-}$ . За наявності

1,05 ммольНСО<sub>3</sub>/л і менше – вода є слабоагресивною щодо бетону з водонепроникністю W 4, за W 6 - середовище заведено вважати неагресивним.

Відомо, що головні компоненти цементного каменю є стабільними тільки в контактi з поровою рiдиною, в якiй розчинено у певнiй концентрацiї вапно. Під час омивання бетону водою або фiльтрацiї води під тиском відбувається поступове вимивання вапна, тобто триває процес вилугування. У першу чергу руйнуються багато основні сполуки, виділяючи в розчин гiдроксид кальцiю. У зв'язку з цим знижується його концентрацiя в рiдкiй фазі і розчиненню піддаються вже менш основні гiдратні сполуки цементу. Після досягнення величини рН менше 10,17 розчиняються основні продукти гiдратацiї цементу. Швидкiсть корозії у разі вилугування залежить не тільки від швидкості розчинення складових частин цементного каменю, але й від хiмiчного складу води. Особливо важливий є наявність у ній бiкарбонату кальцiю і вугiльної кислоти. Якщо в контактi з бетоном знаходяться води з підвищеним вмістом бiкарбонатів і карбонатів кальцiю, то накопичення карбонатів кальцiю в капiлярах призводить до підвищення щiльностi бетону і зменшенню швидкості фiльтрацiї. В iншому разі води розчиняють не тільки складові частини цементу, але навіть той карбонат, що утворився ще до контакту бетону з водою.

Для захисту бетону від корозії вилугування існують такі заходи:

- а) застосування пуцоланового цементу або цементу з додаванням активного кремнезему;
- б) низьке В/Ц;
- в) iнтенсивне ущiльнення бетонної суміші (W4–W8);
- г) застосування рiзних видів гiдроiзоляцiї.

## **4.2 Корозія бетону другого виду**

Другий вид корозії характеризується впливом на бетон розчинів кислот, лугів і магнезiальних солей. Найбільш небезпечна і розповсюджена з них кислотна корозія, що виявляється за умови впливу на бетон розчинів

мінеральних кислот типу  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$  і органічних кислот: оцтової, мурашиної, масляної, щавлевої та інших. Ці процеси характерні для підприємств хімічної і харчової промисловості, а також під дією стічних вод. Основним показником, характерним для цих середовищ є значення рН середовища (негативний логарифм концентрації водневих іонів  $-\lg [\text{H}^+]$ ):

- нейтральне середовище –  $\text{pH} = 7$ ,  $[\text{H}^+] = 10^{-7}$  г-моль  $\text{H}^+/\text{л}$ ;
- кисле середовище –  $\text{pH} = 1$ ,  $[\text{H}^+] = 10^{-1}$  г-моль  $\text{H}^+/\text{л}$ ;
- лужне середовище –  $\text{pH} = 12$ ,  $[\text{H}^+] = 10^{-12}$  г-моль  $\text{H}^+/\text{л}$ .

#### 4.2.1 Загальнокислотна корозія

*Корозія в мінеральних кислотах.* Під впливом мінеральних кислот, наприклад, соляної, бетон розчиняється внаслідок утворення легкорозчинних сполук і швидко руйнується:



Якщо рН менше 4 жоден зі звичайних видів цементу не витримує впливу кислих рідких середовищ. Звичайний портландцемент витримує вплив кислих вод за коефіцієнта фільтрації менше 0,1м/добу і рН більше 6. Отже, бетони на будь-яких видах цементу, що експлуатуються у водах із рН менше 6,5, термодинамічно не стійкі, але по-різному.

Наприклад, одновідсотковий розчин  $\text{H}_2\text{SO}_4$  виявився агресивним для всіх мінералів цементного клінкеру, але за 3–4 тижні найбільше зруйнувалися зразки з  $\text{C}_3\text{A}$ , а зразки з  $\text{C}_2\text{S}$  і  $\text{C}_3\text{S}$  ще зберігали форму і деяку міцність. Знижена стійкість продуктів гідратації  $\text{C}_3\text{A}$  спостерігається навіть у чистій воді. Експерименти показали, що одновідсоткові розчини  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$  сильно роз'їдають бетон за декількох місяців. Фосфорна кислота менш агресивна щодо бетону через малу розчинність фосфату кальцію, що утворюється водночас. Однак за умови підвищення концентрації фосфорної кислоти до 5 відсотків руйнування відбувається досить швидко.

Отже, швидкість корозії бетону у розчинах кислот визначається швидкістю підведення агресивного середовища і площею поверхні контакту

його з бетоном, а продукти реакції в основному розчиняються і виносяться потоком назвни.

*Вуглекислотна корозія* належить до особливого різновиду корозії другого виду. Показником агресивності цього виду корозії є наявність у воді агресивного вуглекислого газу  $\text{CO}_2$ , який міститься у більшості ґрунтових і стічних вод. Якщо його концентрація знаходиться в межах 10–40 мг/л, то для бетону з показником водонепроникності W 4 це середовище є слабкоагресивним, якщо його концентрації більше 40 мг/л для бетону з W 4 – середньої агресивності, а з показником водонепроникності бетону W 8 – неагресивне. Вугільна кислота дисоціює у воді в два етапи (4.4), (4.5):



Частина вугільної кислоти, що утворюється шляхом розчинення вуглекислого газу, називається вільною (у природних водах її вміст не перевищує 150 мг/л). Характер дії води, що містить цю кислоту, залежить від концентрації розчиненої вугільної кислоти, вмісту іонів кальцію і бікарбонат-іонів, умов омивання конструкції і властивостей бетону. Якщо бетон був вже частково карбонізований, корозія в чистому вигляді виявляється в розчиненні карбонатної плівки на поверхні бетону (4.6):



За відповідних умов може бути досягнутий стан рівноваги. Але якщо вода, в якій розчинена вільна кислота, рухається щодо бетону, вкритого карбонатною плівкою, і концентрації  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{HCO}_3^-$  не збільшуються, то карбонатна плівка розчиняється безперешкодно, тобто вугільна кислота є агресивною кислотою як для бетону, так і для металів, застосованих як арматура в залізобетонних конструкціях. У всіх випадках, коли вміст вугільної кислоти у воді перевищує рівноважний, у порах цементного каменя не утворюється карбонат кальцію з вапна і кислоти. Карбонат кальцію може утворитися тільки за концентрації кислоти нижче рівноважних.

Характер контакту вод, що містять вуглекислоту, теж сильно впливає на механізм процесів взаємодії. Коли вода не рухається або рухається повільно, то між нею і твердою фазою цементного каменю може встановитися рівновага. Якщо ж вода рухається з великою швидкістю, то рівновага не встановлюється і корозія розвивається поступово, до повного руйнування бетону. Вона може дещо сповільнитися тільки за рахунок зменшення площі контакту бетону з агресивним середовищем.

За наявності фільтрації крізь тіло бетону води, що містить вуглекислоту, спостерігається специфічний характер руйнування. Спочатку фільтрувальна вода за допомогою кислоти розчиняє  $\text{CaCO}_3$ , і цементний камінь поступово насичується бікарбонатом (зона руйнування). Потім гідроксид кальцію з бікарбонатом утворює важкорозчинний карбонат кальцію, який заповнює мікротріщини і капіляри бетону, ущільнюючи його (зона ущільнення). Позбавлена кислоти вода в наступній зоні вилугує складові частини бетону, і процес корозії відбувається за механізмом корозії першого виду.

Щоб попередити руйнування під впливом вуглекислотної агресії, використовують глиноземистий цемент. Менш стійким в цих умовах є пуцолановий цемент, швидше всього руйнується звичайний портландський. Введення до складу портландцементу 25 відсотків тонкомеленого вапняку істотно підвищує його стійкість до вод із вмістом вуглекислоти [4].

*Корозія в середовищі солей-коагулянтів.* За загальнокислотною схемою відбувається процес корозії бетону і залізобетону у розчинах деяких солей, утворених катіонами слабкої основи й аніонами сильної кислоти. До них належать:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Al}(\text{Cl})_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}(\text{Cl})_3$ , що широко використовуються як коагулянти на водопровідних станціях. Агресія концентрованих розчинів цих сполук стосовно цементу виявляється в тому, що вони при дії на бетон викликають дифузію іонів  $\text{H}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  і призводять до значного зниження рН (рН = 3) порової рідини. Крім цього на поверхні бетону утворюються гідроксид алюмінію і гіпс, які постійно видаляються з поверхні внаслідок

гідродинамічного впливу. Незважаючи на те, що начебто б є необхідні складові для утворення ГСАК, він не утворюється через дуже низьке значення рН.

У розчинах коагулянтів при величині рН < 4 застосування бетонів на звичайному портландцементі навіть із захистом недоцільно, тому використовують кислотостійкі цемента на основі рідкого скла  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  і кремнієфтористого натрію з добавкою кислототривкого наповнювача, наприклад, діабазу, андезитового порошку, меленого піску тощо.

*Корозія в органічних кислотах.* У практиці експлуатації деяких видів споруд спостерігається руйнування бетону і залізобетону кислими стічними водами, що містять органічні кислоти. Органогенна корозія також спостерігається на сільськогосподарських підприємствах та підприємствах харчової промисловості. З біологічно активним середовищем контактують гідротехнічні споруди, будівельні конструкції мікробіологічних виробництв.

Механізм впливу органічних кислот залежить від їхніх відносних молекулярних мас – чим вони більше тим більше їх агресивність. До низькомолекулярних кислот належать: молочна, масляна, оцтова, винна, яблучна, щавлева тощо. До кислот з високою відносною молекулярною масою належать: олеїнова, стеаринова, пальмітинова тощо. Для бетонів найбільш небезпечними є жири та рослинні олії, які у разі взаємодії з водою піддаються гідролізу, внаслідок чого утворюються гліцерин й жирні кислоти, які руйнують бетон.

Розчин органічних кислот руйнує звичайний портландцемент, пуцоланові, шлакопортландцементи, а глиноземистий цемент стійкий тільки до рН = 4. Слабкі розчини винної кислоти не викликають помітних руйнувань бетону, а розчини щавлевої кислоти незначно впливають на бетон, оскільки утворюють на поверхні і порах бетону нерозчинний оксалат кальцію.

Всі органічні кислоти з високими відносними молекулярними масами мають наявно виражену агресивну дію, сила якої збільшується зі збільшенням відносної молекулярної маси. Дія цих кислот спричиняє значне зниження



значення рН цементного каменю. Отже, бензойна кислота знижує рН порової рідини з 12,5 до 11,95, малеїнова – до 9,5.

Окрему групу складають органічні сполуки типу нафти, масел для опалювання, нафтових дистилатів, що, як правило, не роблять помітного впливу на затверділий бетон, оскільки їхні компоненти не можуть хімічно взаємодіяти зі складовими частинами цементного каменю. Легкі мінеральні олії вільно проникають у бетон. Агресивність рослинних і тваринних олій визначається їхньою в'язкістю, що характеризує ступінь проникання їх у бетон.

Рослинні, тваринні олії і жири шкідливі для бетону, оскільки в них є вільні органічні кислоти; вміст кислот сильно залежить від процесів окислювання жирів і масел. До їхнього складу входять гліцерид та інші складні ефіри, які в контакті з цементним каменем гідролізуються, розпадаючись на спирт і кислотні компоненти, що утворюють з гідроксидом кальцію відповідні солі.

Олії типу кокосової, лляної, маслинової, пальмової, реп'яхової, тунгової, бавовняної, рибного жиру за умови постійного контакту з бетоном є агресивними. З ацетатів сильний вплив на бетон має ацетат амонію. Вважаються також агресивними фенол, крезол і їм подібні органічні сполуки.

Оскільки рН стічних і природних ґрунтових вод, що контактують з різними спорудами, набагато нижче 4-ох, тому необхідно застосовувати більш водостійкі й безусадові склади бетонів на основі рідкого скла, кремнієфтористого натрію і кислотостійких заповнювачів. Вони досить стійкі до дії концентрованих кислот (за винятком плавикової і гарячої фосфорної). Чим більше концентрація кислот і температура середовища, тим вища корозійна стійкість бетону.

#### 4.2.2 Корозія у розчинах солей (магнезіальна)

Магнезіальна корозія цементного каменю є дуже специфічною. В основі цього процесу лежать такі реакції (4.7), (4.8):





У результаті цих реакцій в обох випадках утворюється важкорозчинний осад у вигляді  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , знижується рН порової рідини до 10, що створює сприятливі умови для руйнування цементного каменю. Підтримка величини рН відбувається деякий час за рахунок гідролізу і дифузії гідроксиду кальцію з глибинних шарів, але вже за концентрації  $\text{MgSO}_4$  0,26 відсотка весь гідроксид кальцію буде повністю витрачений. Експериментально встановлено, що чим більше агресивного розчину приходиться на одиницю маси цементного каменю, тим за нижчої концентрації  $\text{MgSO}_4$  цілком зникає  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Під впливом розчинів  $\text{MgSO}_4$  накладається вплив на цементний камінь не тільки іону магнію, але і сульфат-іонів. Процес руйнування полягає в тому, що в поверхневих шарах бетону здебільшого тривають обмінні реакції іонів  $\text{Mg}^{2+}$  і  $\text{OH}^-$  з утворенням  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , а у внутрішніх шарах відбувається сульфоалюмінатна або гіпсова корозія.

