

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра будівництва та професійної освіти

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

на тему: **«Дослідження корозії арматури ЗБК з
використанням фізико – математичної моделі»**

КРМ.192 БЦмд_21 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
«Технології будівельних конструкцій,
виробів і матеріалів» спеціальності 192
«Будівництво та цивільна інженерія»
ступеня вищої освіти магістр групи
192БЦмд_21

Бублика Олександра Васильовича

Керівник: Бондар Л.В.

Полтава 2024 року

Вступ

У наш час залізобетонні конструкції є одним із найважливіших матеріалів у будівництві. Спільна робота бетону та арматури забезпечують високу міцність залізобетону. Але з часом у конструкції починається процес корозії арматури і це є проблемою особливої ваги, оскільки вона впливає на міцність залізобетону.

Об'єкти будівельних конструкцій будівель і споруд, що піддаються дії агресивного середовища, продовжують зростати.

Значні запаси міцності перших залізобетонних споруд не дозволяють протягом довгого часу звернути увагу на явище корозії арматури.

Зменшення запасів міцності в результаті удосконалення методів розрахунку, економії цементу, зменшення перерізів, використання залізобетонних конструкцій у виробничих будівлях із агресивним середовищем все це призвело до того збільшення випадків уражень залізобетонних конструкцій в результаті виникнення і розвитку процесів корозії арматури.

З кожним роком спостерігається тенденція до збільшення ступеня агресивної дії на залізобетонні конструкції будівель і споруд. Пов'язують це із інтенсифікацією виробництва, зменшенням міцності будівельних конструкцій під дією агресивних середовищ, широким використанням в будівництві конструкцій, які мають низьку корозійну стійкість.

Виходячи з даних умов, часто виникає необхідність визначити наскільки уражена арматура в конструкції, чи може уражена конструкція експлуатуватися із заданою надійністю та ін.

В даний час довговічність залізобетонних конструкцій пов'язують з втраченою бетоном захисною шкостей чи кінетиною корозійних процесів залізобетону в бетонів, але освіта експлуатації залізобетонних конструкцій із

враженою арматурою вказує, що збереження часу розвитку корозії арматури може ще відтягнути строки виходу залізобетону із ладу.

Бетон, який має неоднорідну структуру, є провідником другого роду, тому процес корозії арматури в ньому можливо розглядати із позицій загальної електрохімічної корозії металів в електролітах. Однак бетон, як корозійне середовище, має деякі особливості. Неоднорідність будови бетону, неоднорідність будови бетону, неоднорідність діючого середовища викликає електрохімічну гетерогенність поверхні арматури.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Стан науки про корозію арматури в бетоні.

Огляд сучасних уявлень про корозію арматури показує, що корозія арматури в бетоні ще мало вивчена. Складність вивчення обумовлена значним чином одночасно діючими факторами. Основна увага в питанні корозії арматури приділяється вивченню умов, коли бетон втрачає свої захисні якості. Так як нормативними документами не передбачалася експлуатація конструкцій з пошкодженою арматурою, то роль захисного шару бетону у розвитку корозійних процесів арматури не приділялося уваги, хоча він заперечується, тим що оцінка процесів арматури в основному може бути охарактеризована транспортною здатністю (проникністю) бетону.

Відсутність чіткого модельного уявлення про розвиток корозії арматури в бетоні призвело до необхідності використання показників, характерних для металевих конструкцій - ваговий показник корозії, усереднений глибинний, які не відображають втрати робочих властивостей залізобетонної конструкції.

Механізм корозії арматури в бетоні представлений поверхневим її руйнуванням. Але він не відображає формування такого стану поверхні арматури, яке визначає її подальшу поведінку, в тому числі і послідовне руйнування конструкції.

Аналізуючи наведені математичні моделі корозійного процесу металу, можна відзначити, що при їх побудові розробники ідуть двома шляхами. Перший полягає в обліку численних зовнішніх впливів, що викликають корозію металу, і виявленні ступеня впливу кожного фактора на процес корозії.

Другий шлях полягає в розробці математичної моделі корозійного процесу у вигляді функціонального або диференціального рівняння, що можливість більш точно апроксимуючу реальну кінетику корозійного пошкодження.

Визначені моделі носять наближений характер і мають властивий ряд недоліків якісного характеру: наприклад, наявність горизонтальної асимптоти

(встановлене, граничне значення глибини корозії) у дрібно-лінійних і експозиційних моделях, наявність вертикальної дотичної при нулі (нескінченно велика швидкість корозії в початковий момент) або необмеженого росту у степеневих моделях та ін. Іншими словами, зазначені моделі неадекватно описують процес корозії на досить великому інтервалі часу.

Механізми взаємодії арматури з агресивним середовищем вельми різноманітні і мають різну природу. Велике число факторів, які впливають на протікання корозійного руйнування, досить складні фізико-хімічні процеси, пов'язані з механізмом цього явища, не дозволяють прямо застосовувати математичні моделі, які більш глибоко опрацьовані для металевих конструкцій.

Крім того небезпека розвитку корозії не однакова для різних видів арматурної сталі. Тонка арматура з високоміцного вуглецевого дроту в порівнянних умовах більш схильна до небезпечки корозії, ніж стрижнева зі звичайної сталі. Це пояснюється тим, що при однаковій глибині корозійних поразок відносна втрата площі перетину в першому випадку буде більше ніж у другому.

Попередньо напружені конструкції мають також підвищену небезпеку впливу корозії арматури.

В даний час практично відсутні, доведені до кількісних залежностей методи оцінки процесів вже експлуатуються конструкцій в умовах агресивних впливів на них.

Тим часом, відомості про наявність ресурсів роботи залізобетонної конструкції необхідні для прийняття рішень про шляхи забезпечення заданого періоду нормальної експлуатації будівельних конструкцій, особливо тих, які залишаються для подальшого використання при проведенні будівельної реконструкції.

Аналізуючи моделі корозії арматури в бетоні можна бачити, що їх розробники, спираючись на результати спеціальних експериментів, які не вдалися до складу фізико-хімічних процесів взаємодії метала з середовищем,

йшли шляхом створення часткових моделей, які мають обмежене використання в практиці.

Загальним недоліком таких моделей корозії арматури є те, що стан поверхні арматури не пов'язується з гетерогенністю будови бетонного покриття, яке більшою мірою може служити однозначною характеристикою стану сталі в бетоні.

Експлуатаційні якості конструкцій з плином часу, як правило, погіршуються. Прагездатний час-ресурс конструкції визначається умовами експлуатації і режимом навантаження. З плином часу в конкретній конструкції накопичуються пошкодження, і вона може вийти з ладу з різних причин - по витривалості, розвитку залишкових деформацій і прогинів, корозії арматури, бетону і т.д. Виходячи з реальних умов роботи конструкції під навантаженнями і її поведінки в експлуатації, важливу роль набуває розрахунки будівельних і конструкцій на стадії експлуатації. Такі розрахунки повинні контролювати не тільки експлуатаційний стан, але і описувати деструктивні процеси, які приводять до відмови конструкції.

На сучасному етапі розвитку залізобетону критичний стан при розрахунку залізобетонних конструкцій приймається з урахуванням повної карбонізації захисного шару бетону або порушення пасивності арматури [1], які далеко не вичерпують ресурс роботи конструкцій.

Дослідженням є питання про допустимий ступінь корозії арматури, безпечної для експлуатації конструкцій. Великий досвід експлуатації конструкцій з пошкодженою арматурою показує, що врахування механізму розвитку її корозії може збільшити довговічність конструкції. Правда, це більшою мірою відноситься до конструкцій з напруженою арматурою.

Основним напрямком в області вивчення корозії залізобетонних конструкцій є дослідження умов появи і розвитку корозії арматури в бетоні. Перші фундаментальні дослідження, пов'язані з вивченням корозійного стану залізобетону виконані В.М. Мощанским, Б.Г. Скрамтаєвим. Основоположні

дослідження по корозії арматури в бетоні проводились С.Г. Алексеевим, В.А. Артамоновим, В.Г. Батраковим, В.Б. Гатиновим та ін.

Своїми дослідженнями В.П. Шевяков заповнює відсутні відомості, зв'язані з практичною оцінкою корозійної небезпеки рідких, твердих і газоподібних середовищ, що діють в будівлях хімічної промисловості. Потреба в конструктивних рішеннях будівель і споруд, технологічні процеси в яких характеризується агресивними виділеннями, викладені в ряді літературних джерел.

С.В. Шестоперов, Л.А. Вандатовська досліджувала процеси корозії залізобетонних конструкцій прядильних цехів віскозного виробництва. Вивчення умов протікання корозійних процесів на поверхні арматури в бетоні займались В.І. Бабушкін, М.П. Мокрицька, О.П. Мещеров - Петросян.

В.С. Артамонов розглянув основні фактори, що визначають стійкість залізобетонних конструкцій і їх корозія, особливо, вплив арматурної сталі, виду цементу і добавок до нього, ширини розкриття тріщин та ін.

Експериментальні дослідження по корозії залізобетонних конструкцій [2], гідротехнічних споруд проведені Б.В. Кіндом.

Вивчення питань довговічності будівель і споруд чорної металургії займались І.Н. Заславський, Б.Л. Флакс, В.Л. Чернявський. Питання корозії арматури залізобетонних конструкцій досить детально розглянуті в роботах Н.К. Розенталя, С.Н. Алексеевим, А.М. Підвальним, та ін. вивчений корозійний знос металічних гнучких зв'язків в трьохшарових панелях під впливом вологого утеплювача.

Г.В. Любарська розглянула питання дифузії кислот через бетон. Механізм корозії сталевих арматур в бетоні з тріщинами висвітлений в статтях С.А. Алексеева, Е.М. Москвіна, В.І. Новгородського.

Однією з найважливіших характеристик бетону являється його проникність для повітряно-вологого середовища, в результаті чого розвиваються

корозійні процеси на арматурі. Бетон карбонізується, накопичує вологу, агресивні речовини та ін [3],

Впливу повітряно-вологого середовища піддається більшість залізобетонних конструкцій. Для конструкцій, що стикаються з повітрям, карбонізація є найбільш загальним процесом, який веде до втрати бетоном захисних властивостей по відношенню до арматури. Корозійні втрати сталі в бетоні, який не виступає пасивними діями досягають 100г/м^2 на рік.

Процес карбонізації полягає в тому, що вуглекислий газ повітря, проникаючи в бетон, розчиняється в шаровій рідині і реагує з гідратом окису кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, утворюючи слабкорозчинний карбонат кальцію. Процес продовжується до повної витрати $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Фронт карбонізації поступово переміщується в глибину бетону [4],

Як показують дослідження, глибина карбонізації може бути розрахована по формулі:

$$x = \sqrt{\frac{2D' C_0 t}{m_0}},$$

де t – час; D' – ефективний коефіцієнт дифузії вуглекислого газу в карбонізованому шарі бетону; C_0 – концентрація CO_2 в атмосфері; m_0 – кількість CO_2 , що поглинається одиницею об'єму бетону при повній карбонізації.

Максимальна швидкість проникнення вуглекислого газу (об'ємний склад в повітрі 0,04-0,4%) досягається при вологості повітря 50-70%.

Вивченням питань карбонізації бетону займалися С.Н. Алексєєв, Н.К. Розенталь. По даним Н.К. Розенталя карбонізація призводить до зниження pH до 9. Втрата металу в карбонізованому бетоні в атмосфері вологістю 90% за

рік – 56г/м^2 , а глибина ураження досягає 0,07 мм. По розрахункам Н.К. Розенталя і П.А. Вандаловської глибина карбонізації бетону збільшується зі збільшенням водоцементного відношення. Крім того, на глибину карбонізації впливає витрата цементу. Глибина карбонізації обернено пропорційна витраті

цементу. Уповільнює карбонізацію пластифікуючі добавки в бетон. Абсолютно сухий, чи навпаки, водонасичений бетон не карбонізується [5],

Для залізобетонних конструкцій промислових будівель та споруд, що експлуатуються в агресивному середовищі, характерним є протікання корозійних процесів, обумовлених проникненням агресивного середовища в глибину бетону. Дослідження багатьох вітчизняних спеціалістів показують, що найбільш агресивним по відношенню до залізобетонних конструкцій є хлориди. Вони викликають корозію арматури в бетоні, прискорюють карбонізацію бетону, знищують позоркневий захисний шар сталі, і можуть бути причиною виразкової корозії.

Ф.М. Івановим було встановлено, що дифузійна проникність бетонів для хлоридів зростає зі збільшенням водоцементного відношення, наскрісної пористості цементного каменя. Дослідженнями Т.Ю. Якуба показана лінійна залежність коефіцієнта дифузії цементного каменя бетону від його щільності. Отримані значення ефективних коефіцієнтів дифузії бетонів різних складів.

Присутня в бетоні волога створює умови для переносу добре розчинних хлористих солей. Накопичення хлористих солей робить бетон більш гігроскопічним, що впливає на вологонасиченість матеріалу [6].

Спеціалістами досліджено вплив щільності бетону, ширини розкриття тріщин в захисному шарі і концентрації хлорвмісного середовища на кінетику корозії сталевих арматур. Установлено, що на швидкість накопичення хлоридів біля арматури основний вплив має щільність бетону.

Спеціалістами ФМІ АН України вивчено корозійне ризикування високоміцної арматури в лужному середовищі, що містить хлориди.

Було встановлено високу депасивувачу здатність хлор-іонів. Доведено, що наявність хлор-іонів стимулює як зародження, так і розвиток тріщин, що визначає низьку корозійно-механічну міцність попередньо напруженої арматури в бетоні при наявності в ньому хлоридів. При великому зміні хлоридів навіть збільшення щільності бетону не вирішує проблеми. Вплив на

проникнення хлоридів має також товщина захисного шару бетону. Відповідно з даними, які вищезазначені, шкідливий вплив хлоридів на арматуру виявляється при перевищенні концентрації хлор – іонів $0,038 \text{ г-ген/л}$ ($0,2\%$) CaCl_2 . При вмісті хлоридів $0,2\%$ ймовірність пошкодження арматури в бетоні сягає 100% . Критичний рівень вмісту хлоридів за вітчизнними і зарубіжними джерелами $0,2\text{-}0,5\%$ від маси цементу [7].

Велику кількість робіт присвячених питанням корозійного стану арматури в залізобетонних конструкціях видано за кордоном. Особливо, розглянуті питання руйнування залізобетонних конструкцій мостів. В США, наприклад, експлуатується близько 80 тис. мостів з залізобетонним настилом. Повідомляється, що в наслідок корозії арматури термін служби їх знижений в 10 разів. Основна причина – корозія під впливом хлоридів, вологи, пилу.

Крім хлоридів особливою активністю по відношенню до залізобетонних конструкцій відрізняються кислоти, кислі гази. Їх дії принципово така ж як Cl^- . При корозії бетону під впливом кислот в порівняльно тонкому шарі відбувається нейтралізація порової рідини і хімічне переродження цементного каменю. При цьому аніони кислот дифундирують до арматури, викликаючи депасивацію її поверхні навіть при $\text{pH} = 12$ і більше.

Б.П. Любарською було встановлено, що визначальним фактором швидкості корозії в цих умовах стає швидкість дифузії іонів через шар бетону. В монографії С.Н. Алексеєва виявлені особливості корозійної впливу кислих газів на залізобетонні конструкції, приведена кінетика нейтралізації бетону, на основі якої розрахований час захисної дії бетону [8].

Викликають корозію арматури тріщини в бетоні. Якщо тріщина досягла арматури, то повітря і волога можуть досягнути поверхні металу арматури і порушити її пасивність. небезпека появи корозії на арматурі стає більшою із збільшенням розкриття ширини тріщини.

Ненапружені конструкції і деякі попередньо напружені залізобетонні конструкції споруд і будівель працюють з розкритими тріщинами. На рис. 1.1. із

[12] зображений графік, що ілюструє проникність для пару і вуглекислого газу бетонних зразків з різноманітною шириною тріщин. Місцева активація поверхні арматури в зоні перетину її з тріщиною може викликати локальну корозію сталі.

Рис. 1.1 Проникливість тріщин в бетоні
1 - для водяного пару; 2 - для вуглекислого газу.

Значний вплив на корозійний стан арматури в бетоні є волога. Взаємодія захисного шару бетону з вологою в більшості залежить від пористості бетону. Крапельно-рідинна волога може проникати в конструкції різними шляхами: від атмосферних опадів, технологічних проливів, ґрунтових вод та ін. Конденсаційне зволоження відбувається при перетині водяного пару із зони високого в зону зниженого парціального тиску і перенасичення повітря вологою при падінні температури [9]. Переміщення повітряного пару здійснюється більш інтенсивніше, при збільшенні температурного перепаду і вологи теплог повітря [12].

Вологий стан бетону є вирішальним чинником, що впливає на швидкість корозії арматури в залізобетонній конструкції [13].

Бетон може мати різну пористість і вологість, від чого залежать такі його властивості, як питомий об'єм (рис.1.2), дифузійна проникність, та ін. Обмін

середовища на поверхні арматури обмежений. Він може здійснитись, в основному, лише за рахунок дифузії рідин і газів в капілярах і порах бетону.

Вологий бетон є провідником 2-го роду, тому процес корозії арматури в ньому можна розглядати з позицією звичайної електрохімічної теорії корозії металів в електролітах [11]. При відносній вологості повітря вище 80% корозія арматури в бетоні обмежена, швидкістю потрапляння кисню до поверхні арматури.

Найбільш повільною стадією, при цьому є дифузія кисню. Значні втрати металу на арматурі залізобетонних конструкцій може викликати електрокорозія.

А.А. Старосельским вивчені особливості електрокорозійних процесів на арматурі в різних умовах експлуатації залізобетонних конструкцій. Аналіз умов експлуатації електрифікованого транспорту дозволяє провести експертну оцінку корозійних факторів, їх аранжування.

Велика робота по вивченні електрокорозії залізобетону проведена Т.Г. Кравченко [10].

Відомо, що високоміцна стержнева армічно зміцнена арматура схильна

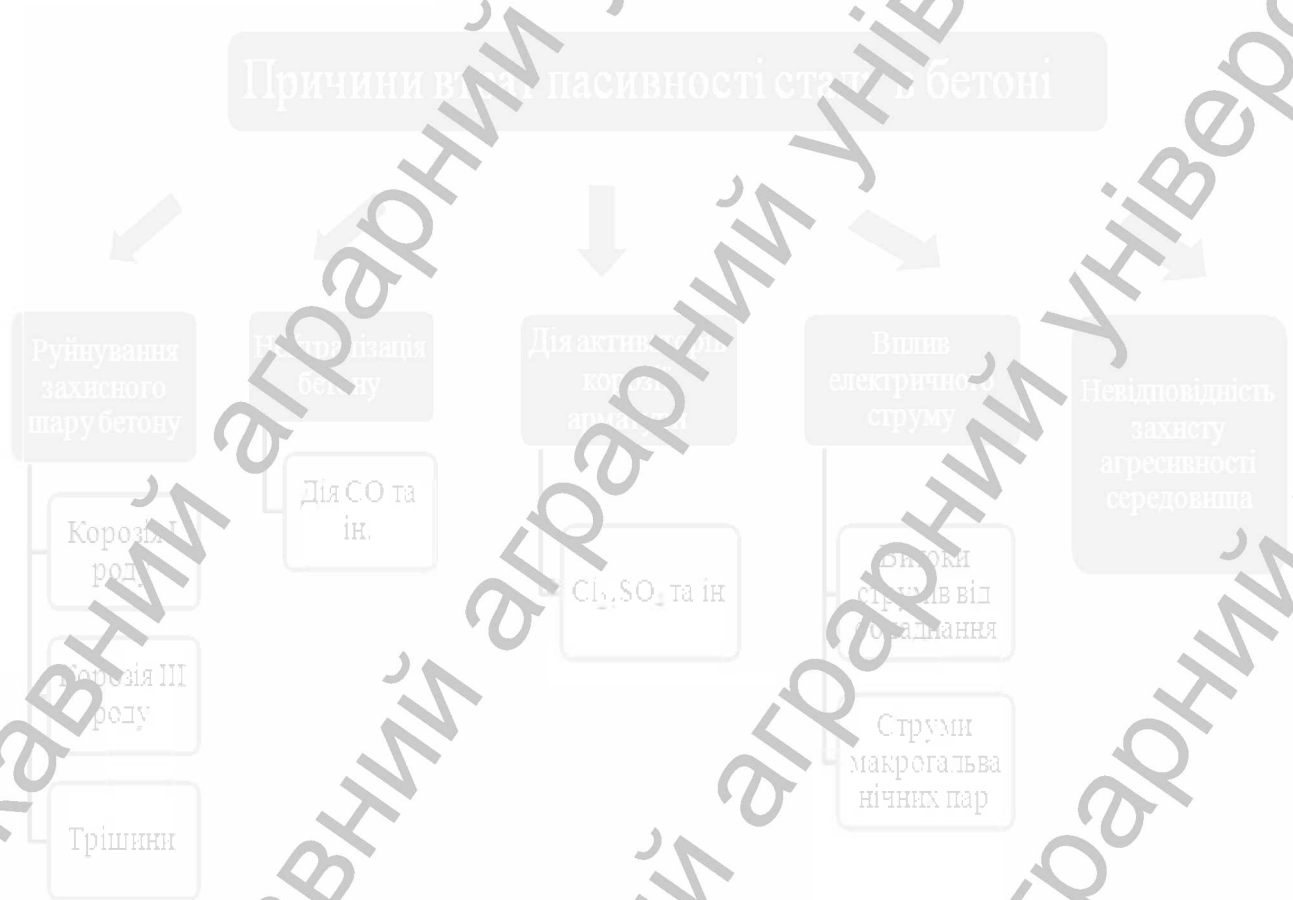
Рис. 1.2. Електроопір бетону в залежності від вологості повітря
1 - питомий опір; 2- рівноважна вологість бетону.

до специфічного виду корозійних руйнувань – розтріскування. Вивчення питань опору корозійному розтріскуванню термічно зміцнених арматурних сталей займались С.Н. Алексєєв, П.И. Соколовський, Г.М. Красовська, П.Д. Одеський та ін. Критерієм небезпечності корозії, викликаній блукаючими струмами є наявність анодних і знакоперемінних зон на арматурі.

Згадав, найбільш небезпечні з точки зору електрокорозії є залізобетонні конструкції споруд і будівель, до застосовується постійний струм.

Основні фактори, що викликають корозію арматури надземних залізобетонних конструкцій представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Причини втрати пасивності сталі в бетоні



1.2 Загальні відомості про електрохімічну корозію.

Для арматури, що знаходиться в бетоні, характерний електрохімічний механізм корозії, [14]. Електрохімічна корозія металів являє собою мимовільне руйнування металу, внаслідок електрохімічної взаємодії його з навколишнім провідним середовищем, при якому іонізація атомів металів і відновлення окиснючого компонента корозійного середовища протікає в одному акті і їхні швидкості залежать від величини електродного потенціалу металу.

Першою причиною електрохімічної корозії є термодинамічна нестійкість металу в даних корозійних умовах. При зануренні металу в електроліт в результаті взаємодії між ними виникає різниця потенціалів, що зв'язана з виникненням подвійного електричного шару, тобто несиметричного розташування заряджених частинок на межі поділу фаз.

Стрибок потенціалу між двома фазами не може бути вимірний, але можливо виміряти е.р.с. елементу, складеного із дослідного електроду (металу в електроліті) і електроду, потенціал якого умовно прийнятий за нуль (стандартного водневого електроду). Цю е.р.с. називають потенціалом електроду [15].

Якщо при взаємодії метала з електролітом фазову межу перетинають тільки іони металу, то протікають два процеси: перехід цих іонів із металу в електроліт з повою гідратованих іонів (окислювальний або анодний процес) і розряд цих іонів із електроліту з виділенням їх на металі у вигляді нейтральних атомів (відновлювальний або катодний процес). Швидкості анодного і катодного процесів виражається через складові струму: $i = i_a - i_c$.