У 1–2 відсоткових розчинах  $\text{MgCl}_2$  реакційна ємність порівняно невелика, і реакція між іонами магнію і  $\text{OH}^-$  звичайно здійснюється на зовнішній поверхні бетону, тому в порах бетону утворюється пухкий шар  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , що не є перешкодою для дифузії  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  до поверхні бетону. У зв'язку зі зниженням лужності у внутрішніх шарах бетону розвиваються процеси, характерні для корозії вилуговування, тому введення активних мінеральних домішок сприяє підвищенню корозійної стійкості цементу в магнезійних розчинах низької концентрації.

Якщо концентрація розчинів  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  досягає більше 5-ти відсотків, то реакційна ємність системи стає настільки великою, що гідроксиду кальцію, який надходить із глибинних шарів до поверхні бетону, уже недостатньо для своєчасної нейтралізації  $\text{MgCl}_2$ . Тоді іони магнію дифундують углиб бетону і руйнують усі гідратні новоутворення цементного каменю.

Для боротьби з магнезійною корозією необхідно забезпечити максимальну щільність бетону, а за дуже високих концентрацій передбачити ще й захист поверхні обмазувальною ізоляцією:

- за слабого ступеня агресії – бітумні або бітумно-латексні склади;
- за середнього ступеня агресії – асфальтобетонна обмазка або мастика на основі епоксидних смол.

Можна застосовувати обклеювальну ізоляцію рулонними матеріалами (руберойд, гідроізол, ізол, брізол ) із притискнуою стійкою зі штучних каменів (цегла, плитка, шлакоситал або кам'яне литво), а також хімічно стійкі плівкові матеріали (поліетилен, ізобутілен, полівінілхлорид).

Оцінка ступеня агресивності кислих рідких середовищ і розчинів магнезійних солей щодо бетону і вибір протикорозійного захисту здійснюють за СНіП 2.03.11-85 [1].

#### **4.2.3 Корозія у лужних середовищах**

Для бетону небезпечні розчини лугів з концентрацією більше 50 г/л. У результаті дії на бетон таких розчинів розчинність  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  значно знижується, але одночасно різко зростає розчинність кремнезему і полуторних оксидів. Найбільш агресивно на бетон діють розчини  $\text{NaOH}$ , потім розчини  $\text{KOH}$ , аміаку і  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Найбільшу стійкість до розчинів лугів мають бетони на пуцоланових і шлакопортландцементях. Вибираючи склад бетонів для таких середовищ, необхідно приділяти увагу вибору заповнювачів. За високих концентрацій лугів найбільш ефективні щільні карбонатні породи.

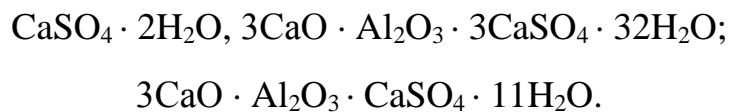
### **5 КОРОЗІЯ БЕТОНУ ТРЕТЬОГО ВИДУ. СПОСОБИ ЗАХИСТУ**

Механізм корозії третього виду обумовлений виникненням внутрішніх напружень, що утворюються внаслідок накопичення в порах і капілярах бетону важкорозчинних солей. Цей процес може бути результатом кристалізації продуктів хімічних реакції і наслідком процесу кристалізації під час поглинання солей з агресивних розчинів. Найбільш поширеною корозією цього виду є сульфатна корозія.

## 5.1 Сульфатна корозія бетону

Присутність у воді сульфат-іонів може призводити не тільки до підвищення розчинності компонентів цементного каменю, але і викликати обмінні реакції, що супроводжуються випаданням в осад таких кристалічних продуктів, як гіпс і гідросульфоалюмінат кальцію (ГСАК), що накопичуються в порах і капілярах бетону і сприяють виникненню в ньому внутрішніх напружень і руйнуванню. Кристалізація еtringіту супроводжується збільшенням об'єму приблизно у 4,76 разів.

Зовнішні ознаки і швидкість протікання сульфатної корозії визначаються концентрацією сульфат-іонів, видом катіону, хімічним і мінералогічним складом в'язучого. У ґрунтових, стічних та інших водних середовищах найбільш часто зустрічаються сульфати кальцію, натрію, калію і магнію. Під впливом сульфат-іонів у порах бетону можуть утворюватися три основні сполуки:



Можливість появи кожної з них визначається термодинамічними умовами, що виникають під час змішування рідкого агресивного середовища, яке містить сульфат-іони, і порового електроліту, що знаходиться в контакті з твердими продуктами гідратації цементного каменю і зернами заповнювача.

Проведені вченими [6] термодинамічні розрахунки показали, що утворення еtringіту  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  можливе за рН більше 10-ти і низькій концентрації сульфат-іонів, моносульфату  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ ) – за рН = 12,5 і дефіциті сульфат-іонів, тому в складі продуктів сульфатної корозії обидві сполуки практично не фіксуються. Експерименти показали, що частіше ГСАК утворюється у разі концентрації сульфат-іонів в межах 1000–1500 мг/л, що відповідає вмістові сульфат-іонів у насичених розчинах гіпсу.

Отже, механізм руйнування цементного каменю і бетону під дією сульфатів виглядає так: незалежно від типу кристалічних ґрат і від того, як

змінюється об'єм системи, накопичення твердої фази в обмеженому поровому просторі завжди викликає виникнення у стінках пор напруження, що їх розриває. У незруйнованому цементному камені вид катіонів також деякою мірою впливає на величину мінімальної концентрації, що необхідна для кристалізації гіпсу. Так, для розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  мінімальна концентрація складає 1 980 мг/л, а для  $\text{MgSO}_4$  – 1 800 мг/л. Якщо концентрація сульфатів у розчині менше 0,18 %, гіпс не кристалізується, і єдиною твердою фазою під час взаємодії цементного каменю з сульфатами є ГСАК.

Утворення відкладень гіпсу, незважаючи на значну його кількість, не завжди супроводжує небезпечні об'ємні деформації матеріалу. Варто відзначити, що властивості цементного гелю і процеси, що відбуваються в порах і капілярах, обумовлюють найважливіші характеристики бетону. Напівтверда гелеподібна маса присутня у всіх гідратованих цементах, а відносне зниження її кількості може бути досягнуто, зокрема, пропарюванням. Гель, що знаходиться в енергетичній рівновазі з поровою рідиною, має здатність набухати і тим більше, чим вище початкова концентрація вапна. Залежно від стану продуктів корозії дифузія  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  може бути різною: якщо вона проходить інтенсивніше, ніж дифузія іонів агресивного розчину в тіло бетону, на зруйнованій поверхні останнього утворюються кристали двоводного гіпсу.

Руйнування бетону під час впливу розчинів сульфатів пояснюється ще і виникненням осмотичного тиску позитивного знаку, коли тиск спрямований зсередини назовні, що і призводить до виникнення тріщин або навіть повного руйнування бетону [7].

Для захисту від сульфатної корозії використовують добавки у вигляді летючої золи, що містить низькоосновні алюмінати кальцію, які майже повністю зв'язують гідроксид кальцію, який виділяється під час гідратації цементу і цим забезпечують підвищення стійкості бетону до впливу сульфатовмісних середовищ. Стійкість гіпсоцементно-пуцоланових і гіпсошлакоцементних в'язучих у сульфатних середовищах обумовлена

пониженою концентрацією СаО, оскільки СаО нейтралізується пуцолановими добавками або шлаками.

Отже, сульфатостійкість цементних бетонів і розчинів залежить від фізико-хімічних характеристик порової рідини, зміна яких у період ранньої гідратації забезпечує той чи інший ступінь сульфатостійкості матеріалу. Зменшення вмісту алюмінію в цементі є визнаним способом підвищення сульфатостійкості, оскільки зменшується імовірність утворення ГСАК під дією сульфатів. Аналогічного ефекту можна чекати у разі зміни характеристик порової рідини, які призводять до зниження осмотичного тиску за рахунок видалення з неї якомога більшої кількості вапна в період ранньої гідратації.

Іншими заходами боротьби із сульфатною агресією є застосування сульфатостійкого або низькоалюмінатного портландцементів, застосування бетонів підвищеної щільності та різних обмазок, ізоляції рулонними і плівковими матеріалами, пластбетонами.

## **5.2 Корозійні процеси між компонентами бетону**

До корозії третього виду належить також руйнівний процес хімічної взаємодії між компонентами бетонної суміші, наприклад, процес взаємодії лугів, які містяться в цементі, і кремнеземом заповнювачів. У складі портландцементу є від 1 до 1,5 % розчинних сполук (в перерахунку на  $\text{Na}_2\text{O}$ ). Їх джерелом є глинисті компоненти шихти і зола палива. Значна частина лугів потрапляє в шихту з пилом печей, який повертають під час випалу цементу. Деякі модифікації кремнезему, такі як тридиміт, кристобаліт, кремнеземисте скло, опал, опока, трепел, халцедон та інші набувають реакційної активності у лужному середовищі. Реакції таких видів кремнезему з лугами цементу призводять до утворення продуктів, що дуже збільшуються в об'ємі і призводить до виникнення руйнівного тиску в тілі бетону. Заповнювач, в якому міститься розчинних видів кремнезему більше 50 ммоль/л, вже є здатним до взаємодії з лугами цементу.

Найдієвішим способом запобігання такого виду корозії є обмеження вмісту лугів у цементі до 0,6% або введення в цемент активних мінеральних і деяких інших видів добавок, наприклад, вуглекислого літію, альбуміну.

### 5.3 Газова корозія бетону

Бетон і залізобетон руйнуються також внаслідок взаємодії з різними газами. У повітряно-сухих умовах експлуатації конструкцій агресивність газів на бетон незначна, але з підвищенням відносної вологості й температури навколишнього середовища корозія може виявитися дуже небезпечною. На відміну від корозії бетону і залізобетону у рідких агресивних середовищах процеси корозії арматури, що відбуваються у газоповітряному середовищі, як правило, визначають швидкість руйнування конструкцій.

Механізм дії на бетон діоксиду сірки, сірководню, хлористого водню, хлору, вуглекислого газу такий: проникаючи в пори бетону, газ, у першу чергу, нейтралізує гідроксид кальцію, а потім вступає у взаємодію з гідросилікатами та іншими гідратними новотворами цементу. Залежно від типу газу утворюються важкорозчинні сполуки, наприклад, гіпс,  $\text{CaCO}_3$  або добре розчинні продукти, такі як  $\text{CaCl}_2$  та інші [10].

Необхідні умови агресивного впливу газів на бетон – підвищена відносна вологість атмосфери і відповідна рівноважна вологість бетону або утворення конденсату на поверхні чи в його товщі. Нижня межа відносної вологості, за якої вплив на бетон агресивних газів є безпечним дорівнює 40–45 %.

Для визначення корозійного стану порового електроліту стосовно цементного каменю і арматурної сталі, що знаходяться в контакт з кислими газами, використовують рівноважні значення рН, які наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Види продуктів корозії залежно від рН середовища

Вид газу	Продукт корозії	Значення рН
$\text{SO}_3$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7,2
$\text{H}_2\text{S}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7,2
$\text{CO}_2$	$\text{CaCO}_3$	8,5

За впливом на бетон агресивні гази можна розподілити на три групи.

До першої групи можна віднести  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HF}$ , фтористий кремній, що утворюють з цементним каменем у поверхневому шарі бетону нерозчинні й важкорозчинні солі, які кольматують його пори. У результаті підвищується щільність бетону, знижується дифузійна проникність газів і уповільнюється швидкість їхньої взаємодії з цементним каменем. Найбільший інтерес серед цих кислих газів викликає  $\text{CO}_2$ , якого в атмосферному повітрі міститься до 0,03 %. У промислових повітряних середовищах його концентрація може перевищувати 0,1 %. Цей постійно діючий чинник забезпечує процес карбонізації в бетоні незалежно від присутності в повітрі інших газів, що дозволяє вважати карбонізацію бетону одним із процесів, які визначають швидкість нейтралізації бетону під впливом на нього суміші кислих газів. Інші кислі гази, як правило, вже взаємодіють з частково карбонізованим зовнішнім шаром бетону.

Карбонізація підвищує міцність бетону на 40–70 відсотків, знижує пористість на 5 відсотків та водопоглинання. І хоча цей процес супроводжується усадкою до 1,6 мм/м, але тріщини в бетоні не утворюються. Тому для бетону  $\text{CO}_2$  прийнято вважати безпечним. Але для залізобетону вуглекислий газ є агресивним, тому що він реагує з гідроксидом кальцію і продуктами гідратації цементу, в результаті чого величина рН порового електроліту знижується з 12,6–13 до 8,5–9, а це вже небезпечно для арматурної сталі, пасивність якої забезпечується при рН вище 11,8.

До другої групи газів належать діоксид сірки і сірководень, що утворюють з бетоном важкорозчинні кальцієві солі. Продуктом взаємодії в кінцевому підсумку є двоводний гіпс, що приводить до збільшення обсягу вихідних продуктів приблизно у 2 рази, і, як наслідок цього, виникненню в захисному шарі бетону значних напружень і тріщин. Тому діоксид сірки і сірководень небезпечні для бетону. Особливо небезпечні ці гази для арматурної сталі, бо величина рН знижується більш інтенсивно до 8, а глибина нейтралізації поверхневого шару бетону за два роки досягає 10 мм і більше [10].



Третя група газів представлена хлористим воднем, молекулярним хлором, парами йоду і броду, оксидами азоту. Ці гази утворюють з гідроксидом кальцію легкорозчинні солі. Для арматурної сталі найбільш небезпечними є галогеновмісні гази ( $\text{HCl}$  і  $\text{Cl}_2$ ). Наприклад, за вологості повітря 60 відсотків і концентрації  $\text{HCl}$  10 мг/л вже через 10 місяців експлуатації конструкції починається руйнування бетону, глибина нейтралізації складає 8 мм, а рН становить менше 7.