Коли потенціал в подвійному електричному шарі досягає значення, при якому енергетичний рівень іонів в металі і електроліті (водному розчині) стає однаковим, устанавлюється динамічна рівновага з рівними швидкостями анодного і катодного процесів. Струм, зумовлений протікаючим обміном іонів між металом і розчином, називають струмом обміну: $I_c = \bar{i} \cdot \bar{S}$.

Коли в процесі обміну беруть участь тільки іони даного металу, тобто коли метал знаходиться в рівновазі з власними іонами, устанавлюється зворотній рівноважний електродний потенціал металу. В цьому випадку втрати маси металу не виникає. Зворотній електродний потенціал може бути розрахований по термодинамічним рівнянням (рівняння Нернста),

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln [M^{n+1}] ,$$

де E_0 - електрохімічний потенціал, тобто потенціал, який відповідає питомій концентрації іонів $[M^{n+1}]=1$; R- газова стала; T- абсолютна температура середовища; n - число вільних електронів на один іон; F – стала Фарадея; $[M^{n+1}]$ - концентрація іонів n валентного металу в електроліті.

Коли в процесі обміну, що визначає потенціал металу в електроліті, беруть участь не тільки іони даного металу, але й інші іони і атоми (причому, анодний

процес здійснюється іонами металу, а катодний – іншими іонами), то встановлюється незворотній електродний потенціал металу. Встановлюється він дослідним шляхом.

Стійке в часі значення незворотного електродного потенціалу називають стаціонарним потенціалом металу. При такому процесі обміну відбувається уже втрата маси металу за рахунок електрохімічного розчинення (корозії) металу. При цьому швидкості анодних і катодних процесів сильно впливають на величину стаціонарних електродних потенціалів і швидкість електрохімічної корозії металів [16].

Для електрохімічного розчинення металу необхідна присутність в електроліті окислювача – деполіаризатора, зворотній окиснювально – відновлювальний потенціал, який в даних умовах позитивніше зворотного потенціалу металу. Для встановлення меж термодинамічної можливості протікання електрохімічної корозії можна скористатись діаграмою стану системи « $Fe - H_2O$ », розробленою Пурбе, яка являла собою залежності зворотних електродних потенціалів від pH розчину для відповідних рівноважних реакцій.

В більшості практичних випадків протікання електрохімічної корозії зазвичай характеризується локалізацією анодного і катодного процесів на різних ділянках кородуючої поверхні металу, що призводить до нерівномірного або місцевого характеру корозійного руйнування. Ці ділянки з'являються в залежності від їх розмірів коротко замкнутими мікро – чи макрогоальванічними елементами.

Таким чином, електрохімічна корозія металів являється результатом роботи великого числа корозійних гальванічних елементів на корозійній поверхні металу. Поверхня корозійного металу являє собою багатоелектродний гальванічний елемент. В першому приближенні цю поверхню можна розглядати як двоелектродну систему, що складається із ділянок двох видів – анодних і катодних [17].

Причини появи електрохімічної гетерогенності можуть бути найрізноманітнішими: неоднорідність металевої фази (макро і мікрровключення, неоднорідність захисних плівок на поверхні, неоднорідність внутрішніх напружень та ін.), неоднорідність рідкої фази, (різниця в рН, різниця концентрацій деполаризаторів та ін.), неоднорідність фізичних умов (різниця температур, накладення зовнішнього електричного поля та ін.).

На анодних ділянках виникають гідратовані іони металу і некомпенсовані електрони, на катодних ділянках йде асиміляція електронів такими - небудь іонами або молекулами розчину (деполаризатора) схильними до відновлювання на катодах. Найчастіше катодні реакції проходять з кисневою або водневою деполаризацією.

У випадку незворотних потенціалів йде зменшення маси за рахунок його електрохімічного розчинення. Швидкість втрати маси характеризується силою корозійного струму, яка визначається за формулою: $I = U/R$,

де U е.р.с. корозійного процесу; $U = E_k - E_a$; R - сумарний опір анода, катода і зовнішнього ланцюга.

Однак заміри показують, що сила генеруючого струму лишається менше значення, розрахованого за законом Ома. Зміна струму викликана зміною потенціалів аноду і катода. Потенціал аноду при проходженні через нього струму стає позитивнішим, а потенціал катода - негативнішим. Ця зміна потенціалів, а отже, і їх різниця, що призводить до зменшення сили струму, називається поляризацією.

Лд

$$I = \frac{U}{R + P_a + P_k}$$

де $U = E_0^k - E_0^a$; P_a, P_k - поляризаційні опори в ланцюгах аноду і катода; R - омичний опір в ланцюзі корозійного елементу.

Причини анодної поляризації:

1. Сповільненість анодної реакції корозії металу, яка називається перенапруженням іонізації металу. Залежність перенапруження іонізації від анодної щільності струму може бути лінійною (при $i < 10^{-4}$ А/м²) і представлена логарифмічним рівнянням ($i > 10^{-2}$ А/м²).

2. Сповільненість дифузії іонів металу від поверхні в об'єм речовини призводить до концентраційної поляризації анода.

3. Сповільненість анодної реакції іонізації при виникненні анодної пасивності.

Процеси, що зменшують анодну поляризацію, називаються деполізаційними процесами, а речовини, що їх здійснюють, - анодними деполізаторами (наприклад, Cl^- , SO_4^- та ін.).

Причини катодної поляризації.

1. Сповільненість катодної деполізаційної реакції, називають перенапруженням реакції катодної деполізації.

2. Сповільненість дифузії деполізатора із електроліту до катодної поверхні або продуктів катодної деполізаційної реакції в зворотному напрямку, яка призводить до концентраційної поляризації катоду.

Кінетику процесів електрохімічної корозії металів прийнято зображати у виді поляризаційних анодних і катодних кривих, які показують залежність потенціалів електродів від густиоти анодного або катодного струму. Ступінь нахилу кривих характеризує більшу, або меншу важкість протікання електродного процесу [19].

В залежності від того, яка із величин (R , P_a , P_k) має вирішальний вплив на швидкість процесу корозії, розрізняють корозію з омічним контролем $R \gg P_a + P_k$, анодним $P_a \gg R + P_k$, катодним $P_k \gg R + P_a$. Можливий і змішаний контроль, коли R , P_a , P_k близькі за значеннями, наприклад, анодно-катодний, катодно-омічний, анодно-омічний. Для зниження швидкості корозії необхідно впливати на найбільш повільно протікаючий процес, так як саме він обмежує діяльність гальванічного елемента в цілому.

При роботі мікрогальванічних пар значення струму в основному визначається опором поляризації P_a і P_k , так як омичний опір дуже малий через незначну відстань між електродами. При роботі макрогоальванічних пар омичний опір в порівнянні з поляризаційним зростає.

Схематичний графік залежності потенціала електрода від щільності струму зображено на рис. 1.3. На ділянці AC йде розчинення металу, далі йде утворення пасивної плівки, що призводить до збільшення поляризації. В точці C спостерігається максимальна швидкість анодного процесу i_a (гранична щільність струму). Значення щільності струму і потенціалу в точці C характеризує здатність металу до створення захисної плівки на його поверхні (пасивація). Чим ближче зсув значення потенціалу в негативний бік і чим менша щільність струму при цьому, тим легше настає пасивація.

В точці D закінчується утворення захисної плівки і швидкість корозії різко зменшується. Потенціал в точці D називають потенціалом повної пасивації або потенціалом активації металу (початок втрати пасивації). Потенціал в точці E називають потенціалом перепасивації. Метал аноду переходить в активний стан.

Електродні процеси на металі в інтервалі потенціалів від $E_{m.обр.}$ до $E_{d.обр.}$ протікають одночасно і реєструються тільки сумарною швидкістю $i_n = i_a + i_k$, яка на рисунку зображена відрізком $bc = bd - ad$, так як $bd = i_a$, а $ad = -i_k$.

Рис. 1.3 Поляризаційна діаграма

1 – узагальнена часткова анодна поляризаційна крива для заліза з рівноважним електродним потенціалом $E_{м.обр.}$; 2 – катодна поляризаційна крива, коли метал знаходиться в оточенні окислювача з рівноважним окиснювальним/відновлювальним потенціалом $E_{д.обр.}$; 3 – загальна сумарна поляризаційна діаграма.

При великому зсуві потенціалів відносно потенціалу корозії $E_{с}$ загальна поляризаційна діаграма збігається з частковою.

Кінетику рівноважного обміну виражає рівність відрізків MO і ON .

Схематичне зображення корозійного гальванічного елемента, що виникає на сталевій арматурі у випадку відсутності пасивної плівки, показано на рис. 1.4. Метал розчиняється на анодних ділянках $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$. Електрони переміщуються до катодної ділянки, зв'язуються водою і киснем, утворюючи при цьому іони гідроксиду $2H_2O + O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. Іони гідроксиду

переміщуються від катодної ділянки до анодного і вступають в реакцію з іонами заліза Fe^{2+} , утворюючи гідроксид заліза $Fe(OH)_2$, який в свою чергу, вступає в реакцію з киснем, легко утворюючи оксиди Fe_2O_3 або Fe_3O_4 . Ці сполуки являються так званою іржею, яка порушує зчеплення арматури з бетоном.

Рис. 1.4. Корозійний елемент

1 - вторинна реакція; 2- анодна реакція; 3- струм; 4- катодна реакція
5 - переміщення електронів, 6- сталева арматура

Якщо в даному місці поверхні кородуючого металу анодні і катодні щільності струму сталі, має місце однорідний (гомогенний) змішаний електрод, для якого характерна рівномірна втрата речовини з поверхні. Локальні аноди при цьому розподіляються по всій поверхні металу.

Однак, ці умови можуть зберігатись лише на малих поверхнях.

Структурна неоднорідність металу арматури, наявність деформованих ділянок, жорсткостей та ін. обумовлюють неоднорідність. Бетони також характеризуються гетерогенністю будови і властивостей як в мікро-, так і в макромасштабах. Змінюється структура, вологість, концентрація агресивного середовища, повітря непроникність, електропровідність, температура, та ін. Будь-яка така неоднорідність викликає утворення корозійного елементу, тобто має місце ділянки переважно анодних і катодних реакцій. Таким чином, різні

ділянки мають різні криві «струм – потенціал». Такі електроди називають змішаними. Вони кородують локально з різними швидкостями.

На рис. 1.5 показана умовна поляризаційна діаграма змішаного гетерогенного електроду при корозії, що супроводжується відновленням розчиненого в електроліті кисню і іонізацією металу. Локальні густини струмів процесу іонізації металу i_{MI} і i_{MII} на ділянках S_I і S_{II} , а i_{KI} і i_{KII} – локальні щільності струму відновлення кисню на цих ділянках. Рівноважні потенціали металу і кисню U_M і U_K , відповідно. При складенні струмів i_{MI} і i_{MII} отримали криву $i_I(u)$, а при складенні i_{MII} і i_{KII} відповідно, криву $i_{II}(u)$. Із діаграми видно, що на обох ділянках встановлюються різні значення змішаного потенціалу (E_{MI} і E_{MII}), в результаті чого між ділянками I і II виникає вирівнюючий струм i_d . Ділянки з більш від’ємним потенціалом виступають в ролі аноду, а з меншим – катоду.

Рис 1.5 Поляризаційна діаграма змішаного гетерогенного електроду

1.3 Вплив структурних характеристик бетону на корозійний стан арматури

Бетон являє собою складне конгломератне тіло (рис.1.6). Порова структура бетону формується від моменту затворення гідру до затвердіння бетонної суміші. Продукти гідратації не заповнюють повністю обсяг, на характеризуються пористістю близько 28 %, утвореною між окремими колоїдними частинками матеріалу. Ця система частинок названа цементним гелем, а простір між ними - гелеві пори. Гелеві пори мають малі розміри (приблизно 1,5 нм).

При гідратації цементу утворюється і інші категорії пор. Проміжки, утворені між більш-менш гідратованими і не гідратованими частинками цементу

утворюють так звані капілярні пори. Середній розмір капілярних пор складає 1,3 мкм. Капілярні пори мають істотний вплив на проникність цементного каменю.

Подальші категорії пор представлені порами седиментації, які утворюються внаслідок поверхневого або внутрішнього водовиділення. Седиментаційні пори можуть бути розміром від 50 до 100 мкм. Якщо вони утворюються під зернами заповнювача, то вони можуть мати іще більші розміри.

Седиментаційні пори є головними транспортними шляхами проникнення води в бетон, тому що в порах, з розмірами більше 50 мкм, вода знаходиться в вільному стані.

Повітряні пори мають зазвичай сферичну форму і утворюються при попаданні повітря в бетонну суміш. Розміри повітряних пор можуть коливатися від 25 до 500 і більше мкм. Їх обсяг рідко перевищує 5% в об'ємі бетону.

Далі можна ділити пори на мікропори з радіусом менше 10 мкм і макропори з більшим радіусом.

Категоріями пор, котрі представляють дефекти структури бетону, є пори (порожнечі), утворюються внаслідок недостатнього перемішування та ущільнення суміші між зернами крупного заповнювача. Розмір таких порожнеч доходить до $30 \cdot 10^6$ нм.

Наступним дефектом структури бетону є пори (пустоти) під нижньою поверхнею крупних, плоских і довгастих зерен каменю, які утворюються в результаті внутрішнього водовідведення в бетонній суміші.

Істотний негативний вплив, на довговічність залізобетону надають усадкові, температурні та інші тріщини.

Вплив різних факторів на парову структуру представлені на рис.1.7.

Вид цементу має вплив на парову структуру. Найнижчу пористість має високоміцний портландцемент. Тонкість помелу цементу також відбивається на структурі цементного каменю. Підвищення тонкості помелу цементу знижує загальну пористість, зменшує відносний обсяг макропор і знижує відносний обсяг мікропор.

На пористу структуру цементного каменю, розчину і бетону найбільший вплив робить водоцементне відношення ($V / Ц$). Зміна пористості цементного каменю при різних $V/Ц$ показано на мал.1.8.

Аналіз результатів дослідження [9] показує, що коефіцієнт дифузії цементного каменю зростає пропорційно збільшенню $V / Ц$ за лінійним законом.

Отримані значення коефіцієнтів дифузії свідчать про залежність дифузійної проникності цементного каменю від його пористості. Установлено, що найбільша кількість великих пор спостерігається при високому $V / Ц$ і найменше - при низькому $V / Ц$.

Крива диференціальної пористості підтверджують вплив $V / Ц$ на структуру цементного каменю і співвідношення об'ємів пор різного розміру.

Температура середовища і вологість, при якій твердне цементний розчин, також впливає на парову структуру. Підвищення температури тисотиння призводить до збільшення великих пор. Кількість води в просторі, в якому твердне цементний розчин, має істотний вплив на загальний об'єм пор, а також на розділення пор по розмірам [14].

У процесі гідратації цементу загальна пористість і об'єм капілярів знижується [10].

Рис. 1.6 Схема структури бетонного конгломерата

Рис. 1.7 Фактори, які впливають на істотність цементного каменя

а)

б)

в)

Без добавок									
З добавками хлористих солей									

Структура бетону визначає характер процесу переносу в неї. В бетоні конвекції практично немає. Перенесення речовини в поровому просторі, заповненому рухомою фазою, здійснюється дифузійно, міграцією і фільтрацією. У фільтраційному перенесенні проявляється реакція бетону на гідродинамічний вплив.

Структура бетону визначає його основні особливості: розвинена внутрішня поверхня, проникність потоку речовини, прояв капілярних ефектів, запобігання вільного змішування рухливих фаз.

Специфічні особливості бетону у зв'язку з появою капілярних сил в порах. Особливе значення капілярні властивості набувають при корозійних процесах в умовах похильної орієнтації залізобетонних конструкцій, коли поділ повітря в бетоні захисного шару і агресивної рідини забезпечується не силами тяжіння, а капілярними ефектами.

У бетоні залізобетонних конструкцій здійснюються процеси переносу агресивних середовищ, а в окремих умовах і хімічних реакцій з його складовими. Тверда фаза бетону не електропровідна. Перенос струму здійснюється по електроліту, який заповняє простір.

Внаслідок цілої низки причин, як навмисно, так і ненавмисно, бетону може бути додана структура, яка займає будь-яке проміжне значення між крайніми: щільної і великопористої. Природно, що чим більше часу перебуває арматура в бетоні, тим більше неоднорідні умови на її поверхні, як внаслідок несучільного

покриття арматури цементним каменем і плівками лужної золи, так і різним ступенем аерації окремих мікро- і макро ділянок її поверхні.

Як відомо, в бетоні щільної структури на портландцементі сталі знаходиться в пасивному стані завдяки насиченню гідратом кальцію порової вологи цементного каменю, значення рН якої 12 і більше. Однак, умови можливої зміни рН порової рідини у всьому об'ємі неоднакова. Великі пори більш чутливі до цих змін чим дрібні пори капіляри і міжпоровий простір. На межах ділянок поверхні арматури, що контактують з порами і міжпоровим простором, мають всі необхідні умови для проходження локальних електрохімічних реакції, в результаті чого виникають вогнища корозії, у розвитку яких, очевидно не останню роль відіграють макрогоальванічні пари.

С.Н. Алексеевим виявлено виникнення локальних вогнищ корозії на арматурі за рахунок роботи гальванічних пар диференціальної лужності та аерації в зонах поліфазного контакту на кордоні пор бетону. Правда в пористому шлакопемзебетоні локальні осередки виникали в результаті того, що частина поверхні арматури не мала щільного контакту з цементним каменем. Найбільш швидке зниження рН в місцях нещільного прилягання бетону до арматури, а також у великих порах на межі арматура - бетон виявлено при вивченні депасивації арматури залізобетону зовнішнім анодним струмом [18]. Аналогічні явища були виявлені також на арматурі під тріщинами в бетоні [13].

Присутність в паровій рідині бетону аніонів активаторів (Cl^- , SO_4^{2-} і ін.) нерідко призводить до порушення пасивного стану на окремих, відносно невеликих ділянках поверхні арматури. Таке порушення має місце тільки при потенціалах, що лежать вище деякого критичного значення. Його величина залежить як від природи металу, так і від природи і концентрації активуючого іона в паровій рідині.

Роль аніонів депасиватора зводиться до того, що вони витісняють або частково заміщують на поверхні металу пасивуючий кисень з утворенням поверхневого комплексу, здатного навіть переходити в розчин.

Локальний характер активації пасивної поверхневої плівки є наслідком мало враховуваних до останнього часу особливостей корозії пасивного металу в бетоні.

По - перше, результати порівняно недавніх дослідів показують [12], що традиційне уявлення про пасивний шар як гомогенне утворення невірно. У металі технічної чистоти такий шар є гетерогенним в тому числі, що на різних ділянках поверхні він має різну захисну ефективність.

Причина, гетерогенності полягає в чутливості складу, структури, а отже, захисної ефективності плівки до складу та структури металу, особливо його поверхневого шару.

По - друге, гетерогенна будова, що покриває арматуру бетону, призводить до нерівномірного розподілу анодного процесу (окислення металу) по пасивній поверхні. На одних ділянках (у гирлі великої пори) останній може протікати зі швидкостями, значно переважаючими середньою, на інших (між цими порами) значно меншими.

Для корозійної поведінки пасивного металу істотно, що анодній гетерогенності не обов'язково слідує така ж сама катодна гетерогенність (такий як характер розподілення катодного процесу на поверхні) [12].

Несадяковий характер розподілу анодного і катодного процесів на поверхні корозійного металу неминуче призводить до виникнення в системі бетон-арматура локальних струмів; такі струми забезпечують переважну міграцію аніонів до ділянок з підвищеною анодною активністю (в гирлі пори), збільшуючи тим самим швидкість їх депасивації. Істотно, при цьому, що саме активуючи аніони завдяки їх здатності до взаємодії з металом будуть переважно акумулюватися у найбільш анодно-активних ділянках.

При постійній сумарній швидкості деполаризація катодної реакції більш швидка і глибока. Депасивація цих ділянок неминуче веде до прогресуючого перерозподілу міграційних потоків аніонів, тобто до все більшої інтенсифікації тих потоків, які спрямовані на найбільш анодно-активні і депасивуючі ділянки, і

до ослаблення всіх інших. Результатом виявляється швидка і глибока депасивація одних ділянок та репасивація інших, а отже і різко диференційоване поверхнєве розподілення анодного процесу. Виключаючі виразки стають стійкими центрами анодної активності, вносячи основний внесок в швидкість розчинення металу. Корозія із рівномірної перетворюється в гостролокалізуючу.

Безумовно, можливість стійкої депасивної тої чи іншої ділячки пасивної поверхні, майже однозначно визначається співвідношенням в трілеглому до нього шарі природою рідини, концентрації активатора і концентрації пасиватора.

На підставі викладеного можна наступним чином представити розвиток процесів корозії арматури в анодних зонах залізобетонних елементів. На ділянках арматури, поблизу яких рН рідкої фази бетону значно знижується, внаслідок дії активаторів корозії (Cl , SO_4 та ін.) пасивуючі шари руйнуються і глибокується інтенсивна корозія. Найбільш швидко концентрація гідроокислювальних іонів зменшується в крупних порах на кордоні арматура-бетон, в місцях нещільного прилягання арматури до бетону.

Інтенсивність розчинення, арматури підвищується за рахунок роботи гальванічних пар з різною величиною рН поблизу електродів. Активні ділянки арматури стають анодами по відношенню до ділянок, близько яких зберігається висока рН і де активатори корозії не можуть порушити пасивний стан.

На рис. 1.9 схематично, представлений фрагмент залізобетонного елемента, який ілюструє механізм утворення корозійних макропар в порі.

Епюра розподілу ділянок арматури по степені доступу до них кисню повітря показана на рис. 1.9 (б). У відношенні з основними законами електромеханічної корозії металів ділянки арматурного стержня, до яких надходить менше кисню, ніж до сусідніх, набувають більш негативний потенціал. В разі сприятливих умов для діяльності гальванічних пар являються анодами. Ділянки ж з відносно великим доступом кисню служать катодами.

Причиною утворення другої елементарної макропары є різниця значення рН електроліту в міжпоровому просторі і в порі.

Плівка парової рідини в бетоні являє собою насичений вологою розчин $\text{Ca}(\text{OH})_2$; величина рН його довгий час зберігається на рівні 12,4 - 12,6. Однак характер диференціальної лужності бетону призводить до карбонізації гідрату, оксиду кальцію в більшості порях бетону і лужності парової рідини. На рис. 1.9 (в) схематично зображена епюра рН електроліту на поверхні арматури. Потенціал сталі, зануреної в електроліт, як відомо, залежить від рН розчину; в місцях зниженої лужності потенціал приймає більш негативне значення. Таким чином в гирлі пори утворюються умови, для утворення анода елементарної макропары диференціальної лужності. Епюра потенціалу зображена на рис. 1.9 (д).

Розмір анодної ділячки і величина його потенціалу залежать від багатьох, і річних: перерізу і довжини пори, степені водонасичення бетону, концентрації у воді активізуючих іонів (Cl , SO_4) та ін.

У щільному бетоні із аналізу схем рис.1.9 випливає, що макропара диференціальної аерації (рис. 1.9 (г)) внаслідок високої лужності середовища та пасивності сталі під захисним шаром утворитися не може. Можливе утворення елементарної макропары диференціальної лужності (рис. 1.9 (д)) з утворенням анода в гирлі пори і катода в міжпоровому просторі, але вільний доступ кисню сприяє зміщенню потенціалу анода діючої макропары в позитивну сторону і, отже, зменшення різниці потенціалів (мал.1.9 (е)).

У випадку низької лужності бетону внаслідок минулої глибокої карбонізації або інших причин макропары диференціальної лужності в гирлі пори слабо виражені; можливе виникнення безлічі звичайних корозійних макропар.

Механізм корозії може змінюватися з часом. Безпосередньо після порушення пасивності сталі в зоні пори переважає значення набуває макропары, де анодом є метал в зоні пори, а катодом метал поза нею. Через певний час у результаті роботи даної макропары, а також корозійних мікропары

утворення яких, як відомо пов'язано з неоднорідністю самої поверхні металу, в зоні пори виникає ураження арматури у вигляді окремих виявів, заповнених продуктами корозії.