Вибір складів бетону і видів протикорозійного захисту здійснюють відповідно до СНіП 2.03.11-85 [1]. Залежно від ступеня агресивності газів товщина захисного шару бетону в залізобетонних конструкціях має складати:

- для слабкоагресивних середовищ не менше 20 мм, а марку бетону за водонепроникністю треба забезпечувати не нижче W 4;
- для середньоагресивних – 20 мм, а марка бетону за водонепроникністю – не нижче W 6;
- для сильноагресивних – 25 мм, а марка бетону за водонепроникністю – не нижче W 8.

Рекомендується застосовувати лакофарбові покриття першої і другої груп з товщиною лакофарбового шару від 0,1 мм до 0,15 мм; для середньоагресивних – від 0,15 мм до 0,2 мм; для сильноагресивних – від 0,2 мм до 0,25 мм.

До першої групи лакофарбових покриттів належать алкідні, масляні, нітроцелюлозні, полімерцементні, органосилікатні, полівінілацетатні, кремнійорганічні рідини; до другої – перхлорвінілові і на сополімерах вінілхлориду; до третьої – кремнійорганічні, поліуретанові, епоксидні, епоксидо-фенольні, хлоркаучукові, тіоколові; до четвертої – епоксидні, епоксидно-фенольні покриття і хлорсульфирований поліетилен.

## 6 ЕЛЕКТРОХІМІЧНА КОРОЗІЯ ЗАЛІЗОБЕТОНУ ТА СПОСОБИ ЗАХИСТУ

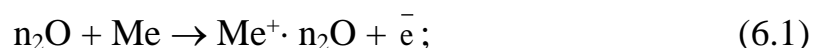
### 6.1 Механізм електрохімічної корозії залізобетону

Досвід експлуатації залізобетонних конструкцій свідчить, що однією з причин їх передчасного руйнування є корозія сталевих арматур, виникненню і прискореному перебігу якої сприяє корозія самого бетону. Процеси корозії арматурної сталі в залізобетоні мають електрохімічний характер і підкоряються закономірностям, за якими поширюється електрохімічна корозія металів. Але у зв'язку з тим, що арматурна сталь у залізобетоні завжди знаходиться під захисним шаром бетону, необхідно враховувати специфіку цього процесу.

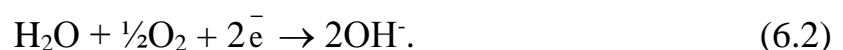
Швидкість корозії арматури залежить як від властивостей самої сталі, так і від властивостей і структури бетону, товщини захисного шару, характеру навколишнього середовища. Захисний шар бетону захищає арматуру від зовнішнього середовища, але не ізолює її повністю. Варто сказати, що бетон завжди є проникним для води і кисню – основних необхідних речовин процесу електрохімічної корозії сталі.

Відомо, що корозія металів найчастіше відбувається за електрохімічним механізмом, для чого необхідне виконання таких умов:

- наявність різниці потенціалів між окремими ділянками поверхні металу, тобто його електрохімічна неоднорідність;
- наявність електролітичного зв'язку між цими ділянками;
- активний стан поверхні на анодних ділянках, де метал руйнується (розчиняється) за схемою (6.1):



4) наявність достатньої кількості кисню, необхідного для асиміляції надлишкових електронів на катодних ділянках поверхні металу за схемою (6.2):



Оскільки структура сталі і контактного шару бетону в її поверхні неоднорідні, то наявність різниці потенціалів між окремими ділянками поверхні металу має місце завжди.

Важливою особливістю цементного бетону є лужність рідкої фази, насиченої  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Пористість же бетону сприяє активній взаємодії його із середовищем. Тому відсутність корозії арматури в бетоні обумовлена пасивністю сталі в лужному середовищі, тобто нездатністю до розчинення за наведеною вище реакцією (6.1).

Анодний процес на поверхні арматурної сталі являє собою реакцію окислювання заліза за схемою (6.3):



Анодний процес проходить тим легше, чим вище вологість бетону.

Катодний процес, за наявності високолужного середовища, відбувається з кисневою деполяризацією, тобто відбувається відновлення кисню з перетворенням його в присутності води в іон гідроксилу за схемою (6.4) :



Великий вплив на процес корозії має відношення площ катодних ( $S_k$ ) і анодних ( $S_a$ ) поверхонь. Якщо опірність бетону мала і відношення  $S_k/S_a$  достатньо значне, арматурна сталь у зонах з низьким значенням рН може піддаватися сильній корозії. Об'єм продуктів корозії заліза більше, ніж у вихідного металу, що призводить до руйнування захисного шару бетону.

## **6.2 Корозія арматури в залізобетоні та способи її пасивації**

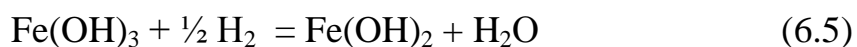
Арматурна сталь може стати пасивною, коли створити середовище, яке окислює. А це складне завдання, тому що на залізобетон можуть впливати різні кислі гази. Для того щоб попередити виникнення корозії, важливо визначити термодинамічні умови перебігу електрохімічних реакцій і залежність їхнього окислювально-відновного потенціалу  $E_h$  від рН середовища. Окислювально-відновний потенціал не залежить від природи металу. Якщо значення рН середовища електроліту недостатнє для того, щоб іон двовалентного заліза, що

утвориться на аноді, сформував захисну плівку безпосередньо на поверхні аноду, то арматурна сталь піддається корозії.

З'ясуванню термодинаміки утворення і стійкого існування різних захисних плівок на залізі у вигляді сполук Fe, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe(OH)<sub>2</sub>, FeOOH, Fe(OH)<sub>3</sub> і іонів двовалентного і тривалентного заліза присвячені дослідження В. І. Бабушкіна та інших [7]. Вони показали, що в лужній зоні (рН вище 7) найбільш термодинамічно стійким продуктом є Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. У присутності кисню (P<sub>O<sub>2</sub></sub> = 0,021 МПа) і за активної концентрації іонів заліза, яка дорівнює 1 ммоль/л, самим стійким у термодинамічному відношенні продуктом є Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Розрахунки також показали, що крім зазначених продуктів у лужних середовищах ймовірно утворення Fe(OH)<sub>2</sub>, FeOOH, Fe(OH)<sub>3</sub>.

Отже, можна зробити висновок, що для збереження арматурної сталі в залізобетоні, окрім великого значення рН, потрібно створити щільну структуру із замкненими порами, заповненими воднем або інгібуючими газами.

Присутність водню запобігає утворенню гідроксид за схемою (6.5):



Застосування добавок до бетону у вигляді летючих інгібіторів приводить до створення пасивних адсорбційних плівок на поверхні сталі. Летючі інгібітори, заповнюючи пори, зменшують парціальний тиск кисню в повітрі. Підвищення величини рН в бетоні сприяє тому, що кількість розчиненого кисню в поровому електроліті стає достатнім для збереження пасивності заліза. Різке зниження рН (у разі проникнення кислих газів) змінює рівновагу. Тому в лужному середовищі бетону, якщо рН вище 11,8 для корозії арматури контролюючим є анодний процес. Якщо ж рН нижче 11,8, то утворення і подальша стійкість захисних плівок малоймовірні, і контролюючим може виявитися катодний процес. Для захисту арматурної сталі під час катодного контролю потрібна дуже надійна ізоляція арматури від повітряного середовища. Продукти корозії, що утворюються внаслідок вторинних процесів в електроліті, сталь не пасивують.

Запобігати корозії арматурної сталі в цементних бетонах доцільно за допомогою прийомів і способів, що забезпечують лужне середовище (рН більше 12) на всій поверхні контакту порового електроліту з арматурною сталлю. Це гарантує анодний контроль корозійного процесу.

Важливим питанням є розгляд кінетики корозії арматурної сталі. Мірою швидкості корозії є кількість електрики, що проходить між катодними й анодними ділянками. Величина швидкості визначається омичним опором електроліту.

Неоднозначність потенціалу сталі пояснюється тим, що на нього впливають не стільки концентрація власних іонів, скільки  $E_h$  (тобто окисна здатність середовища), рН і процеси, що відбуваються на її поверхні. Значення потенціалу сталі залежить від вологості і проникності бетону для кисню.

Велике значення має вміст кисню в розчині, він є гарним деполяризатором і його присутність збільшує швидкість корозії арматури. З іншого боку, під впливом кисню у деяких умовах створюються міцні захисні плівки. Чим більше кисню в розчині, тим легше вони утворюються. У лужних середовищах інгібіторні властивості кисню виявляються значно сильніше, ніж у кислих, через меншу розчинність захисних плівок [9].

Важливий і той факт, що для бетону навіть за умови невеликої вологості характерна іонна провідність. Через складність макро- і мікрокапілярної структури фізико-хімічні властивості електроліту бетону сильно відрізняються від звичайних рідких електролітів, і ці властивості безупинно змінюються в часі.

Різноманітні переміщення в бетоні можуть здійснюватися внаслідок фільтрації під тиском, капілярного підсмоктування, електроосмотичних явищ, що приводить до руху порову рідину, водночас може перебувати в русі й газоподібна фаза. Отже, важливо знати, як залежить корозійна активність бетону від повітропроникності.

На ступінь вологості бетону і його аерованість сильно впливає температура, що, в свою чергу, пов'язано з кінетикою дифузійних і

електродних процесів. Різкі періодичні температурні зміни можуть зруйнувати структуру як самого бетону, так і контактного шару на межі арматура / цементний камінь.

Процеси корозії сталі посилюються з появою на поверхні бетону тріщин, що полегшують доступ вологи, кисню, кислих газів і агресивних солей. За значної вологості бетону, коли він має велику електричну провідність у зоні тріщини, може функціонувати концентраційна пара, що обумовлено різницею значень рН електроліту, що стикається зі сталлю (рН знижено, захисні плівки зруйновані – це анод) і під шаром бетону на певній відстані від неї (рН високе, наявність захисних плівок – це катод). У такому разі допускається можливість омичного контролю.

У разі підвищення вологості шляхом заповнення пор і капілярів водою, дифузія кисню може бути утруднена – тоді омичний контроль заміниться катодним. За повного насичення бетону водою, під час розкриття тріщини до 0,5 мм корозія арматури припиняється. Дія контраційної пари може посилюватися дією мікропари, яка є наслідком диференціального напруження, що виникає в арматурі під час розтягнення, в зоні тріщини і під шаром щільного бетону. Більш напружена ділянка завжди стає анодом, а менш напружена – катодом.

Судити про електрохімічний стан сталі в бетоні можна за її здатністю поляризуватися. Пасивна сталь на відміну від активної дуже сильно поляризується, тобто її потенціал різко зміщується в позитивну сторону вже за малої щільності накладеного струму.

Для забезпечення стійкості арматурної сталі в бетонах необхідно, щоб бетони мали пасивувальну дію щодо арматури. Довговічність залізобетонних конструкцій забезпечується вибором складу бетону, товщиною його захисного шару, надійного протикорозійного захисту та інше (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Вимоги до залізобетонних конструкцій залежно від ступеня агресивності експлуатаційних середовищ

Показник	Агресивність середовища		
	слабка	середня	сильна
Мінімальна товщина захисного шару, мм: – плит, полиць, ребрих плит, стінових панелей;	15	20	20
– балок, ферм, колон, ребер, плит	20	20	25
Припустима ширина розкриття тріщин для ненапружених конструкцій, мм	0,2	0,15	0,1
Категорія тріщиностійкості для попередньо напружених конструкцій	3	2	2
Марка бетону за водонепроникністю	W4	W6	W8

### 6.3 Електрокорозія залізобетону та способи захисту

В основі електрокорозії цементного каменю, бетону і залізобетону під дією електричного струму лежать електрохімічні та електроосмотичні процеси, що виникають під дією постійного і змінного струмів. Впливу електричного струму піддаються всі компоненти залізобетону: цементний камінь, заповнювачі й арматурна сталь. Швидкість електрокорозійних процесів у залізобетоні залежить від виду і параметрів струму, характеру його зміни, властивостей залізобетону та довкілля, включаючи температурно-вологісний режим, провідність, наявність агресивних компонентів.

Найчастіше електрокорозію залізобетону викликають блукаючі струми, джерелом яких можуть бути трамвайні колії, електрифіковані залізниці, метрополітен, внутрішньозаводський та інший промисловий транспорт, електричні установки електролізних цехів підприємств, лінії електропередачі постійного струму системи провід-земля. Корозійний стан споруд, що знаходяться під впливом блукаючих струмів, визначають виміром потенціалу, сили, напрямку і щільності струму в конструкції. Під час входу струму в конструкцію утворюється катодна зона, а на виході – анодна. Анодні ділянки в бетоні мають позитивний потенціал щодо навколишнього середовища, а катодні – негативний. У всіх випадках електродом може бути тільки метал,

тобто в залізобетонних виробках або конструкціях анодом і катодом можуть служити ділянки арматурної сталі або інших металевих конструкцій, що стикаються з бетоном.

Залізобетонними конструкціями електричний струм рухається шляхом найменшого опору. Найбільшому руйнуванню внаслідок електролізу піддаються місця виходу електричного струму, тобто анодні ділянки арматури. Бетон має порівняно високий омичний опір, але у вологому стані його провідність може значно збільшуватися. Під впливом електричного струму метали поведуться як провідники першого роду, а бетон (електроліт) – як провідник другого роду.