Надходження кисню до поверхні металу безпосередньо у виразках утруднено в порівнянні з надходженням його до решти поверхні сталі в його пори. Це може викликати утворення макропар диференціальному аерації з анодами у виразках і катодами на решті поверхні сталі під порою.

Отже, обидві макропари беруть участь в процесі розчинення металу, але в залежності від зовнішніх умов на різних етапах розвитку процесу величина корозійних втрат, викликаних дією кожної із зазначених макропар, буде різною.

Загалом необхідно визнати, що уявлення про деталі механізму корозії арматури в виразці пор носять поки що чисто, якісний характер.

Рис 1.9 Схема до аналізу механізму утворення корозійних макропар на ділянці «пора-міжпоровий простір» в залізобетоні.

1.4 Етапи математичної моделі та види математичних моделей

Будь-яка подія залежить від багатьох діючих на неї факторів. Кожне спостереження або замір може зафіксувати тільки деякі фактори.

Для повного уявлення що подію необхідно мати велику кількість спостережень чи замірів, тому щоб отримати широкую інформацію про подію дослідження ведуть на моделі.

Під моделлю розуміють штучну систему, яка відображає властивості події чи предмету, що вивчається (оригінала).

Моделі бувають фізичні, математичні, натурні.

Фізична модель дозволяє наглядно показати в натурі протікаючі події.

Математична – дозволяє кількісно дослідити явище чи подію.

Натурна – дозволяє найбільш повно дослідити явище чи подію.

Вивчення явища за допомогою моделей називається моделюванням.

Найчастіше використовують фізичне і математичне моделювання.

При фізичному моделюванні фізичне явище об'єкта (оригінала) і моделі може бути різною, а математичні залежності однакові.

Математичний метод моделювання заключається у: а) розробці математичної моделі; б) виборі її рішення в) аналізу отриманого результату.

Математичне формування задачі зазвичай представляється у вигляді чисел, функцій, систем рівнянь і т.д.

Опис об'єктам явища може бути в: а) неперервній формі; б) дискретній формі в) детермінованій; г) стохастичній формі.

Математична модель – це система математичних відношень.

I-й етап математичного моделювання:

- постановка задачі;
- визначення об'єкта і мети досліджень;
- завдання критеріїв вивчення об'єкта.

Тут також установлюються межі області впливу об'єкту, що вивчається. Вони установлюються в залежності від значимості взаємодії із зовнішнім середовищем чи об'єктом. Встановлення меж дозволяє розглядати систему що моделюється, як замкнуту, а це спрощує математичне моделювання.

II-й етап – вибір типу математичної моделі.

Для вивчення типу математичної моделі уводять пошуковий експеримент, який дозволяє установлювати:

- лінійність чи не лінійність;
- стаціонарність чи не стаціонарність;
- ступінь детермінованості досліджуемого об'єкта чи явища.

Лінійність чи не лінійність може бути установлена по статистичних характеристиках.

Під статистичною характеристикою розуміють зв'язок між величиною зовнішньої дії на об'єкт (величина вхідного сигналу) і величиною його реакції на зовнішню дію.

Використання лінійної математичної моделі значно спрощує її аналіз. Наприклад, лінійна модель дозволяє використати принцип суперпозиції.

Принцип суперпозиції стверджує, що коли на лінійну систему діє декілька сигналів, то загальний вихідний сигнал утворюється в результаті складання її реакції на кожний вхідний сигнал.

Встановлення динамічності чи статистичності проводиться по зміні досліджуваних показників за часом.

При виборі типу моделі ймовірнісного об'єкту важливо установлення його стаціонарності. Звичайно про це судять по зміні в часі параметрів законів розподілу випадкових величин.

Найчастіше для цього використовують τ , і середнє квадратичне відхилення випадкової величини σ , від середньоквадратичного або середньоквадратичного відхилення за часом. Установлення загальних характеристик об'єкту дозволяє вибрати математичний апарат, на базі якого базується математичне

модельовання. Вибір математичного апарату для побудови математичної моделі зображено на рис 1.8

Рис 1.8 Вибір математичного апарату для побудови математичної моделі

На вибір моделі може вплинути інформація інших авторів, вибрана гіпотеза.

III-й етап – вибір типу математичної моделі в даному класі. Особливе місце на даному етапі займає процес перетворення вхідних сигналів у вихідні характеристики об'єкту.

Результати наукового експерименту і аналіз інформаційного масиву дозволяє установити схему взаємодії об'єкта із зовнішнім середовищем по співвідношенню вхідних і вихідних величин.

В принципі можливо установити 4-ри схеми взаємодії.

1) Одномірно-одномірне



На об'єкт діє один фактор і його поведінка оцінюється з одним показником.

2) Одномірно-багатомірне



На об'єкт діє один фактор, а його поведінка оцінюється за декількома показниками.

3) Багатомірне - одномірне



4) На об'єкт діє один фактор, а його поведінка оцінюється одним показником.

Багатомірне-багатомірне



На об'єкт діє один фактор і його поведінка оцінюється декількома показниками.

При схемі 1 – однорідно – одномірне:

- стаціонарний детермінований об'єкт: вхідна дія із вихідним сигналом пов'язується через постійний коефіцієнт – $y = k * x$;
- не стаціонарний детермінований об'єкт: зв'язок описується різними функціями – $y = f(x)$, або золнолом;

При схемі 2 – однорідно – багаторідна:

для стаціонарного і нестаціонарного детермінованого об'єкту зв'язок вхідного сигналу з вихідним аналітичний схемі 1, але математичного моделювання будуть такими: вхідна дія буде пов'язана із кожним вихідним сигналом.

Вихідні сигнали вважаються незалежними.

При схемі 3 – багаторідна – однорідна:

- стаціонарний дискретний об'єкт:

$$y = \sum_{i=1}^m x_i \text{ - при рівнозначній вхідній дії;}$$

$$y = \sum_{i=1}^m a_i x_i \text{ - при нерівнозначній вхідній дії;}$$

де a – коефіцієнт;

m – число змінних дій

- нестаціонарний дискретний об'єкт: математичного моделювання у

$$\text{вигляді повного полінолу - } y = k_0 + \sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij} x_i x_j + \dots,$$

де m – число парних сполучень факторів ($m = C_2^m$) або модель у вигляді диференціального рівняння

5) При схемі 4 - багатомірна-багатомірна:

- модель базується аналогічно схемі 3

При відсутності обґрунтованої інформації про зв'язок вхідних сигналів об'єкта динаміка об'єкта описується диференціальними рівняннями на основі деяких припущень або знань про властивості об'єкта.

Деякі загальні підходи до складання таких рівнянь.

Геометричні і фізичні задачі як правило приводять до одного із слідуючих 3-х видів рівнянь:

- диференціальні рівняння в диференціалах;
- диференціальні рівняння в похідних;
- інтегральні рівняння з наступним перетворенням їх в диференціальні рівняння.

Із умови задачі складаються приблизні співвідношення між диференціалами. Для цього малі спрощення величини заміняють їх диференціалами.

Нерівно протікаючі процеси за малий проміжок часу dt розглядаються як рівномірні. Так як відношення диференціалів функції і аргументу є границею відношень їх прирощень, то по мірі того, як прирощення наближається до 0, прийняте припущення виконується з великою точністю.

Отримані при цьому диференціальні рівняння є точними, якщо вони однорідні і лінійні відносно диференціалів. Суть методу похідних заключається в тім, що із умови задачі складаються наближені співвідношення між прирощеннями зміни функції і аргументу. Відсутність нескінченно малих в методі похідних умов, так як швидкість зміни досліджуваної величини сама з'являлась із розгляду нескінченно малих елементів. При розгляді роботи сил об'єктів тіл, площ криволінійних поверхонь їх можливо описати за допомогою визначення інтегралів. У випадку при такому опису невідома функція попаде під знак інтегралу, то отримаємо формальний запис, який називається інтегральним рівнянням.

Після диференціювання інтегрального рівняння воно перетворюється в диференціальне.

При одномірно – одномірна схемі якщо дія на об'єкта постійна в часі що в якості моделі статистичного ймовірнісного об'єкту може виступити деякий закон розподілу вхідної величини.

Якщо вхідна дія може приймати різні значення і кожному значенню відповідає ряд значень вихідної величини об'єкту, то в якості моделі ймовірнісного об'єкту приймається набір законів розподілу вихідної величини для всіх значень вхідної дії.

При моделюванні ймовірнісних об'єктів крім законів розподілу вхідних і вихідних величин суттєвий зв'язок між ними. Тому до складу моделі включають коефіцієнти взаємодії кореляції і функції.

При 3-й схемі взаємодії (багатомірно – одномірне) статистичного ймовірнісного об'єкту із зовнішнім середовищем задача математичного моделювання зводиться до схеми 1 – однорідно – однорідна для кожного сполучення постійних вхідних дій.

Якщо нестационарний випадок, то він буде відрізнятися тим, що кожна вхідна дія може приймати декілька значень. При цьому для кожного конкретного сполучення складатиметься набір законів розподілу.

Оцінка ступеня зв'язку вхідних величин із вихідною величиною проводиться шляхом співвідношення статистичних параметрів і розрахунку коефіцієнтів кореляції.

Моделювання дискретних режимів ймовірнісних об'єктів засновується на математичних моделях, які визначають функціональні зв'язки і закони розподілу випадкових величин.

Процес вибору математичних моделей об'єкта закінчується їх контролем. Відомі наступні види контролю: розмірностей, порядків,

характеру залежностей, екстремальних ситуацій, граничних умов, математичної замкнутості, фізичного розуміння, стійкості моделі.

Контроль розмірності зводиться до перевірки правила, що прирівнюються і складаються величини однакової розмірності.

Контроль *порядків* направленні на спрощення моделі. Малозначимі доданки відкидаються.

Контроль *характеру залежностей* зводиться до перевірки напрямку і швидкості зміни одних величин при зміні інших. Напрямок і швидкість повинні відповідати фізичному розумінні задачі.

Контроль *експериментальних ситуацій* зводиться до перевірки наочного розуміння рішень при наближенні параметрів моделі до нуля або нескінченності.

Контроль *граничних умов* залучається в тому, що перевіряється відповідність математичної моделі граничним умовам, що витікають із змісту задачі.

Контроль *математичної замкнутості* зводиться до перевірки того, що математична модель дає однозначне рішення.

Контроль *фізичного розуміння* зводиться до перевірки фізичного змісту проміжних співвідношень, що використовувались при побудові моделі.

Контроль *стійкості моделі* залучається в перевірці того, що варіювання вхідних даних не призводить до суттєвої зміни рішень.

1.5 Методи математичного моделювання корозії арматури в бетоні

Розрізняють загальну корозію поверхні арматури, яка захватує всю поверхню і може бути рівномірною і нерівномірною по глибині вражень. Буває місцева корозія, яка призводить до утворення окремих заглиблень локалізованих на обмежених площах. Є, так звана, пітингова корозія поверхні металу, коли діаметр враженої ділянки значно менше глибини вражень.

Розрізняють також міжкристалічну корозію, при якій руйнування йде на межі кристалу металу. Корозійні врахення оцінюються різними показниками, які можуть бути використані для оцінки корозійного стану поверхні арматури.

Для оцінки корозійної стійкості арматури в бетоні часто використовують показник, який ґрунтується на витраті маси металу при корозії:

де: m_0 – маса зразка до розм'якшення його корозійне середовище;
 m – маса зразка після утримання його в корозійному середовищі і видалення іржі;
 S – поверхня металу, який кородує;
 t – час утримання зразка в корозійному середовищі.

При електрохімічній корозії мається зв'язок між швидкістю витрати металу і показником щільності струму.

$$(1.2)$$

де: n – валентність іону металу; A – атомна маса металу; 26,8 - постійна Фарадея, Амод.

Глибинний показник корозії K_r являє собою глибину корозійного руйнування в одиницю часу (наприклад, мм/рік):

$$K_r = K_m \cdot 87,6 / \rho_m, \quad (1.3)$$

де: ρ_m – глибина корозії;

При оцінці нерівномірної, пітингової корозії вагові показники не можуть бути використані так як на міцність арматури врахування зміни її геометричного перерізу має першочергове значення.

Уліт Г. [26] для характеристики пітингової корозії пропонує використовувати пітинг-фактор, який вимірюється відношенням самого глибокого пітингу до середньої швидкості корозії визначеній по витраті маси.

Пропонується також оцінювати корозійний стан по щільності розташування пітингів і їх глибині.

В [17] пропонується оцінювати кінетику корозії арматури слідуючою функціональною залежністю:

$$h_k = K \cdot \sqrt{t}, \quad (1.4)$$

де: h_k – глибина корозії; K - емпіричний коефіцієнт; t - строк служби споруди, роки.

Значення « K » прийнято рівним, для неагресивних середовищ – 0,075; для слабо агресивних – 0,15 -0,3; для середньо-агресивних - 0,5.

В роботі [19] пропонується слідуюча залежність для корозії арматури залізобетонних конструкцій:

$$\Phi = \Phi_0 (1 - 0,25k), \quad (1.5)$$

де: Φ_0 - початкова площа перерізу арматури;

k - коефіцієнт агресивності середовища;

В роботі [13] приведена залежність, яка дозволяє визначити глибину корозії арматури при втраті захисних якостей бетоном:

$$(1.6)$$

де: Δ - швидкість корозії арматури для слабо -, середньо - і сильно агресивних середовищ, відповідно 0,17; 0,25; 0,34 мм/рік;

$\tau_{аб}$ – час повного руйнування захисного шару бетону;

τ_0 – час карбонізації захисного шару бетону; τ - час експлуатації.

Складність розрахунків по формулі (1.6) заключається в необхідності визначення великої кількості параметрів.

Установлена залежність ступеню корозії арматури від ширини розкриття тріщини [16], яка оцінюється регресивною кривою:

$$\Delta d = 1,22 + 0,099a_m + 0.027a_m^2. \eta_f = 0,96 \quad (1.7)$$

Рівняння регресії отримано методом найменших квадратів по результатах натурних обстежень плит покриттів. Величина теоретичного кореляційного відношення дозволила зробити висновок про тісний зв'язок між дослідженими параметрами.

В роботі [7] пропонується оцінювати корозійний стан по міцністих, структурних, хімічних характеристиках, що ускладнює використання цього методу.

Китайськими ученими [25] зроблена спроба розраховувати довговічність залізобетонної конструкції з урахуванням корозійних процесів на арматурі. Модель враховує час депасивації і корозії арматури, а також порушення зв'язків між бетоном і арматурою.

Математична модель корозії в бетоні, яка описана в [8] виведена на основі диференціальних рівнянь із балансу маси, балансу електричного заряду, енергетичного балансу, з врахуванням нерозності ентропії.

В роботі [24] прийнято зменшення площі поперечного перерізу арматури від корозії визначити наступним відношенням:

$$D = \frac{A_{s0} - A_{sg}\lambda(t)}{A_{s0} - A_{sg}} \quad (1.8)$$

де: A_{sg} - площа поперечного перерізу до початку корозії;

A_{s0} - площа поперечного перерізу арматури, яка необхідна для сприйняття навантажень в період експлуатації конструкції;

$\lambda(t)$ - ступінь руйнування корозією площі поперечного перерізу арматури в різний момент часу t :

$$\lambda(t) = \frac{A_{s0} - A_s(t)}{A_{s0}} \quad (1.9)$$

де: $A_s(t)$ - площа перерізу арматури враженої корозією в різний момент

часу.

Ступінь враженої арматури корозією будується на експериментальних дослідженнях, що затрудняє використання цієї залежності.

В [23] запропоновано метод визначення швидкості корозії арматури залізобетонних конструкцій, який ґрунтується на використанні потенціодинамічних поляризаційних характеристик і узагальненого закону Фарадея:

$$K = \frac{M \cdot \nu \cdot i}{z \cdot \rho \cdot F}, \quad (1.10)$$

де: K - характеристика лінійної швидкості корозії металу

перпендикулярно до його поверхні; M – молекулярна вага металу;

z, ν – число молекул, речовини і електронів в стахіометричному

рівнянні реакції корозії; F – постійна Фарадея; i – щільність струму;

ρ – щільність металу;

Із побудованих анодних поляризаційних кривих знаходять значення щільності струму i при потенціалі $E = 240$ (при цьому потенціалі сталь в бетоні знаходиться в пасивному стані).

Враховуючи те, що атмосферна корозія металу в нейтральних і лужних середовищах протікає з катодною деполяризацією, в роботі проведено теоретичний аналіз стану арматури залізобетонного елемента в цих умовах. Як базова прийнята модель корозії арматурного стрижня на півпросторі заповненому бетоном при дифузному контролі процесу і односторонньому фронті падання деполяризатора (кисню) до поверхні арматури через бетон.

$$i = F \cdot D \cdot C_n \cdot (a^2 - 1) / \left[M_k \cdot z \left(1 + a^2 - 2a \cos \epsilon \right) \ln a \right], \quad (1.11)$$

де: $a = (h + \sqrt{h^2 + z}) / z$;

i – щільність корозійного струму;

θ - полярна координата;

h – відстань від поверхні бетонного елемента до центра перерізу арматурного стержня;

r – радіус арматурного стержня;

D – коефіцієнт дифузії кисню;

F – число Фарадея.

РОЗДІЛ 2

МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета роботи: Дослідити корозію арматури під гетерогенним бетонним покриттям методом математичного моделювання.

Об'єкт дослідження: Арматура залізобетонних конструкцій.

Предмет дослідження: Корозія арматури з врахуванням гетерогенної структури бетонного покриття.

Задачі дослідження:

- Вивчити стан науки про корозію арматури в бетоні;
- Виявити зальні відомості про електрохімічну корозію;
- Вивчити вплив структурних характеристик бетону на корозійний стан бетону;
- Проаналізувати методи математичного моделювання корозії арматури в бетоні;
- Розробити математичні моделі корозії арматури під гетерогенним бетонним покриттям;
- Провести експериментальні дослідження за розробленою математичною моделлю.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Розробка математичної моделі роботи активно - пасивних гальванопар на арматурі під бетонним покриттям

3.1.1 Відправні положення для розробки моделі

Електрохімічна неоднорідність металу в гирлі пори і в міжпоровому просторі залізобетонного елемента обумовлює утворення корозійного елемента, тобто виникають області переважно анодних і переважно катодних реакцій. Якщо такі області розглядати як гетерогенні, то електрод складається з різних ділянок з різними кривими сумарний струм - потенціал. Такі електроди називають гетерогенними зміщаними електродами, вони кородують локально з різними швидкостями. Окремі області є електродами коротко замкненого елемента. У загальному випадку площі анодних і катодних ділянок у кородуючого металі нерівні і по цьому щільність струму на анодних і катодних ділянках не рівна. Проте сила корозійного струму для анодного і катодного процесів загальна.

В результаті такої локалізації анодних і катодних процесів уся поверхня арматури представляється як сукупність майданчиків (анодів і катодів коротко замкнутих гальванічних елементів), струм яких, віднесений до одиниці площі анодів характеризуватиме швидкість корозії.

Наприклад, на рис. 3.1 показано утворення локального елемента при корозії, що супроводжується відновленням розчиненого в електроліті кисню із врахуванням двох нерівно допустимих ділянок поверхні металу.

Тут S_1 і S_2 представляють собою частину поверхні, i_{M1} і i_{M2} - локальна щільність струму процесу $M \rightarrow M^{Z+} + Ze$, помножені на S_1 і S_2 , а i_{O21} і i_{O22} - локальні щільність струму відновлення кисню, помножені відповідно на S_1 і S_2 . $U_{p,m}$ і U_{O2} - рівноважні потенціали металу і кисневого електроду. При накладенні i_{M1} і i_{O21} отримуємо $I_1(U)$, а при складанні i_{M2} і i_{O22} відповідно $I_2(U)$.

Рис.3.1. Поляризаційна діаграма змішаного гетерогенного електроду S_I і S_{II} – частина поверхні; i_{mI} і i_{mII} – локальні щільності струму іонізації металу, помножені на S_I і S_{II} ; i_{oI} і i_{oII} – локальні щільності струму відновлення кисню, помножені відповідно на S_I і S_{II} ; U_M і U_K – зворотні потенціали металу і кисневого елемента, $i_c(U)$ – результуюча крива від суперпозиції кривих i_{mII} і i_{oII} ; $i_{II}(U)$ – результуюча крива від суперпозиції кривих i_{mI} і i_{oI} ; $E_{смI}$ і $E_{смII}$ – змішані потенціали відповідно I і II поверхні; $E_{см}$ – змішаний потенціал при протіканні локального струму i_d ; $i_{прSI}$ і $i_{прSII}$ – визначені дифузійні струми відповідно I і II поверхні.

На рис.3.1 видно, що в загальному випадку на обох ділянках встановлюються різні значення змішаного потенціалу ($E_{смI}$ і $E_{смII}$). Для вирівнювання цих потенціалів тут між ділянками I і II повинен протікати локальний струм i_d . Ділянки, що мають більш негативний змішаний потенціал, стають при цьому анодами, а інші – катодами.

Таким чином, питання про напрям локального струму складним чином залежить від взаємодії всіх чотирьох щільностей струму i_{mI} , i_{mII} , i_{oI} , i_{oII} .

Розчинення металу $i_{\text{КЛ}}$, $i_{\text{КП}}$ розділяється на усій поверхні інакше, ніж відновлення кисню, хоча їх сума за відсутності зовнішнього струму повинна бути рівна нулю.

Для арматури під бетоном в загальному випадку площі анодних і катодних ділянок не рівні, а умова зв'язаності набирає вигляду;

$$i_a S_a = i_K S_K, \quad (3.1)$$

Для опису процесу корозії по гетерогенному механізму може бути використаний закон електродинаміки:

$$i_a = I_a e^{-\alpha_a}. \quad (3.2)$$

Повний струм гальванопари:

$$I_a = (V_K - V_a)_a / R, \quad (3.3)$$

де $V_a = \varphi_0^a + \eta(i_a)$, $V_K = \varphi_0^K - \eta(i_K)$;

R – опір зовнішнього ланцюга;

φ_0^a, φ_0^K – зворотні потенціали анода і катода;

$\eta(i_a; i_K)$ – зміщення потенціалів від зворотних.

Якщо анодні і катодні ділянки були б ізольовані один від одного ($I_a=0$), то

$$V_K - V_a = \varphi_0^K - \varphi_0^a. \quad (3.4)$$

Різниця потенціалів $\varphi_0^K - \varphi_0^a$ – це е.р.с гальванного елемента; $V_K - V_a$ – діюча напруга на затиснення, коли в ланцюзі тече струм.

Для коротко замкнутих елементів $R \approx 0$; $V_K - V_a \approx 0$; $I_a = I_{\text{макс}}$.

Як видно із розглянутих вище закономірностей корозійні втрати на металі в більшості будуть залежить від відношення площі катодної і анодної ділянки, опору зовнішнього ланцюга гальванопари.

3.1.2 Розробка моделі корозії арматури під бетонним покриттям

В основу запропонованої моделі покладена гіпотеза про те, що швидкість корозії арматури в бетоні пропорційна активній частині поверхні під порою [3]:

$$K = K_0[1 - (S^I + S^{II})] + K^I S^I, \quad (3.5)$$

де K_0 – початкова швидкість корозії, г/м²год;

S^I, S^{II} - частини міжпорового простору бетону, контактуючого з поверхнею арматури, і частини поверхні арматури зайнята продуктами корозії;

K^I - сталі інарне значення швидкості корозії арматури, г/м²год;

Припускаємо, що при стаціонарному процесі швидкості руйнування продуктів корозії рівна K^I , а також, що швидкість руйнування адгезійних зв'язків міжпорового простору, контактуючого з поверхнею арматури пропорційна S^I , тобто

$$\frac{dS^I}{dt} = -aS^I + \beta, \quad (3.6)$$

де a, β - коефіцієнти.