Усі метали, в тому числі арматурна сталь, мають високу електричну провідність і значну теплопровідність, тому під час перебігу струму через арматуру в ній не відбувається ніяких структурних змін, а спостерігається деякий розігрів. Можуть виникнути значні напруження на контакті арматури сталь-бетон. Якщо ж сталь виступає в ролі електродів, занурених в електроліт, то тоді ділянки сталі з боку негативного полюсу джерела струму будуть заряджені негативно, а ділянки, з'єднані з позитивним полюсом – позитивно. Арматурні стержні-анооди в міру анодного розчинення руйнуються, а на стержнях-катадах відбувається відновлення іонів  $H^+$  до  $H_2$ .

Найчастіше блукаючі струми входять у залізобетонну конструкцію з боку ґрунтового електроліту, тоді захисний шар бетону в конструкції може піддаватися значному впливу електричного струму. Цей процес викликає в залізобетоні глибокі фізико-хімічні й структурні зміни. У всіх випадках на анодних ділянках арматури відбувається реакція розчинення заліза. У процесі контакту поверхні сталеві арматури з поровою рідиною цементного каменю ділянки, що є анодом, схильні до переходу в пасивний стан через сильну поляризацію в цьому лужному середовищі ( $pH = 12-13$ ). Уже за малих значень густини блукаючого струму внаслідок різкого підвищення опору (за рахунок утворення захисних плівок) швидкість анодного розчинення заліза сильно сповільнюється [8].



Основними заходами боротьби з електрокорозією залізобетону є зменшення сил струмів витoku, застосування електрозахисту споруд, підвищення електричного опору самого бетону та використання ізоляційних покриттів, таких як бітумно-петролатумна суміш, бітумна мастика, органічні полімерні матеріали типу полімербетону, бетонополімеру.

## **7 КОРОЗІЯ МЕТАЛІВ І ЇХ АНТИКОРОЗІЙНИЙ ЗАХИСТ**

### **7.1 Характеристика металів і сплавів як об'єктів корозії**

Метали мають багато цінних властивостей, у тому числі високу міцність, пластичність, зварюваність, витривалість, що дає змогу широко застосовувати їх у будівництві. Але у чистому вигляді метали практично не використовуються, тому що знайшли застосування їхні сплави. Найбільш затребуваними в будівництві є сплави заліза – сталі й чавуни.

Сталь – сплав заліза з вуглецем, що містить до 2-ох відсотків вуглецю. Взаємодія модифікацій заліза з вуглецем приводить до появи твердих розчинів: фериту і аустеніту. Вуглець, що залишився в надлишку після утворення фериту, зв'язується в хімічну сполуку – цементит  $Fe_3C$ . Фізико-механічні та інші властивості сталі залежать від співвідношення різних фаз в її структурі, що визначається кількістю вуглецю. У будівництві застосовують в основному маловуглецеві сталі зі вмістом вуглецю 0,1–0,22 відсотки, і низьколеговані, де вуглецю не більше ніж 0,2 відсотка, а легуючих компонентів до 5-ти відсотків. Як легуючі компоненти до сталі застосовують алюміній, ванадій, вольфрам, кремній, марганець, мідь, молібден, нікель, титан, вуглець, хром та деякі інші. З високолегованих сталей у будівництві поширені високостійкі до корозії хромонікелеві нержавіючі сталі, до складу яких входять 17–20 % хрому, 8–11 % нікелю і 0,1–0,2 % вуглецю.

Металургійна промисловість випускає такі види сталі: низьколеговані, середньолеговані, високолеговані неіржавіючі, корозійностійкі, жаростійкі. З них виготовляють кутковий профіль, швелери і двотаври, листовий прокат,

труби для резервуарів, балки, колони, ферми, трубопроводи для води, нафти й газу, каркаси висотних будівель, тонкі оболонки покриттів.

Відповідно до наявної класифікації корозія металевих конструкцій за механізмом її протікання підрозділяється на три види: хімічну, електрохімічну, біологічну.

## 7.2 Хімічна корозія металів

Цей вид корозії поділяють на два підвиди: газова і корозія в розчинах неелектролітів.

### 7.2.1 Газова корозія металів

Руйнування від газової корозії відбувається внаслідок окислювання металу. Прикладом є газова корозія металів за підвищених температур у сухих газових середовищах (топкові гази й гаряче повітря), що містять крім  $O_2$  інші гази, наприклад,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $Cl$ ,  $H_2O$  і  $CO_2$ . Цей тип корозії характерний для металевих конструктивних елементів теплофікаційних мереж, теплових агрегатів і грубних установок усілякого призначення, елементів димарів, повітроводів тощо.

Газова корозія відбувається за законами звичайних хімічних реакцій, що відбуваються під час контакту металу із сухими газами, тобто за таких умов, коли унеможливлена конденсація водяної пари, що призводить до перетворення механізму реакції на атмосферну електрохімічну корозію. Метали термодинамічно нестійкі до дії газового окислювача і це є причиною корозії. Критерієм можливості або неможливості перебігу реакцій за участю газової фази служить зміна вільної енергії Гіббса  $\Delta G^{\circ}_T$  і рівноважне значення парціального тиску  $CO_2$  або будь-якого іншого газоподібного окислювача. Завдяки термодинаміці можна визначити можливість і напрямок перебігу реакцій за схемами (7.1; 7.2; 7.3):



де  $\Delta G^{\circ}_T = -58$  ккал/моль, тобто процес йде, тому що знак негативний, але оскільки FeO не утворює суцільну захисну плівку, то виникає іржа;



де  $\Delta G^{\circ}_T = -378$  ккал/моль, але водночас утворюється корунд ( $Al_2O_3$ ), що являє собою тонку і дуже міцну плівку, яка захищає Al від корозії;



де  $\Delta G^{\circ}_T = +18$  ккал/моль. Оскільки значення позитивне, то процес корозії не іде і золото є дійсно стійким у кисневому середовищі.

У разі підвищення температури парціальний тиск кисню для металів різко збільшується, але залишається меншим, ніж парціальний тиск кисню в атмосфері. Виняток становлять дорогоцінні метали, такі як золото, срібло, платина.

Механізм процесів газової корозії пояснюється тим, що швидкість окислювання не пов'язана безпосередньо з величиною  $\Delta G^{\circ}_T$ , а обумовлюється кінетичними факторами – температурою, швидкістю росту і суцільністю окисних плівок, що утворюються. Оскільки метал віддав кисню 2 валентних електрони, така хемосорбція кисню відбувається майже миттєво. Далі плівка товщає і перетворюється в оксидну, що складається з іонного оксиду цього металу, а швидкість росту оксидної плівки прямопропорційна часу.

Газова корозія сталі характерна для конструкційних елементів, які працюють у контакті з газовими середовищами за температури вище  $500^{\circ}C$ . На швидкість окислювання заліза і сталей у сухому повітрі значний вплив мають домішки у вигляді  $SO_2$  і водяної пари. Швидкість корозії сталі в повітрі, що містить по 5,0 відсотків  $SO_2$  і водяної пари, втричі вища, ніж у чистому повітрі, а присутність  $CO_2$  навпаки знижує швидкість корозії сталі.

Процес окислювання сталі і чавуну, на відміну від окислювання чистого заліза, супроводжує процес знеуглецювання (розкладання  $Fe_3C$ ), швидкість якого росте з підвищенням температури. За наявності в газовому середовищі водню спостерігається також воднева крихкість. Знеуглецювання сталі відбувається під час її контакту з газовим середовищем, що містить  $CO_2$ ,  $O_2$  і  $H_2$  і водяну пару, і це різко знижує міцність сталі. Щоб підвищити стійкість сталей до впливу зазначених газів, до їх складу додають легуючі компоненти: хром, алюміній, марганець і вольфрам, а підвищення вмісту вуглецю дозволяє сповільнити процес знеуглецювання. Надійність роботи будівельних

конструкцій за високих температур пов'язана і з впливом температур на їх механічні властивості. Тому довговічність конструкцій може бути оцінена за допомогою таких характеристик як жаростійкість й жароміцність [10].

Для захисту металів від хімічної газової корозії застосовують такі методи: легування сталі, використання жаростійких сплавів, утворення захисних покриттів з жаростійких елементів або з тугоплавких сполук, а також використання захисної або контрольованої атмосфери та раціонального конструювання агрегатів і установок.

Слід зазначити, що до 500 °С є цілком стійкими сплави з низькою жаростійкістю (наприклад сталь Ст 3), низьколеговані будівельні сталі, а також сірі чавуни. Для виготовлення конструкцій димарів і елементів печей застосовують сплави з помірною жаростійкістю, наприклад, середньолеговані сталі ХМ 5. Грубну арматуру виробляють із сплавів з більшою жаростійкістю, зокрема Х 17 і Х 25 з жаростійкістю 870–1 100 °С.

Для захисту від газової корозії за підвищених і високих температур застосовують температуростійкі покриття, що забезпечують захист як від поверхневої, так і від глибинної міжкристалічної корозії, а також запобігають знеуглецюванню і дифузії в метал азоту і водню. Для захисту труб можна застосовувати різні види емалей – кислото-, луго- й жаростійкі. Як жаростійкі покриття можна застосовувати жаростійкі сплави.

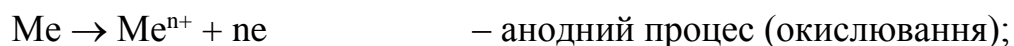
#### 7.2.2 Корозія металів у розчинах неелектролітів

Цей вид корозії включає крім неелектролітів також агресивне середовище розплавів металів і неметалів і протікає також за хімічним механізмом. До неелектролітів відносяться рідкі середовища, такі як нафта, бензин, гас та інші види рідкого палива, деякі олії, органічні розчинники (чотирихлористий вуглець, хлороформ і т.п.), рідкий бром, розплав сірки. Досвід експлуатації нафтопроводів, сховищ для нафти і продуктів її переробки показує, що хоч малосірчані сорти нафти, бензин без домішок і гас не агресивні щодо металів, їх корозійна активність різко зростає від наявності домішок у вигляді біоспиртів, сірководню та елементарної сірки, а наявність у нафті води різко

підсилює корозію. Рідкий бром теж активно взаємодіє з металами, у тому числі із сталлю, швидко руйнує її навіть при звичайній температурі. Для захисту металевих конструкцій від корозії в рідких неелектролітах використовують корозієстійкі високохромисті сталі. Ефективним є нанесення захисних покриттів. Велике значення має також очищення неелектролітів від води і домішок.

### 7.2.3 Електрохімічна корозія металів

Корозія у розчинах електролітів називається електрохімічною. Електроліти – це середовища, що мають іони (аніони і катіони), що рухаються і забезпечують анодний і катодний процес. До електрохімічних середовищ належать: звичайна атмосфера (атмосферна корозія); підземне середовище (підземна корозія); середовище, в якому діють блукаючі струмені (наприклад, трамвайні шпали або шпали в метро), водне середовище (річкові, морські, стічні води, технологічні рідини). Сталеві конструкції промислових будівель і споруд, підземні трубопроводи, металеві ємкості, металеві конструкції гідротехнічних споруд звичайно експлуатуються в умовах контакту з рідкими електролітами. Особливість електрохімічної корозії полягає в тому, що окислення атомів металу та відновлення окислювача супроводжується виникненням між цими ділянками електрорушійної сили (ЕРС) і перебігом електричного струму. Електрохімічна корозія відбувається внаслідок перебігу двох електродних напівреакцій: анодної (окислення) і катодної (відновлення):



Деякі значення електродних потенціалів наведені в таблицях 7.1 та 7.2.

Таблиця 7.1 – Електродні потенціали найважливіх катодних напівреакцій

Напівреакція	Потенціал $E_0$ , В	Напівреакція	Потенціал $E_0$ , В
$2\text{H}^+ + 2e \leftrightarrow \text{H}_2$	0,00	$2\text{H}^+ + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2e \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	+1,229
$\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2e \leftrightarrow 2\text{OH}^-$	+0,401	$\text{Cl}_2 + 2e \leftrightarrow 2\text{Cl}^-$	+1,338

Таблиця 7.2 – Величини найважливіх стандартних електродних потенціалів

Реакція	Потенціал $E_0$ , В	Реакція	Потенціал $E_0$ , В
$\text{Al}^{3+} + 3e \leftrightarrow \text{Al}$	-1,65	$\text{Sn}^{2+} + 2e \leftrightarrow \text{Sn}$	-0,14
$\text{Ti}^{2+} + 2e \leftrightarrow \text{Ti}$	-1,63	$\text{Fe}^{3+} + 3e \leftrightarrow \text{Fe}$	-0,04
$\text{Ti}^{3+} + 3e \leftrightarrow \text{Ti}$	-1,21	$2\text{H}^+ + 2e \leftrightarrow \text{H}_2$	$\pm 0,00$
$\text{Cr}^{2+} + 2e \leftrightarrow \text{Cr}$	-0,91	$\text{Cu}^{2+} + 2e \leftrightarrow \text{Cu}$	+0,34
$\text{Zn}^{2+} + 2e \leftrightarrow \text{Zn}$	-0,76	$\text{Ag}^{1+} + 1e \leftrightarrow \text{Ag}$	+0,80
$\text{Cr}^{3+} + 3e \leftrightarrow \text{Cr}$	-0,74	$\text{Pt}^{2+} + 2e \leftrightarrow \text{Pt}$	+1,19
$\text{Fe}^{2+} + 2e \leftrightarrow \text{Fe}$	-0,44	$\text{Au}^{1+} + 1e \leftrightarrow \text{Au}$	+1,68
$\text{Ni}^{2+} + 2e \leftrightarrow \text{Ni}$	-0,25		

Можливе сполучення анодних і катодних напівреакцій залежить від властивостей металу, розчину електроліту і термодинамічних умов. У більшості випадків корозійні пари утворюються внаслідок окислювання металу і відновлення іонів водню або кисню, які розчинені в електроліті. У цьому разі в ролі катодів виступають струмопровідні домішки в металах з більш позитивним потенціалом, які є донорами електронів. Реальна можливість перебігу подібних процесів корозії пов'язана з тим, що всі технічні метали і сплави неоднорідні за структурою і складом. Неоднорідність сталі під час контакту з розчинами електроліту призводить до виникнення на її поверхні численних гальванічних короткозамкнених елементів, у яких анодами слугують феритні ділянки, а катодами – включення цементиту і графіту.