Прийmemo наступні граничні умови:

$$S^I|_{t=0} = S_0^I; \quad S^I|_{t \rightarrow \infty} = S_0^I. \quad (3.7)$$

Рішення диференційного рівняння (3.6) має вигляд:

$$S^I = C \cdot e^{-at}. \quad (3.8)$$

Нехай $C=C(t)$. Поставимо знайдене рішення в (3.6):

$$\frac{dC}{dt} e^{at} + C(-a)e^{-t} = -a \cdot C \cdot e^{-at} + \beta,$$

або

$$\frac{dC}{dt} e^{at} = \beta.$$

Звідки

$$dC = \beta \cdot e^{at} dt, C = \frac{\beta}{\alpha} e^{at} + C_0, \quad (3.9)$$

Підставляючи (3.9) в (3.9) отримаємо:

$$S^I(t) = \left(\frac{\beta}{\alpha} \cdot e^{at} + C_0 \right) e^{-at} = C_0 + \frac{\beta}{\alpha}$$

Значення C_0 знайдемо з умов (3.7)

$$S^I /_{t \rightarrow 0} = C_0 e^{-at} + \frac{\beta}{\alpha} = S_0^I;$$

$$S^I /_{t \rightarrow 0} = \lim_{t \rightarrow 0} \left(C_0 e^{-at} + \frac{\beta}{\alpha} \right) = S_0^I;$$

$$C_0 + \frac{\beta}{\alpha} = S_0^I,$$

$$\frac{\beta}{\alpha} - S_0^I =$$

Звідки

$$C_0 = S_0^I - S_0^I \quad (3.10)$$

Т.д. остаточно: $S^I(t) = (S_0^I - S_0^I) e^{-at} + S_0^I$.

Рівняння (3.10) адекватно описує кінетику залежності зміни одязі бетонного покриття під дією корозії

Приблизно можна вважати, що:

де γ - постійна величина.

Граничними умовами тут будуть:

$$S^I /_{t=0} = 0; \quad S^I /_{t \rightarrow \infty} = 1 - S_0^I \quad (3.12)$$

Перепишемо у вигляді

Аналогічно, як і вище

$$\frac{dS^{II}}{dt} = -\beta S^{II}, \quad S^{II} = C \cdot e^{-\beta t}. \quad (3.14)$$

Підставимо (3.14) в (3.13):

$$\begin{aligned} dC/dt \cdot e^{\beta t} - \beta C e^{-\beta t} &= -\beta C e^{-\beta t} + \beta \gamma - \beta S^I, \\ dC/dt &= \beta \gamma e^{\beta t} - \beta S^I e^{\beta t}. \end{aligned}$$

Або з урахуванням (3.10):

$$C = \gamma e^{\beta t} - \frac{\beta}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) e^{(\beta - \alpha)t} - S_0^I e^{\beta t} + C_0. \quad (3.15)$$

Підставляючи (3.15) і (3.14) отримаємо:

$$\begin{aligned} S^{II} &= \left[\gamma e^{\beta t} - S_0^I e^{\beta t} - \frac{\beta}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) e^{(\beta - \alpha)t} + C_0 \right] e^{-\beta t}, \\ S^{II} &= \gamma - S_0^I - \frac{\beta}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) e^{-\alpha t} + C_0 e^{-\beta t}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Знайдемо значення γ і C_0 за умовою (3.12):

$$\begin{aligned} S^{II} /_{t=0} = \lim_{t \rightarrow \infty} S^{II}(t) &= \gamma - S_0^I = 1 - S_0^I, \\ \gamma &= 1, \end{aligned}$$

Підставим значення γ і C_0 в (3.12):

$$S^{II} = 1 - S_0^I - \frac{\beta}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) e^{-\alpha t} - (S_0^I - 1 + \frac{\beta}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I)) e^{-\beta t}.$$

Остаточна

$$(3.17)$$

Підставляючи отримані значення S^I, S^{II} в рівняння (3.5) і інтегрування по t дозволяє знайти залежність втрати маси в часі:

$$\Delta m = \int \left\{ k_0 \left[1 - (S^I + S^{II}) \right] + k^I S^{II} \right\} dt, \quad (3.18)$$

де

$$S^I = (S_0^I - S_\infty^I) e^{-\alpha t}, \quad (3.19)$$

$$S^{II} = (1 - S_\infty^I)(1 - e^{-\beta t}) - \frac{\beta \cdot e^{-\alpha t}}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) [1 - e^{-(\beta - \alpha)t}] \quad (3.20)$$

Перетворимо (3.20) для зручності до вигляду:

$$\Delta m = \int k_0 (1 - S^I) dt - \int (k_0 - k) S^{II} dt. \quad (3.21)$$

Обчислюємо перший інтеграл в (3.21), підставляючи значення S^I з (3.19)

$$\int (1 - S^I) dt = \int [1 - (S_0^I - S_\infty^I) e^{-\alpha t} - S_\infty^I] dt = (1 - S_\infty^I)t + \frac{S_0^I - S_\infty^I}{\alpha} e^{-\alpha t} + C, \quad (3.22)$$

де C – постійна інтегрування.

Обчислюємо другий інтеграл в (3.21), підставляючи значення S^{II} з (3.20):

$$\begin{aligned} \int S^{II} dt &= \int \left[(1 - S_\infty^I)(1 - e^{-\beta t}) - \frac{\beta \cdot e^{-\alpha t}}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) [1 - e^{-(\beta - \alpha)t}] \right] dt = \\ &= (1 - S_\infty^I)t + \frac{1 - S_\infty^I}{\beta} e^{-\beta t} - \frac{\beta}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) \int (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) dt = (1 - S_\infty^I)t + \\ &+ \frac{1 - S_\infty^I}{\beta} e^{-\beta t} - \frac{\beta}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) \left(-\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} + \frac{1}{\beta} e^{-\beta t} \right) + D, \end{aligned} \quad (3.23)$$

де D – постійна інтегрування.

Підставимо (3.22) і (3.23) в (3.21).

$$\begin{aligned} \Delta m &= K_0 (1 - S_\infty^I)t + K_0 \frac{S_0^I - S_\infty^I}{\alpha} e^{-\alpha t} + K_0 C - (K_0 - K^I)(1 - S_\infty^I)t - (K_0 - K^I) * \\ &* \frac{1 - S_\infty^I}{\beta} e^{-\beta t} + (K_0 - K^I) \frac{\beta}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) \left(-\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} + \frac{1}{\beta} e^{-\beta t} \right) - (K_0 - K^I) D = \end{aligned}$$

$$= K_0(1-S_\infty^I)t + K_0 \frac{S_0^I - S_\infty^I}{\alpha} e^{-\alpha t} - K_0(1-S_\infty^I)t + K^I(1-S_{00}^I) - (K_0 - K^I) \frac{1-S_{00}^I}{\beta} * \\ * e^{-\beta t} + \frac{K_0 - K^I}{\beta - \alpha} e^{\beta(S_0^I - S_\infty^I)} \left(-\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} + \frac{1}{\beta} e^{-\beta t} \right) + K_0 C - (K_0 - K^I) D.$$

Так як C і D довільні сталі, то позначимо ці останні складові C .

Після скорочення і заміни сталих отримаємо:

$$\Delta m = K^I(1-S_\infty^I)t + K_0 \frac{S_0^I - S_\infty^I}{\alpha} e^{-\alpha t} - K_0 C - (K_0 - K^I) \frac{1-S_\infty^I}{\beta} e^{-\beta t} + \\ + (K_0 - K^I) \frac{\beta}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) \left(-\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} + \frac{1}{\beta} e^{-\beta t} \right) + C. \quad (3.24)$$

Так як $K < K_0$ і $e^{-\beta t} \rightarrow 0$ при $t \rightarrow$ до нескінченності, утворене $K^I e^{-\beta t}$ і $1 - e^{-\alpha t}$ можна проігнорувати.

Тоді (3.24) матиме вигляд:

$$\Delta m = K^I(1-S_\infty^I)t - K_0 \frac{1-S_\infty^I}{\beta} e^{-\beta t} + K_0 \frac{S_0^I - S_\infty^I}{\alpha} e^{-\alpha t} + \\ + K_0 \frac{\beta}{\beta - \alpha} (S_0^I - S_\infty^I) \left(-\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} + \frac{1}{\beta} e^{-\beta t} \right) + C. \quad (3.25)$$

Перетворимо останні дві складові в (3.25):

$$K_0 (S_0^I - S_\infty^I) \left\{ \frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} - \frac{\beta}{\beta - \alpha} \cdot \frac{1}{\alpha} e^{-\beta t} + \frac{\beta}{\beta - \alpha} \cdot \frac{1}{\beta} e^{-\beta t} \right\} =$$

$$K_0 (S_0^I - S_\infty^I) \left\{ \frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} \cdot \left(1 - \frac{\beta}{\beta - \alpha} \right) + \frac{1}{\beta - \alpha} e^{-\beta t} \right\} =$$

$$K_0 (S_0^I - S_\infty^I) \left\{ \frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} \cdot \frac{\beta - \alpha - \beta}{\beta - \alpha} + \frac{1}{\beta - \alpha} e^{-\beta t} \right\} =$$

$$K_0 (S_0^I - S_\infty^I) \left\{ -\frac{1}{\beta - \alpha} e^{-\alpha t} + \frac{1}{\beta - \alpha} e^{-\beta t} \right\} =$$

$$K_0(S_0^I - S_\infty^I) - \frac{1}{\beta - \alpha} e^{-\alpha t} \{-1 + e^{-(\beta - \alpha)t}\} \quad (3.26)$$

Підставимо (3.26) в (3.25):

$$\Delta m = K^I (1 - S_\infty^I)t - K_0 \frac{1 - S_\infty^I}{\beta} e^{-\beta t} + K_0(S_0^I - S_\infty^I) \cdot \frac{1}{\beta - \alpha} e^{-\alpha t} (-1 + e^{-(\beta - \alpha)t}),$$

або

$$\Delta m = K^I (1 - S_\infty^I)t - K_0 \frac{1 - S_\infty^I}{\beta} e^{-\beta t} - K_0 \frac{S_0^I - S_\infty^I}{\beta - \alpha} e^{-\beta t} (1 - e^{-(\beta - \alpha)t}) + C. \quad (3.27)$$

Для визначення даної умови в (3.27) отримаємо:

$$C = K_0 \frac{1 - S_{00}^I}{\beta}.$$

Остаточно

$$\Delta m = K^I (1 - S_\infty^I)t - K_0 \frac{1 - S_\infty^I}{\beta} e^{-\beta t} - K_0 \frac{S_0^I - S_\infty^I}{\beta - \alpha} e^{-\beta t} (1 - e^{-(\beta - \alpha)t}) + K_0 \frac{1 - S_{00}^I}{\beta} \quad (3.27)$$

При довгій експозиції (t прямує до нескінченності) корозійний процес стабілізується, у рівняння (3.27) спрощується:

$$\Delta m = K_0 \frac{1 - S_\infty^I}{\beta} + (1 - S_{00}^I) K^I t. \quad (3.29)$$

Залежність (3.29) може бути виражена в струмових показниках.

Відомо, що корозійна щільність струму зв'язана з ваговим показником наступної залежності:

$$i = \Delta m \frac{n}{A} \cdot 2,68 \cdot 10^{-3}. \quad (3.30)$$

де i – струменевий показник корозії, в А/см²;

Δm – від'ємний ваговий показник корозії, в г/м год;

$n=2$ – валентність іона металу, який переходить в розчин;

$F=2,68$ – постійна Фарадея, в А – годин;

$A=55,85$ – атомна вага металу

Тоді

$$K_0 = i_0 \frac{A \cdot 10^3}{n \cdot F} = i_0 \frac{55,85 \cdot 10^3}{2 \cdot 2,68} = 10419,77 i_0 \quad (3.31)$$

Аналогічно

$$K^I = i^I \frac{A \cdot 10^3}{n \cdot F} = 10419,77 i^I \quad (3.32)$$

де i_0 і i^I – початковий і стаціонарний струменевий показник в A/cm^2 .

Підставляючи в (3.29) значення K_0 і K^I по (3.31, 3.32), отримаємо:

$$\Delta m = (1 - S_{00}^I) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{\beta} i_0 + i^I t \right) \quad (3.33)$$

3.2 Експериментальна перевірка розробленої математичної моделі

Оскільки у варті маси металу за часи наявності ділянок, що не мають щільного контакту з металом арматури (пора) і ділянок, що контактують з арматурою (міжпоровий простір), на останню роль грають макрогальванічні пари. Тому фізична модель для досліджень була прийнята макрогальванічна пара, яка утворюється з двох сталевих полірованих пластин, що мають електричний зв'язок через ізолюваний провідник.