Процес корозії металів характеризується значенням необоротного потенціалу, що встановлюється на металі в результаті обміну не тільки іонами металу, але й іншими іонами (або атомами, молекулами). Водночас анодний процес здійснюється переважно іонами металу, що кородує, а катодний – іншими іонами. У реальних умовах під час замикання ланцюга корозійного елемента відбувається зміна початкових потенціалів електродів, що призводить до відхилення потенціалу від рівноважного, стаціонарного (або

необоротного). За анодного напрямку струму, коли метал розчиняється і в приелектродному шарі накопичуються катіони металу, потенціал зміщується в бік позитивних значень, і процес корозії буде гальмуватися. Таке зміщення потенціалу називається поляризацією.

Крім зазначеної вище концентраційної поляризації може мати місце і хімічна поляризація, яка пов'язана зі зміною складу поверхні електродів. Це характерно для випадків, коли на поверхні анодів починають утворюватися хімічні сполуки у вигляді плівок, унаслідок чого спостерігається стрибкоподібний зсув потенціалу в позитивний бік і зниження щільності корозійного струму. Також в корозійних процесах відбувається і деполаризація, яка пов'язана зі зменшенням поляризації електродів. Якби не було поляризації електродів, то сили корозійних струмів були б дуже великі й швидкості корозійних процесів були б на кілька порядків вищими.

На швидкість процесів електрохімічної корозії впливають внутрішні чинники, що залежать від складу і структури металу, стану його поверхні, існування початкових напружень, від термічної та механічної обробки. До цих чинників належать: термодинамічна нестійкість цього виду металу; неоднорідність його структури; існування швів зварювання внаслідок нерівномірного нагріву, що додає металу внутрішніх напружень.

На швидкість корозії впливає цілий ряд зовнішніх чинників, таких як вид, склад і властивості корозійного середовища, умови, в яких відбувається процес, а саме: температура, тиск, швидкість потоку.

Атмосферна корозія металевих конструкцій є одною з найпоширеніших, тому що близько 80-ти відсотків конструкцій і споруд експлуатуються в атмосферних умовах. Залежно від відносної вологості повітря, розрізняють такі види корозійної атмосфери: суха ( $W$  менше 60 %); нормальна ( $W = 61-75$  %); волога ( $W$  більше 75 %). Механізм її протікання залежить від товщини плівки вологи на поверхні конструкції. Суха атмосферна корозія характерна для умов, коли товщина плівки вологи не перевищує 10 нм і за механізмом цей процес

близький до газової корозії. У вологому середовищі товщина плівки вологи не перевищує 0,1 мкм, у разі мокрого – коливається від 0,1 мкм до 1 мкм.

Корозійна агресивність атмосфери характеризується і кліматичними чинниками, забрудненнями у вигляді кислих газів, туманами, вмістом пилоподібних часток у вигляді розпилених у повітрі хімічних сполук. Швидкість корозії багато в чому обумовлена рівнем критичної вологості, що залежить від стану поверхні металу і концентрації забруднень. Залежність відносної швидкості корозії деяких матеріалів від виду атмосферного повітря наведена в таблиці 7.3.

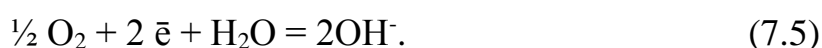
Таблиця 7.3 – Швидкість корозії деяких металів

Вид металу або сплаву	Швидкість корозії, мм/м <sup>2</sup> рік (залежно від виду атмосферного повітря)			
	сільське	міське	промислових районів	морське
Вуглецева сталь	6–60	30–70	30–160	20–170
Алюмінієві сплави	менше 0,1	0,1–1,0	1–1,5	0,5
Цинк	0,2–5	1–7	3–15	0,5–7

Морське повітря без промислових забруднень агресивне до сталі через вміст у ньому хлоридів натрію (~ 100 мг/м<sup>3</sup>) і підвищену вологість повітря у прибережній смузі (шириною до 1 км). У морській промисловій атмосфері швидкість корозії збільшується внаслідок забруднення повітря пилом, кислими газами (зокрема, коли вміст SO<sub>2</sub> доходить до 70 мг/м<sup>3</sup>). Корозія сталі в сухому атмосферному повітрі за механізмом перебігу близька до газової корозії, а якщо на поверхні сталі є плівка вологи достатньої товщини, то корозія відбувається за електрохімічним механізмом. Водночас на аноді відбувається реакція окислювання фериту (α-Fe) за схемою (7.4):



На катоді, як правило, йде процес кисневої деполяризації (7.5):

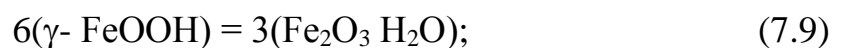
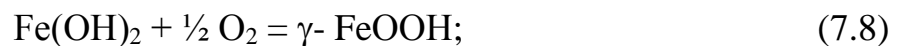




Реакція (7.4) характерна для вологого повітря, вода сприяє підвищенню реакційної здатності кисню. Розчинення компонентів підсилює електричну провідність і прискорює корозію. Хоча розчинення кислих газів у плівці вологи знижує значення рН електроліту до 5 і нижче, катодний процес все ж відбувається за участю кисню, де останній виступає як деполяризатор (7.6):



Від того, яка реакція має місце, залежать вид вторинних реакцій і склад продуктів корозії. У нейтральних і лужних середовищах вторинні реакції під час корозії сталі визначаються наявністю  $\text{OH}^-$ -іонів, виходячи з реакцій (7.7; 7.8; 7.9; 7.10; 7.11):



Вплив пилу й аерозолів в атмосфері пов'язаний з їх мінеральним складом, розчинністю і гігроскопічністю. Механізм перебігу процесів корозії в цьому випадку залежить від складу плівкового електроліту і мало чим відрізняється від розглянутих вище процесів. Швидкість корозії визначається і видом металу конструкції. Так, алюмінієві сплави в порівнянні з вуглецевою сталлю мають більш високу корозійну стійкість, що пов'язано з утворенням на поверхні конструкції щільної і міцної оксидної плівки. Але алюмінієві сплави швидко кородують у середовищах, які містять газоподібний хлор, фтор, а також пилоподібні частки карбонатів калію і натрію.

Під час роботи будівельних конструкцій в атмосферних умовах слід враховувати наявність контактів двох або декількох металів з різним значенням електродних потенціалів. Водночас контакти вважаються припустимими, якщо швидкість корозії анода не перевищує  $50 \text{ г/м}^2$  на рік. Так, припустимими вважаються контакти металів і сплавів, що входять у такі групи:

1) цинк, алюміній, кадмій;

2) залізо, вуглецеві сталі, свинець, олово;

3) нікель, хром, хромисті сталі, хромонікелеві сталі.

Усередині кожної групи метали піддаються корозії, знаходячись у контакті з металами, розташованими за ними.

Для боротьби з цим видом корозії необхідно йти шляхом введення до складу сталей легуючих добавок і створення атмосферостійких сталей або нанесення на будівельні конструкції захисних покриттів, а також шляхом зменшення ступеня агресивності експлуатаційних середовищ.

Для підвищення корозійної стійкості сталі використовують легуючі добавки (до 30 %) Cu, Ni, Cr, Al, Ti, P. Навіть низьколеговані сталі мають у 2–2,5 рази більш високу корозійну стійкість, ніж сталь Ст 3.

Основним методом захисту конструкцій від атмосферної корозії є нанесення на їхню поверхню покриттів у вигляді плівок металу або інших речовин – органічних і неорганічних. З металевих покриттів для захисту конструкцій у слабо- і середньоагресивних середовищах найбільшого поширення набули цинкові та алюмінієві, оскільки в них більш електронегативний потенціал щодо сталі. Цинкові покриття товщиною від 50 мкм до 200 мкм, що наносяться методом гарячого цинкування, напилювання або гальванічним способом, подовжують термін служби конструкції до 50 років.

Лакофарбові покриття значно дешевше металевих, тому застосовуються більше. Вони, як правило, багат шарові. Вибір виду лакофарбового покриття здійснюють відповідно до СНіП 2.03.11-85 [1].

Перспективним способом боротьби з корозією конструкцій є зменшення ступеня агресивності промислового газоповітряного середовища шляхом скорочення або повного виключення технологічних викидів в атмосферу.

Обстеження зварених з'єднань металевих конструкцій показали, що ці з'єднання є місцями посиленої корозії через внутрішні напруження. Крім цього під час проєктування будинків і споруд з використанням металевих конструкцій треба вибирати раціональні конструктивні форми перерізів, щоб

забезпечити принцип найменшої площі поверхні. Для захисту від контактної корозії з іншими металами і бетоном місця контакту ізолюють тіколовими стрічками, бітумонізованими прокладками.

*Підземна корозія металів* відбувається під час роботи конструкцій у ґрунтах. У цих умовах конструкції можуть піддаватися електрокорозії під дією блукаючих струмів і біокорозії. Особливістю ґрунтів є їх структурна і хіміко-мінералогічна неоднорідність. У структурному відношенні ґрунти представлені твердою, рідкою і газоподібною фазами. Властивості твердої фази можуть варіюватися, тому що можуть складатися з різних гірських порід: пісків, глин, гранітів, базальтів, гнейсів тощо. Властивості рідкої фази теж змінюються в широких межах залежно від складу і властивостей контактуючих з нею мінеральних фаз газоповітряного середовища. Властивості газоподібної фази визначаються її складом, структурою і ступенем ущільнення ґрунту. До таких об'єктів належать нафто-, газо- і водопроводи, каналізаційні і теплові мережі, заглиблені резервуари, ємкості, опори, палі, інші споруди і конструкції. Для них придатні маловуглецеві й низьколеговані сталі.

До зовнішніх факторів, що визначають інтенсивність ґрунтової корозії належать: склад і структура ґрунту, його вологість, хімічний склад, рН ґрунтових вод або ґрунтового електроліту, Eh, повітропроникність, питомий електричний опір. Найбільш важливим є останній показник, що залежить від вологості, складу і концентрації солей, повітропроникності, структури тощо.

У твердій частині ґрунтів найбільш активні в корозійному відношенні колоїдно-дисперсні мінерали (в основному глинисті), органічні сполуки (в основному гумус) і водорозчинні солі. Вологість ґрунтів багато в чому визначає їхні корозійні властивості: з підвищенням вологості корозійна активність ґрунтів спочатку збільшується і досягає максимуму, а потім падає внаслідок підвищення питомого електричного опору (через зменшення вологості). Найбільших значень швидкість корозії досягає при вологості 15–25 відсотків. Ґрунтовий електроліт і ґрунтові води можуть мати різну мінералізацію. Але

загальновизнаним фактором, що визначає корозійну активність ґрунтів, є їх рН, вміст іонів  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  і вугільної кислоти.

Мінімальна агресивність ґрунтів спостерігається для заліза і сталей за  $\text{pH} = 12\text{--}14$ , для алюмінію –  $6\text{--}7$ , цинку –  $11,0\text{--}11,5$ . Максимальною є агресивність ґрунтів зі зниженим значенням  $\text{pH} \approx 3$ , що особливо характерно для болотистих і торф'яних ґрунтів. Із зовнішніх факторів слід зазначити температуру: підвищення температури ґрунтового електроліту прискорює електрохімічні процеси, промерзання ґрунту сповільнює їх перебіг.

Для підземної корозії найбільш небезпечні мікрокорозійні пари, що виникають через неоднорідність поверхні конструкції (макрівключень, подряпин, ум'ятин, наклепу, а також зварених швів), унаслідок макроструктурної неоднорідності складу і властивостей ґрунтів, в першу чергу парціального тиску кисню в ґрунтовому електроліті. Відмінності у вмісті кисню вздовж труби зумовлені неоднаковою пористістю ґрунтів, коли є межа розділу, наприклад, пісок і глина. Це пов'язано з коливаннями глибини закладення і рельєфом місцевості. У результаті на ділянці з більш високим парціальним тиском кисню утворюється катодна зона, а на ділянці з меншим тиском – анодна зона. В анодних зонах, де утруднений доступ кисню, і відбувається руйнування стінок трубопроводу (піттингів, виразок, раковин). Досвід показує, що в більшості випадків ґрунтова корозія відбувається з катодним контролем [11].

Швидкість корозії підземних споруд складає, мм/рік:

- у нейтральних ґрунтах –  $0,01\text{--}0,05$ ;
- у висококорозійному ґрунті –  $0,05\text{--}0,2$ ;
- у неаерованому ґрунті –  $0,1\text{--}0,4$ .

Засоби захисту обирають виходячи з даних щодо траси прокладання трубопроводу і показника корозійної активності ґрунтів. На практиці використовують різні види ізоляційних покриттів: ґрунтовки, обгортання полімерною липкою стрічкою (один, два або три шари), мастика бітумно-гумова, бітумно-полімерна, обмотка зі скловолокна. Покриття

поширеного типу рекомендується застосовувати на магістральних трубопроводах діаметром 1 020 мм і більш. Вони є на всіх трубопроводах у засолених, болотистих і поливних ґрунтах.

Процес електрохімічної корозії будівельних металевих конструкцій можна попередити також шляхом пристроїв електрозахисту. Такий захист базується на керуванні струмами, що виникають у разі електрохімічної або електричної корозії металів. У цьому разі за допомогою додаткових джерел струмів компенсуються струми електрохімічних реакцій, а потенціал, за якого припиняється корозія, називається захисним, бо різниця потенціалів між катодом і анодом дорівнює нульовому значенню ( $E = 0$ ). Для цього використовують два способи: катодний і протекторний (анодний) захисти.

Схеми катодного і протекторного захистів металевих конструкцій наведено відповідно на рисунках 7.1 і 7.2.

Катодний захист обов'язково передбачає наявність спеціального джерела постійного струму. До негативного полюсу джерела струму підключається конструкція, яку треба захистити, і потенціал конструкції стає катодом щодо додаткового електроду, який буде руйнуватися, захищаючи підземну конструкцію. Як додатковий електрод (анод) застосовують старі металеві рейки, труби, пластини, які з часом замінюють у міру їх руйнування.

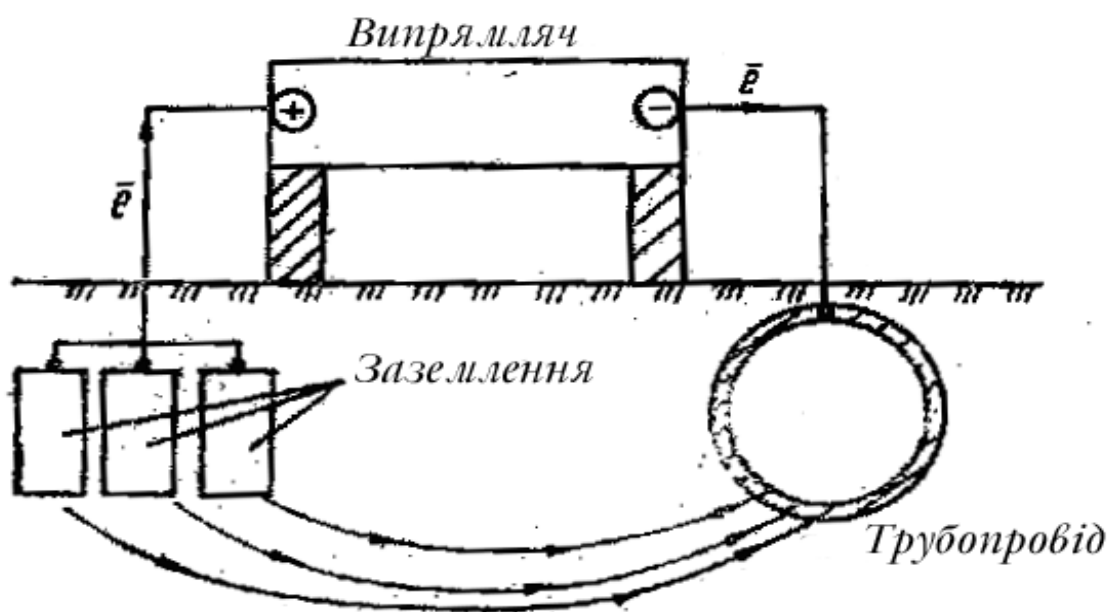


Рисунок 7.1 – Схема катодного захисту металевих конструкцій

Принцип протекторного захисту базується на тому, що електроди-протектори мають більш негативний потенціал і виконують у парі з конструкцією, яку захищають, роль анода. Протектор (3) виготовляють звичайно з цинку, алюмінію або магнієвого сплаву у вигляді пластин або циліндрів. З конструкцією, що захищають, протектор з'єднують ізольованим проводом.

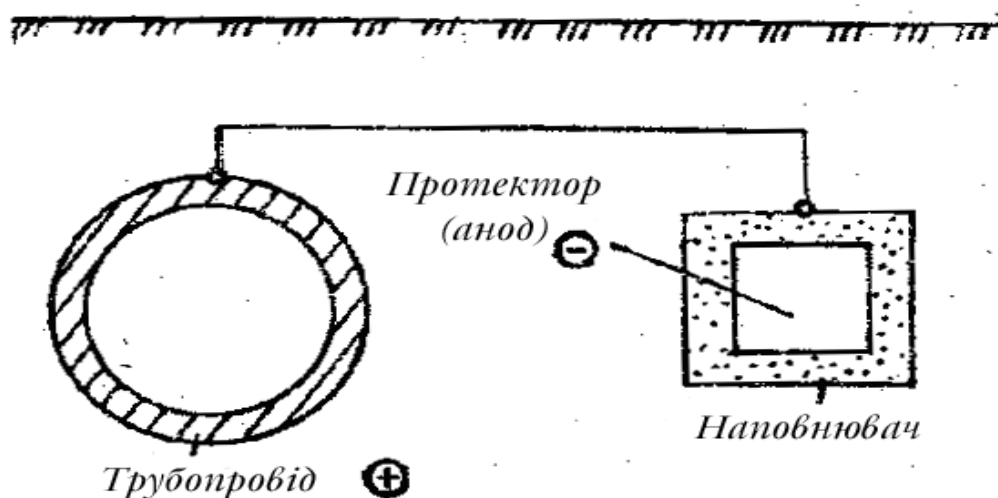


Рисунок 7.2 – Схема протекторного (анодного) захисту металевих конструкцій:

1 – сталева конструкція; 2 – електропровід; 3 – протектор; 4 – активатор

Значна частина металевих конструкцій експлуатується: у рідких середовищах, наприклад, гідротехнічні споруди й елементи їхніх конструкцій, причальні стінки морських і річкових портів, пальові підвалини морських нафтопромислів, водопроводи холодної та гарячої води, трубопроводи для транспортування річкової або морської води для технічних цілей, конструкції резервуарів для зберігання і переробки різних видів води тощо. Агресивність природних вод пов'язана з наявністю в них солей, що містять іони-активатори  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  і розчиненого  $\text{O}_2$ . Усі ці види вод є середньоагресивними стосовно сталі й алюмінію. Під час експлуатації конструкцій у морському середовищі виділяють такі зони: зона бризу, зона припливу, неповного і повного занурення конструкцій.

Корозія в зоні бризів належить до атмосферної корозії і була вже розглянута вище. Однак на практиці зустрічаються більш складні ситуації, коли конструкція працює одночасно в чотирьох різних зонах. Ділянки, розташовані на рівні води і вище, є катодами і не піддаються руйнуванню. Роль кисню в цьому випадку подвійна. З одного боку, він є деполяризатором катодної реакції (7.12):



З другого – кисень є пасиватором, що зрушує потенціал вуглецевих сталей і заліза до значень 0,5–1,0 В і гальмує анодний процес через утворення оксидної плівки (7.13):



Утворення карбонатних відкладень обумовлюється значенням рН, концентрацією кисню і бікарбонат-іонів та інтенсивністю перемішування. Вони сильно сповільнюють корозію.

У зонах повного занурення і бризів може спостерігатися щілинна корозія, що виникає в зазорах і щілинах унаслідок функціонування корозійних пар диференціальної аерації. У таких випадках аноди знаходяться всередині зазорів, а катодами є відкриті, добре аеровані ділянки металу поза щілиною. У таких умовах знайшли застосування алюмінієві сплави, термін їх служби у разі експлуатації у морській воді сягає 10 років.

Під час експлуатації сталі у прісних водах було встановлено, що м'які води більш агресивні щодо вуглецевої сталі, оскільки в жорсткій воді індекс насичення частіше є позитивним. Але якщо у воді концентрація хлоридів і сульфатів перевищує 50 мг/л, то корозія спостерігається навіть за позитивних індексах насичення. У річкових водах корозія вуглецевих сталей перебігає з кисневою деполяризацією і лімітується швидкістю дифузії кисню до поверхні металу. Поводження металів у річкових водах визначається: електричною провідністю, наявністю іонів активаторів ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), ступенем аерованості, карбонатною рівновагою і температурою. Температурний фактор теж впливає по-різному. Якщо в гарячій воді вміст розчиненої вуглекислоти зменшується і

індекс насичення (за температурою 60 °С) збільшується, то швидкість корозії в цілому зростає.

Виробничі й господарсько-побутові води, технологічні рідини й стічні води мають великий діапазон зміни складу і концентрації іонів, але механізм перебігу процесів корозії в цих водах відповідає вищерозглянутим схемам.

Способи захисту полягають у використанні корозієстійких металів і сплавів, захисних покриттів і електрохімічного захисту (катодного і протекторного). Для водопроводів як холодної, так і гарячої води ефективною є стабілізація складу води і зниження ступеня її агресивності.

Вуглецеві сталі звичайно застосовуються в морських і річкових водах. Стійкість нержавіючих сталей у зоні бризів досить висока. Для конструкцій повного занурення застосовують багат шарові покриття з бактерицидними добавками на основі хімічностійких лаків і емалей. Також ефективним є захист перхлорвініловими лаками.

У зонах змінного рівня рекомендується покриття з ґрунтовки і до шести шарів лаку або п'яти шарів лаку, емалі або ґрунтовки. У нафтогазовій і хімічній промисловості для протикорозійного захисту труб (особливо великого діаметра) та інших конструкцій застосовують напилювання порошковими полімерними матеріалами на основі у, полівінілхлориду, фторопластів, епоксидних смол.

Лакофарбові захисні матеріали I групи застосовують для захисту несучих конструкцій з вуглецевих або низьколегованих сталей навіть у неагресивних рідких середовищах. Несучі конструкції в слабкоагресивних середовищах захищають цинковими покриттями 60–100 мкм (при гарячому цинкуванні) і 120–180 мкм (при металізації), на які нанесені лакофарбові покриття I–III груп. У середньоагресивних – передбачається гаряче цинкування (60–100 мкм) або металізація (200–250 мкм) з наступним фарбуванням лакофарбовими матеріалами II–III груп і фарбуванням тільки лакофарбовими матеріалами II–IV груп.



Листову сталь і труби захищають цинковими покриттями, але м'які, кислі й лужні води руйнують цинкові покриття. Тому внутрішню поверхню резервуарів для природних вод захищають алюмінієвими покриттями. Найбільш надійним способом захисту металоконструкцій є використання легуючих добавок, таких як хром, нікель, мідь, ванадій, молібден та інші, що сприяють пасивації металу. Добавка 0,5 відсотка міді значно підвищує стійкість звичайних вуглецевих сталей шляхом утворення плівки з високими захисними властивостями. Стальні труби часто захищають плівками з інших металів. Це так зване катодне покриття, тобто покриття металом, який є більш електропозитивним щодо металу, який треба захистити.

За катодного покриття плівка захищає метал тільки механічно, а під час пошкодження відбувається прискорення процесу корозії основного металу, який є у цьому випадку анодом. Прикладом катодного покриття є покриття заліза оловом, луджене залізо та інше.

Анодне покриття є більш надійним, наприклад, оцинковане залізо. Щоб зменшити корозію внутрішньої поверхні труб, використовують різні інгібітори. Анодні інгібітори ( $\text{Na}_2\text{Cr}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{NaNO}_2$ ) зменшують площу анодних ділянок шляхом утворення захисних плівок і зниження швидкості переходу іонів двовалентного заліза в розчин. Катодні сповільнювачі (гексаметафосфат натрію, триполіфосфат натрію) утворюють нерозчинні сполуки на катодів й сповільнюють поляризацію кисню, його дифузію до поверхні і розряд іона водню.

Пасивний стан настає тоді, коли метал стає заполяризованим до такого значення потенціалу, за якого почне утворюватися оксид. Це зрушення потенціалу, що призводить до пасивності, у багатьох випадках досягається в присутності досить сильного окислювача, на чому і заснована дія пасиваторів-хроматів, нітратів та інше.

## 8 БІОЛОГІЧНА КОРОЗІЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ ЗАХИСТ

### 8.1 Біокорозія металів

Біоушкодження металів спостерігаються у виробів і конструкцій, що експлуатуються в електротехнічній, газовій, нафтовій галузях промисловості, морських, підземних і підводних спорудах. Шкода, що наноситься металам біологічною корозією, становить більше 70-ти відсотків. Біологічні руйнування металів поділяють на такі підвиди:

- пряме руйнування під впливом мікроорганізмів, в наслідок чого виникає хімічна корозія та електрохімічний процес;
- комплексне руйнування (вплив всіх факторів довкілля).

Найчастіше мікроорганізми використовують металовироби як середовище для їх харчування, і водночас мають місце продукти життєдіяльності (у вигляді лугів, мінеральних та органічних кислот, які й створюють агресивне середовище). Навіть у паливі можуть розвиватися деякі види грибків, які провокують біологічну корозію, наприклад, в алюмінієвих баках літаків.

Наносять велику шкоду також і тіонові мікробактерії, які за допомогою виділення кислоти значно підвищують кислотність ґрунту, прискорюючи процес корозії металів. Найнебезпечнішими для металів вважаються залізобактерії та сіркобактерії, які живуть у ґрунті. Ці мікроорганізми можуть пристосовуватися до різних умов зовнішнього середовища і швидко розмножуватися за температури від 5 °С до 40 °С.

Від біоушкоджень страждають трубопроводи та металовироби зі сталі, цинку та магнію. До стійкіших до цього виду корозії належать мідь, свинець та нікель.

## 8.2 Мікробіологічна корозія бетону

Наукові дослідження показали, що процес руйнування неметалевих будівельних матеріалів, таких як бетон, цегла, штукатурка, сухі будівельні суміші різного призначення, пов'язаний з дією на них мікроорганізмів. Водночас, як правило, пошкодження або руйнування викликано комплексним впливом мікроорганізмів, фізичної і хімічної корозії.

Мікробіологічна корозія цементних бетонів зустрічається в житлових і промислових будинках, транспортних і гідротехнічних спорудах, частіше уражаються елементи відстійників, градирень, колекторів, трубопроводів, опори комунікацій, підлоги підприємств харчової промисловості. Зовнішніми ознаками пошкодження мікроорганізмами мінеральних будівельних матеріалів є їх спучування, розтріскування, відколювання цілих фрагментів штукатурки або цегли, на підлозі і стінах проступають темні плями. Часто цим явищам сприяють кліматичні умови (висока вологість, перепади температур). Вважається, що середовище, яке контактує з бетоном і залізобетоном, буде небезпечним, коли рН дорівнює 7,2–7,6, а Eh нижче 0,1.

Як правило, будівля з бетону (або цегли) уражається грибами і бактеріями, цвілевими грибами і бактеріями на велику глибину (більше 5 мм). Крім зазначених видів біоуражень, існують і пошкодження паразитуючою рослинністю, наприклад водоростями. Ураження мікроорганізмами фасадних будівельних матеріалів і матеріалів для внутрішніх приміщень може вплинути на зниження санітарно-гігієнічної характеристики будинків.

Мікроорганізми створюють на поверхні конструкцій агресивне середовище з продуктів своєї життєдіяльності у вигляді кислот, кислих газів, сульфідів, аміаку та інших агресивних речовин. Широкі дослідження впливу бактерій на бетон установили, що найбільше руйнують цементний камінь і бетон дінитрифікуючі бактерії, що окислюють сірку, у результаті чого утворюється сірчана кислота. Значно знижують міцність бетону й анаеробні азотфіксуючі бактерії, які утворюють масляну кислоту, яка також є агресивною. У такому разі зменшуються сили зчеплення складових частин каменю

внаслідок утворення олеату кальцію і відбувається розкладання вапна та гідратних новоутворів під впливом іонів водню.

Найбільш небезпечними щодо бетону і залізобетону є тіонові нітрифікуючі, вуглеводоокислюючі й сульфатредуючі бактерії, а також гриби, що утворюють у результаті своєї життєдіяльності неорганічні й органічні кислоти. Небезпечні для бетону й уролітичні бактерії. Вони діють в основному на сечовину (що міститься в стічних водах), гідролізують її, виділяючи аміак і вугільну кислоту. Аміак може взаємодіяти в присутності вапна цементу із сульфатами води й утворювати легкорозчинну сіль.

Дуже агресивною є сірчаноокислотна біогенна корозія, механізм дії якої проявляється в тому, що летючі сполуки сірки перетворюються бактеріями через проміжну ступінь у вигляді елементарної сірки. Сірчана кислота виробляється бактеріями роду *Thiobacillus*. У свіжозамішаному бетоні, який має високолужне середовище, ці бактерії не заселяються, але в результаті карбонізації значення рН зменшується до 9 і нижче, а в такому середовищі швидко розвиваються не тільки ці бактерії, а і їх різновиди. У каналізаційних системах особливо піддаються корозії ділянки з високою концентрацією летючих сполук сірки.

Біогенна сірчаноокислотна корозія залежить як від потоку стічних вод, так і від пори року. У місцях завихрень потоку стічних вод завжди вивільняється більше летючих сполук сірки. У літні місяці їх концентрація ще підвищується через більш високі температури. Споживання населенням білків, використання сульфатовмісних миючих засобів і частково більш високі температури стічних вод (наприклад, унаслідок зливу в каналізацію гарячої води з пральних або посудомийних машин) також створює сприятливі умови для мікроорганізмів, які беруть участь у біогенній сірчаноокислій корозії [12].

Утворення летючих сполук сірки здійснюється бактеріями в анаеробних умовах (без кисню) із сульфатів у стічних водах за такою реакцією (8.1):



Але навіть незначні сліди кисню можуть загальмувати діяльність цих бактерій. Методи боротьби з біогенною сірчаною корозією можна розділити на пасивні й активні.

Метою активних заходів є мінімізація умов, що сприяють біогенному утворенню сірчаної кислоти. Це досягається за допомогою спеціального конструювання каналізаційної мережі і відповідних умов експлуатації, а саме: достатній ухил каналізаційного трубопроводу; запобігання застою стічних вод або турбулентності і завихрень потоку; вентилявання шахт; очищення і промивання каналізаційних систем; видалення осаду за допомогою механічного чищення; по можливості підтримка температури стічних вод на рівні нижче 20 °С.

Пасивні методи захисту спрямовані на захист бетону від дії сірчаної кислоти: нанесення покриттів і шпаклівок на синтетичній основі; обшивання синтетичними плівками і плитами, а також захисними керамічними елементами. Ефективним методом захисту також є нанесення синтетичних смол, але цей спосіб дорогий і виконується в декілька етапів, а саме: очищують поверхню пісковим струменем, нагрівають основу до +20 °С і наносять смолу в кілька шарів товщиною до 3 мм.

Одним з видів споруд, які через їх особливості сильно піддаються мікробіологічним впливам, є градирні. У них утворюється пароповітряна суміш, що відводить теплову енергію, водночас внутрішні стінки вежі рівномірно нагріваються приблизно до 30 °С. Упродовж більшої частини року пара має відносну вологість повітря 95 відсотків і великих коливань температури не відбувається. Отже, тут створюються сприятливі умови для життя і розмноження бактерій.

На бетонних поверхнях охолоджувальних веж за рН = 5–6 існують бактерії, що біологічним способом утворюють неорганічні кислоти, такі як азотну і сірчану, що й обумовлює пошкодження бетону у вигляді відшаровування піску і відколювання цілих фрагментів бетону.

У такому разі найбільш дієвим способом боротьби з біокорозією є обробка експлуатаційних середовищ бактерицидами – водним розчином мідного купоросу (0,1–0,3 мг/л) і хлором (0,4–0,5 мг/л). Ефективним є облицювання конструкцій кислотостійкими плиткою або цеглою.

На підприємствах харчової промисловості біокорозія розвивається в наслідок прискореного розмноження грибів і бактерій під час виробництва харчової олії, м'ясопродуктів, пива, вина, безалкогольних напоїв, мальтозо-паточної і кондитерської продукції, дріжджів тощо.

На підприємствах харчової промисловості у результаті біокорозії штукатурка стін і стелі покривається тріщинами глибиною до 5 см, темними плямами і чорним нальотом, який змивається тільки водою під тиском, що ще більш інтенсифікує руйнування цементного бетону, викликаючи вилуговування з нього вільного вапна. Відбувається руйнування не тільки підлоги і стін, але й фундаментів, нижньої частини колон, теплоізоляції варильних котлів, труб. Руйнування будівельних бетонних конструкцій відбувається дуже швидко.

Стічні води цих виробництв, що містять кальциновану соду, хлорне вапно, які використовують під час миття посуду і підлоги, також сприяють руйнуванню цементних бетонів. Вода внаслідок дифузії проникає в глибину бетону, насичується вапном і з часом вимиває його з бетону у вигляді гідроксиду кальцію. У результаті один з елементів кристалічного зростка, що забезпечує високу міцність цементного каменю, руйнується. Тому цементні бетони не придатні для влаштування підлоги на цих виробництвах, тому що корозія призводить до частих ремонтів, простоїв виробництва, погіршення санітарного стану.

Дослідження довели, що застосування процесу кремнефторизації значно сповільнює, але не припиняє корозію цементного бетону під час його контакту з тваринними жирами. Магnezіальні цементи не стійкі в агресивному середовищі жирів і не можуть використовуватися у виробничих приміщеннях. Не можна застосовувати сірчаний цемент у бетонах для покриття підлоги, тому

що під впливом нагрітого жиру відбувається її руйнування. Тому слід приділяти особливу увагу вибору видів бетону й антисептиків [12].

Існують бетони, які стійкі до органічних агресивних середовищ, наприклад, пластбетон на основі фурфурол-ацетонового мономера (мономер ФА), але він виділяє в повітря фурфурол і ацетон. Санітарно-хімічні й токсикологічні дослідження показали, що пластбетон на основі мономера ФА можна рекомендувати як матеріал для будівельних конструкцій на підприємствах харчової промисловості. Його також застосовують у легкій, хімічній і медичній галузях промисловості. З метою застосування світлих і кольорових пластбетонів, хімічно стійких у разі контакту з органічними речовинами, використовують термопластичну епоксидну смолу ЕД-6.

Використання в конструкціях епоксидних пластбетонів, що мають підвищену корозійну стійкість, які особливо рекомендують для влаштування підлог. Найбільш ефективним захистом ємностей у цьому випадку служать плівкові покриття, що складаються з епоксидної смоли, тальку, поліетиленполіаміну й етилового спирту.

Для антисептування харчових об'єктів застосовують дезінфікуючі розчини, наприклад, вітчизняний антисептик «Катмін Б» і спеціальні покриття з додаванням біоцидних препаратів, ефективних для боротьби з небажаними бактеріями. Також застосовують дезінфікуючий засіб «Септабік» (ізраїльського виробництва), який не містить хлору, альдегідів, фенолів і належить до третього класу помірковано небезпечних сполук без подальших наслідків. Цей засіб призначений для медичної дезінфекції у разі інфекцій бактеріальної, вірусної і грибової етіології в установах різного призначення, у тому числі для дезінфекції поверхонь і устаткування в харчовій промисловості.

Для дезінфекції і стерилізації в харчовій промисловості застосовують розчини препаратів «Біопаг» і «Фосфопаг», що є універсальними дезінфікуючими засобами нового покоління. Вони мають антимікробну дію стосовно багатьох мікроорганізмів: бактерій, анаеробної інфекції тощо.

Для житлових і промислових будівель нехарчового призначення під час реконструкції, реставрації і ремонті, особливо вологих підвальних приміщень, цоколів будинків і вологих приміщень найкраще використовувати «Картоцид-компаунд» різних марок, але після попереднього висушування поверхні.

Однією з серйозних причин руйнування мінеральних матеріалів у вигляді штукатурки, бетону, природного каменю, цегли є їх гідрофільність. Замерзання води в порах матеріалу викликає його руйнування, а заселення пор грибами і водоростями призводить до біокорозії. Для вирішення цієї проблеми існує спосіб гідрофобізації. Сучасні гідрофобізатори – це матеріали на основі кремнійорганічних сполук, таких як Аквастоп –А, Тіпром ОФ, Тіпром К.

Наприклад, препарати Тіпром ОФ і Тіпром К є екологічно чистими, не містять розчинників і розводяться водою. Вони добре проникають у матеріал і створюють глибокий водовідштовхувальний шар, мають великий термін служби – 10 років. Після обробки цими препаратами морозостійкість матеріалу збільшується в кілька разів, а міцність зростає на 24–26 відсотків. Якщо до його складу доданий антисептик, він набуває фунгіцидного ефекту і на обробленій поверхні грибні колонії вже не з'являться.

Додатковими заходами боротьби є підтримка в приміщенні відповідних температури і вологості повітря.

Для гідроізоляції конструкцій і споруд використовують гідроізоляційні матеріали, які умовно можна розділити на дві групи: традиційні та матеріали проникаючої дії.

Традиційні матеріали при всіх їх позитивних якостях мають ряд істотних недоліків. Вони створюють щільну, міцну захисну плівку, але працюють окремо від матеріалу самої конструкції, через несумісність їх реологічних деформативних властивостей, що призводить до їх відшарування з наступною втратою захисних функцій.

Більш перспективними є матеріали проникаючої дії, застосування яких значно підвищує експлуатаційні характеристики, наприклад, бетону. Принцип



їх дії полягає в проникненні під впливом осмотичного тиску хімічно активних речовин у капілярно-пористу структуру бетону, де вони взаємодіють зі складовими цементного каменю. Наслідком є ущільнення структури бетону, перекривається доступ воді, але не повітрю. Глибина проникнення такого герметика в бетон може досягати 100 мм і більше (суцільним фронтом) залежно від щільності основи. До таких матеріалів належать суміші «Віатрон», «Гідротекс», «Пенетрон», гнучка цементна мембрана «Фенікс» та інші. Кожна марка має свою зону застосування. Ці препарати не токсичні і вирішують цілу низку завдань, а саме: гідроізоляційний захист конструкцій, антибактеріальна санація, теплоізоляція будинків і споруд.

### **8.3 Біокорозія полімерів і лакофарбових матеріалів**

*Біокорозія полімерних матеріалів.* В останні роки в промисловості та будівництві досить широко впроваджуються синтетичні полімерні матеріали. Раніше вважалося, що пластики не піддаються дії біокорозії, але такі випадки спостерігаються досить часто. Результати досліджень показали, що схильні до руйнування мікроорганізмами не тільки самі по собі пластмаси, а і їх складові компоненти, такі як стабілізатори, пластифікатори, барвники, наповнювачі, що робить полімерні матеріали більш уразливими для мікроорганізмів, змінюючи їх забарвлення, викликаючи втрату еластичності й зниження міцності.

Є припущення, що для мікроорганізмів пластифікатори і стабілізатори служать живильним середовищем, тому що до їх складу входять ефіри жирних кислот. Встановлено, що гриби уражають полімери типу поліетилену, полівінілхлориду, полістиролу, витягаючи з їх молекул вуглець. У процесі впливу на матеріал гриби, виділяючи ензими, руйнують довгі ланцюги молекул, розчленяють їх на більш короткі фрагменти, після чого вони стають доступні грибам.

Після ураження матеріалу грибами настає його повна деструкція, причому гриби створюють сприятливі умови і для розмноження бактерій, під впливом яких відбувається руйнування поверхні полімеру.

Для надання полімерним матеріалам стійкості до мікробіологічної корозії у ряді випадків можна обмежитися регулюванням температурного режиму. Але більш надійним способом є введення антисептика ще на стадії виготовлення полімерного матеріалу.

До матеріалів, що потребують захисту від біокорозії, належать також герметики. На поверхні прозорих або білих герметиків під впливом цвілевих грибів утворюються плями і нальоти від коричневого до чорного кольору, що негативно позначається на зовнішньому вигляді споруди. У різних країнах проводяться дослідження з розробки конструктивних і хімічних способів захисту герметизуючих матеріалів від ураження цвілевими грибами, особливо матеріалів на основі кремнійорганічних сполук. На основі цих досліджень вироблені певні рекомендації щодо захисту герметизувальних полімерних матеріалів:

- обов'язкове додавання антисептиків до їх складу;
- не допускати постійного зволоження герметика;
- герметик треба обробляти чистою водою (без миючого засобу);
- поверхня герметика має бути чистою і періодично дезинфікована.

*Біокорозія лакофарбових матеріалів.* Вплив біокорозії зазнають також багато видів лакофарбових матеріалів. Можуть уражатися мікроорганізмами емульсійні фарби і такі, що містять лляну олію, на основі алкідних смол, поліуретанів та інше. Так, цвілеві гриби зазвичай утворюються на зволжених пофарбованих поверхнях стін, стель, віконних блоків, водночас з'являються чорні й коричневі плями, відбувається відшарування фарби. Ураження може бути прямим і непрямим. Установлено, що гриби синьої гнилі можуть уражати лакофарбову плівку, розвиваючись не на поверхні, а під нею.

Попередити біологічні ураження лакофарбових матеріалів, без погіршення їхніх експлуатаційних характеристик, можна доданням до їх складу фунгіцидів, наприклад, «Картоциду».

Сучасним засобом є використання в лакофарбовій продукції та сухих будівельних сумішах наночастинок срібла.

## 8.4 Біокорозія деревин та її захист

Одним з важливих завдань під час використання об'єктів, виконаних з деревини і деревних матеріалів, є підвищення терміну їх служби. Відомо, що для заготівлі 20 млн. м<sup>3</sup> деревини, що йде на протигнільні ремонтні роботи, щорічно невинувато вирубуються приблизно 300 тис. га лісу. Деревина як будівельний матеріал крім своїх позитивних властивостей має ряд недоліків, пов'язаних із впливом біологічних агентів. Деревина як субстрат є живильною речовиною і місцем існування мікроорганізмів, грибів, цвілі і комах, що селяться в ній.

Вологість і застій повітря сприяють розвитку біокорозії деревини. Під час огляду конструкцій необхідно звертати увагу на характерні ознаки ураження деревини, а саме: наявність мокрих плям і цвілі; прогини і хиткість дерев'яних конструкцій; специфічний грибний запах у закритих приміщеннях; зміна кольору деревини, її руйнування, глухий звук під час удару. За наявності хоча б однієї з цих ознак треба ще ретельніше обстежити конструкції з їх розкриттям.

Існує багато видів грибів, які руйнують деревину: гриби цвілі; гриби синяви; гриби гнилі; гриби помірної гнилизни. Вони розрізняються між собою за формою, будовою і забарвленням грибниці, шнурів, плодових тіл і спор, а також за швидкістю і ступенем руйнування деревини. Основними елементами живлення грибів є вуглець, азот, фосфор, залізо, кальцій і магній, джерелом енергії служить глюкоза. Здатність цвілевих грибів уражати таке широке коло матеріалів пояснюється наявністю в них великого набору ферментів, склад яких може змінюватися залежно від джерела живлення. Фумарова, глюконова, щавлева, бурштинова та інші кислоти, що є проміжними продуктами цього процесу, викликають корозію органічних матеріалів – роз'їдання, зниження маси, зміна забарвлення, втрата міцності. Крім цього ураження деревини цвіллю робить її гігроскопічною, що сприяє виникненню гнилизни. Швидкість росту грибів гнилі залежить від вологості, температури і провітрювання приміщення.

Усі ці пошкодження супроводжуються зміною кольору деревини залежно від характеру зараження і поширення в ній грибів. Розрізняють поверхневе і глибоке забарвлення і два види ураження – підшарову і підкладкову синяву.

Часто ураження деревини має комплексний характер. Будь-яке біологічне пошкодження створює сприятливі умови для виникнення інших видів уражень. Наприклад, свіжозрубаний ліс піддається нападу комах, таких як жук-вусань і терміти. Термітами уражається необроблений антисептиками або іншими захисними засобами сухий лісоматеріал, причому терміти сильніше всього уражають вже уражену грибами деревину. Серед шкідників мертвої деревини в будівлях особливо поширені точильники, вусані й слоники деревогризи. За силою руйнування деревини вони не поступаються грибам, але мають осередковий характер.

Основними методами захисту дерев'яних конструкцій від біопшкоджень є проведення конструктивних заходів і застосування хімічних методів захисту.

Конструктивні заходи розробляють на стадії проектування, ремонту або реконструкції будинків різного функціонального призначення разом із прийнятими при цьому архітектурно-планувальними і конструктивними рішеннями. Основним їх завданням є виключення можливості зволоження дерев'яних конструкцій у період експлуатації будинків. Дуже небезпечним джерелом зволоження є конденсація вологи. Розрізняють конденсацію безперервну і пульсуючу. Сконденсована волога може випадати як на поверхні, так і в товщі матеріалів. Конденсація відбувається протягом усього часу, поки температура матеріалу залишається нижче температури точки роси повітря, що омиває матеріал.

У разі застосування паропроникних матеріалів у зовнішніх стінах будинків з опаленням виникає систематичний дифузійний рух водяної пари, спрямований у бік меншого парціального тиску. А кращим рішенням конструкції дахів є влаштування повітряного прошарку під покрівельним матеріалом. Таким шляхом можна досягти висихання матеріалу.

Для запобігання загниванню дощок підлоги або плитних матеріалів, що укладаються на ґрунт або на піщану подушку, треба провітрювати підпілля, застосовувати сухі матеріали основи або влаштовувати суцільний пароізолюючий шар. У дощатих перекриттях слід влаштовувати продухи, а кінці балок, що вставляються в гнізда, обмазувати або обертати гідроізоляційними матеріалами й укладати із зазором не менше 3 см між стінкою гнізда і торцем.

У горищних перекриттях, щоб уникнути конденсату на конструкціях, які несуть навантаження, необхідно, щоб тепле повітря з приміщень не проникало через перекриття.

Хімічний захист деревини від біокорозії передбачає застосування антисептиків. Антисептики мають відповідати таким вимогам: безпечність для людей; ефективність дії проти всіх різновидів мікроорганізмів, на які вони спрямовані; економічність; хімічна стабільність; не проявляти активність щодо фізичних і хімічних властивостей матеріалу; не погіршувати інші показники якості виробів. Крім того, антисептики мусять мати специфічні властивості: не впливати на обробку матеріалу; не підвищувати його горючість; добре проникати в деревину, щоб забезпечити захист на якомога більшу глибину; добре розчинятися у воді або в доступних легких органічних розчинниках; не надавати запаху деревині після її обробки. Хімічні речовини, які використовують для знищення тих чи інших видів шкідливих організмів, називаються пестицидами. Вибір антисептика і спосіб його застосування залежать від призначення та умов його використання. Самим перспективним препаратом для боротьби з біокорозією є серія препаратів «Картоцид-компаунд».

Для захисту деревини від інших видів корозії існує також комплексний підхід. Природно, що захищена від вологи деревина не піддається і біокорозії. Для захисту від набрякання деревину просочують гідрофобними речовинами або покривають поверхню водостійкими фарбами і лаками. Але така обробка повністю не усуває сорбційного зволоження. Щоб повніше захистити деревину

від набрякання, її просочують петролатумом, розплавом сірки, кремнійорганічними полімерами, гідрофобними антисептиками, поліетиленгліколем. Просочену деревину застосовують для опор, стояків, щитів опалубки.

Вибір лакофарбових покриттів для захисту деревини досить широкий – від олійних фарб і оліф до синтетичних емалей холодного і гарячого сушіння. Але всі емалі й лаки треба антисептувати. Для прозорої обробки і водозахисту застосовують перхлорвініловий лак та покриття на основі алкідних і вінілових полімерів, а також хлорованого каучуку. Гарні захисні властивості мають фарби й емалі, наповнені алюмінієвою пудрою, яка не перешкоджає волого- і повітрообміну деревини, а вироби стають важко займистими.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Защита строительных конструкций от коррозии : СНиП 2.03.11-85: " (утв. Постановлением Госстроя СССР от 30.08.1985 г. N 137) (ред. от 05.08.1996). – М. : Госстрой СССР, 1996. – 56 с.
2. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты : монография / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гузеев. – М. : Стройиздат, 1980. – 536 с.
3. Фокин Г. С. Справочник строителя. Современные строительные материалы / Г. С. Фокин, Е. В. Кондращенко. – Харків : Алев инфотрейд, 2008. – 425 с.
4. Штарк И. Долговечность бетона : пер. с нем. А. Тулганова ; под ред. П. Кривенко / И. Штарк, В. Бернд. – Київ : Оранта, 2004. – 295 с.
5. Дорофеев В. С. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций : монография / В. С. Дорофеев, В. Н. Выровой. – Одесса : Місто майстрів, 1998. – 165 с.
6. Бабушкин В. И. Защита строительных конструкций от коррозии, старения и износа : монография / В. И. Бабушкин. – Харьков : Вища школа, 1989. – 167 с.
7. Бабушкин В. И. Диаграмма состояния системы  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  / В. И. Бабушкин, А. С. Коломацкий, В. П. Ряполов. – ЖПХ. – 1990. – Т. 63, № 6. – С. 1225–1230.
8. Чернявский В. Л. Адаптация бетона : монографія / В. Л. Чернявский. – Днепропетровск : Нова ідеологія, 2002. – 115 с.
9. Тодт Ф. Коррозия і захист від корозії (коррозія металів і сплавів, методи захисту від корозії) : пер. з нім. / Ф. Тодт. – Київ : Хімія, 1966. – 848 с.
10. Петров Л. Н. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов / Л. Н. Петров ; АН Украины. Физ.-мех. ин-т. – Київ : Наук. думка, 1991. – 215с.

11. Новицкий В. С. Коррозионный контроль технологического оборудования : монография / В. С. Новицкий, Л. М. Писчик. – Київ : Наукова Думка, 2001. – 171 с.

12. Антисептик для бетону від цвілі – види і обробка поверхні [Електрон. ресурс]. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <http://stroyka-gid.com.ua/enziklopedia-znan/11159-antiseptik-dla-betony.html>, вільний (дата звернення: 05.05.2023). – Назва з екрана.



## ДОДАТОК А

### Теми для самостійної роботи студентів

1. Вимоги до будівельних матеріалів для забезпечення їх довговічності.
2. Класифікація руйнівних факторів будівельних матеріалів і конструкцій.
3. Характеристика бетону і залізобетону як об'єкта корозії.
4. Корозійна стійкість залізобетонних конструкцій в агресивному промисловому середовищі.
5. Різновиди фізичної корозії будівельних матеріалів.
6. Характеристика природних і промислових рідких агресивних середовищ відносно бетонних конструкцій.
7. Характеристика твердих агресивних середовищ відносно бетонних і металевих конструкцій.
8. Корозія і захист арматури в залізобетонних конструкціях.
9. Атмосферна корозія у промислово-цивільному будівництві.
10. Механізм перебігу хімічної корозії бетону і залізобетону.
11. Принцип дії інгібіторів для захисту металів від корозії.
12. Класифікація видів хімічної корозії бетону і механізм її перебігу.
13. Магnezіальна корозія бетону і способи захисту від неї.
14. Електрохімічна корозія арматури в залізобетонних конструкціях та захист від неї.
15. Електрокорозія бетону та залізобетону від дії блукаючих струмів.  
Методи захисту.
16. Корозія залізобетонних конструкцій у нафтохімічній промисловості.
17. Корозія і захист арматури залізобетонних трубопроводів.
18. Заходи забезпечення довговічності залізобетонних конструкцій.
19. Проектування захисту металевих будівельних конструкцій від корозії.
20. Способи антикорозійного захисту металевих конструкцій.
21. Діагностика ушкоджень і методи відновлення експлуатаційних властивостей будівельних матеріалів і конструкцій.

22. Способи боротьби з біокорозією конструкцій з деревини.
23. Гідрофобізація – засіб захисту від біокорозії.
24. Захист конструкцій від біоушкодження в харчовій промисловості.
25. Корозія полімерних та гумових будівельних матеріалів і виробів.
26. Різновиди біоушкоджень промислової продукції будівельного

призначення.

27. Аналіз дії протикорозійних покриттів у будівництві.

28. Класифікація і властивості лакофарбових покриттів антикорозійного

призначення.

29. Механізм дії біогенних видів корозії.

30. Захисна дія антикорозійних ґрунтовок.

*Електронне навчальне видання*

**КОНДРАЩЕНКО** Олена Володимирівна

**КОРОЗІЯ І ЗАХИСТ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА  
КОНСТРУКЦІЙ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для здобувачів першого (бакалаврського) і другого (магістерського) рівнів  
вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності  
192 – Будівництво та цивільна інженерія)*

Відповідальний за випуск *А. А. Жигло*  
За авторською редакцією  
Комп'ютерне верстання *О. В. Кондращенко*

План 2023, поз. 6Л

---

Підп. до друку 12.05.2023. Формат 60 × 84/16.  
Ум. друк. арк. 5,3

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002  
Електронна адреса: office@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017.