Корозійні випробування проводилися зі сталі Ст3пс, так як вона найпоширеніша у виробництві монтажної і конструктивної арматури. Загальна кількість сталевих пластин для дослідження брали дев'ять для анода і катода, що дозволяє виконувати статистичну обробку результатів.

Анодом пари були зразки розмірами 1×1 см. (рис. 3.1), а катодом - пластина зі сталі покриті нітрошлак, розміри катодних пластин були такими: 1-3 зразки – 2×5 см., 4-6 зразки – $3,7 \times 5,4$ см., 7-9 зразки – $2 \times 4,5$ см. (рис. 3.2)

і катода замикались провідником для утворення макростальбачної пари. В якості провідника виступав ізольований мідний дріт, який попередньо очищався в місцях з'єднання сталевих пластин, для утворення електронного зв'язка. Сталеві зразки витримували 32, 44, 106, 116 і 126 днів.

Після витримки зразків в $NaCl$ через конкретний період часу (32, 44, 116 та 126 днів) видаляли іржу, застосовуючи той самий 10 %-вий розчин соляної кислоти з додаванням 1 % уротропіну, який і перед початком експерименту, він розчиняв продукти корозії. Після видалення іржі зразки промивали у воді, і висушували в сушильній шафі. Після цього повторно зважували на аналітичних вагах, для визначення втрати маси.

РОЗДІЛ 4

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Характеристика, властивості, застосування вихідних матеріалів

Під час виконання даної магістерської роботи ми використовували *сталеві пластини зі сталі Ст3пс*, що відповідають вимогам ДСТУ 2651:2005 «Сталь вуглецева звичайної якості. Марки» [4]. Використовувалась сталь марки Ст3, тому що вона найбільш широко використовується для виробництва монтажної і конструктивної арматури.

Букви Ст означають «Сталь» цифра «3», умовний номер марки залежно від хімічного складу, літери «пс» - ступінь розкислення («пс» - напівспокійна).

Сталь Ст3пс застосовують для несучих елементів зварних і не зварних конструкцій і деталей, що працюють при позитивних температурах, арматура класу Ат400С.

Хімічний склад вуглецевих сталей відповідає ДСТУ 2651:2005 «Сталь вуглецева звичайної якості. Марки» [4]. (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Хімічний склад в % матеріалу Ст3пс

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As

Властивості міцності прокату, ударні в'язкість прокату і технічні властивості із сталі Ст3пс відповідає ДСТУ 4484:2005 «Прокат сортовий і фасонний із сталі вуглецевої звичайної якості. Загальні технічні умови» (табл 4.2-4.4)

Таблиця 4.2 Властивості міцності прокату із сталі Ст3

Марка сталі	Механічні властивості		
	Тимчасовий опір, МПа	Межа текучості, МПа	Відносне подовження δ_s , %

Таблиця 4.3 Ударна в'язкість прокату із сталі Ст3

Марка сталі	Товщина прокату	Ударна в'язкість, Дж/см ² , не менше				
		КСУ		Після механічного старіння	КСУ	
		+20°C	-20°C		+20°C	-20°C

Таблиця 4.4 Технологічні властивості сталі Ст3пс

Зварюваність	без обмежень
Флокеночутливість	не чутлива
Схильність до відпускнуої крихкості	не схильна

Агресивний розчин солі використовувався для дослідження корозії арматури, в який занурювалися сталеві зразки.

Солі - це складні речовини, утворені атомами металів і кислотними залишками.

Солі - це електроліти, при дисоціації яких утворюються катіони (позитивно заряджені іони) металів і аніони, негативно заряджені іони кислотних залишків.

Електроліти - рідкі або тверді речовини, в яких присутні іони, здатні переміщатися і проводити електричний струм.

Дисоціація - повний або частковий розпад молекул розчиненої речовини на іони в результаті взаємодії з розчинником.

Катіони - позитивно заряджені іони.

Аніони - негативно заряджені іони.

В даному досліді використовувався 3% розчин NaCl, так як це стандартний електроліт для дослідження корозії металу. Приготування 3% розчин NaCl: 10г солі на 1 літр води.

Соляна кислота - в даній магістерській роботі ми використовували для очищення сталевих пластин від іржі.

Соляна кислота (хлористоводнева кислота) (соляна кислота) - розчин хлористого водню у воді, сильна одновисновна кислота. Безбарвна, "димить" на повітрі, сильно їдка рідина (технічна соляна кислота жортуєста із-за домішок Fe, Cl₂ та ін.).

Соляна кислота повинна відповідати вимогам ДСТУ 2904-94[5].

Максимальна концентрація при 20 ° C дорівнює 38% за масою, щільність такого розчину 1,19 г/см³. Солі соляної кислоти називаються хлоридами.

Технічна кислота має жовтуватий відтінок, викликаний спідками сполук заліза, хлору та інших елементів (FeCl₃).

Соляна кислота являє собою легко з'єднання, так як при нагріванні вона випаровується. Вона є сильною кислотою і енергійно взаємодіє з більшістю металів. Однак такі метали, як золото, платина, срібло, вольфрам і свинець соляною кислотою практично не труються. Багато недорогих металів, розчиняючись в кислоті, утворюють хлориди, наприклад цинк.

Соляну кислоту стримують розчиненням газоподібного хлорозводню у воді.

В нашому досліді для очищення іржі ми використовували 10% розчин соляної кислоти для оптимального очищення. Розбавлені розчини не виділяють газоподібного HCl і не димлять ні в сухому, ні у вологому повітрі.

Фізичні властивості соляної кислоти наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 Фізичні властивості соляної кислоти при 20 ° C, 1 атм (101 кПа)

Конц. (вага) с: кг HCl/кг	Конц. (г/л) с: кг HCl/м ³	Щільність ρ: кг/л	Молярність М	pH	В'язкість η: мПа·с

Величезна кількість соляної кислоти витрачається для видалення оксидів заліза, для того щоб соляна кислота реагувала тільки з оксидами, а не з металом, до неї додають особливі речовини, які називаються інгібіторами. [6*]

Інгібітор (лат. *inhibere* - затримувати) - речовини, що уповільнюють або запобігають перебіг різних хімічних реакцій: окислення, полімеризації, корозію металів та ін. [11]

Специально до корозії металу інгібітором називають речовину, яка адсорбуючи на поверхні металу, робить її потенціал більш позитивним, тим самим сповільнюючи процес корозії. Це речовина, яка сповільнює протікання хімічної реакції, але сам інгібітор в реакції не бере і не витрачається.

В якості інгібітору використовують – уротропін, катапіл, калтакс. В нашому досліді в ролі інгібітору виступав уротропін.

Краска нітроемаль була використана у даному досліді для покриття сталевих пластин, які виступали в якості катода.

Нітроемаль - фарби на основі нітрату целюлози (який отримують обробкою целюлози азотною кислотою). Нітроемаль, дуже зручні тим, що швидко сохнуть. Наносять їх за допомогою розпилювача. Маркуються такі фарби НЦ і розчиняються ацетоном. Працювати з ними потрібно в респіраторі.

Мідний дріт застосовувався для з'єднання сталевих пластин.

Вода використовувалася водопровідна.

4.2 Характеристика, застосування використаного обладнання

Вольтампер В7-4 у даній магістерській роботі використовувався для вимірювання сили струму сталевих пластин, за результатами яких були проведені розрахунки.

Технічні характеристики В7-41.

Діапазон виміру:

напруги постійного струму 100 мкВ-1000 В;

від піддіапазону вимірювання

Вхідний опір при вимірі напруги постійного струму $10 \pm 0,1$ МОм

Активна складова вхідного опору при вимірюванні напруги змінного струму $1 \pm 0,1$ МОм

Вхідна ємність 100 пФ

Живлення від мережі 220 В, 50 Гц; гід. батарей типу «Крона-ВЦ», «Корунд»

Струм, споживаний від батареї, не перевищує 8 мА

Габаритні розміри 178X90X50 мм

Маса Е7-41 без джерела живлення 0,5 кг

Аналітичні ваги використовували для зважування сталевих пластин, для визначення втрати маси на аноді.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Початкові дані отримані після корозійного дослідження заносимо до таблиці 5.1

Таблиця 5.1 Характеристика випробуваних гальванопар і значення β .

№ зразка	Розмір пластинки, см		Площа поверхні, см ²		Вага аноду, г		Час випробування	Щільність струму на аноді 10 ⁻⁶ А/см.	
	анод	катод	анод	катод	До випробування	Після випробування		Початковий, і _м	Початковий, і _м
1	1x1	2x4,5							
2	1x1	2x5							
3	1x1	3,7x5,4							
4	1x1	2x5							
5	1x1	3,7x5,4							
6	1x1	2x4,5							
7	1x1	2x5							
8	1x1	3,7x5,4							
9	1x1	2x4,5							

1. Розраховуємо втрати маси на аноді зразків за формулою:

$$\Delta m_n = m_1 - m_2,$$

де m_1 – вага анода до випробування, г,

m_2 – вага анода після випробування, г.

1) Втрати маси на аноді після витримання в 3%-м розчині NaCl через 32 дні, при гальванопарі:

- з катодом площею поверхні 18 см²:

$$m_1 = 0,6943 \text{ г};$$

$$m_2 = 0,6823 \text{ г}$$

$$\Delta m_1 = 0,6743 - 0,6823 = 0,012 \text{ г};$$

2) Втрати маси на аноді після витримання в 2%-му NaCl через 44 дні, при гальванопарі:

- з катодом площею поверхні 20 см².

$$m_1 = 0,6166 \text{ г};$$

$$m_2 = 0,5866 \text{ г};$$

$$\Delta m_2 = 0,6166 - 0,5866 = 0,03 \text{ г};$$

$$\Delta m_3 = 0,5619 - 0,5239 = 0,038 \text{ г};$$

$$\Delta m_4 = 0,6619 - 0,5559 = 0,106 \text{ г};$$

$$\Delta m_5 = 0,8585 - 0,7205 = 0,138 \text{ г};$$

4)

днів, при гальванопарі:

- з катодом площею поверхні 18 см²:

$$m_1 = 0,5898 \text{ г};$$

$$m_2 = 0,4814 \text{ г};$$

$$\Delta m_6 = 0,5898 - 0,4814 = 0,1084 \text{ г};$$

5) Втрати маси на аноді після витримання в 3%-му NaCl через 116 днів, при гальванопарі:

- з катодом площею поверхні 20 см^2 :

$$m_1 = 0,6619 \text{ г};$$

$$m_2 = 0,54830 \text{ г}.$$

$$\Delta m_7 = 0,6619 - 0,54830 = 0,1136 \text{ г};$$

- з катодом площею поверхні 40 см^2 :

$$m_1 = 0,597 \text{ г},$$

$$m_2 = 0,427 \text{ г}.$$

$$\Delta m_8 = 0,597 - 0,427 = 0,17 \text{ г};$$

- б) Втрати маси на аноді після витримання в 3%-му NaCl через 126 днів, при гальванопарі:

- з катодом площею поверхні 18 см^2 :

$$m_1 = 0,642 \text{ г};$$

$$m_2 = 0,494 \text{ г}.$$

$$\Delta m_9 = 0,642 - 0,494 = 0,148 \text{ г};$$

2. Розрахуємо теоретичні втрати маси на аноді витриманого в 3%-му розчині NaCl 1 м^2 за формулою.

$$\Delta m = \frac{\Delta m_n}{S_a};$$

де Δm_n - втрати маси на аноді в г;

S_a - площа поверхні анода.

- 1) Втрати маси на аноді після витримання в 3%-му NaCl через 32 дні, при гальванопарі на 1 м^2 :

- з катодом площею поверхні 18 см^2 :

$$\Delta m_n = 0,012 \text{ г};$$

$$S_a = 0,0002 \text{ м}^2.$$

$$\Delta m_{\text{теор}} = \frac{0,012}{0,0002} = 60 \text{ г};$$

2) Втрати маси на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 44 дні, при гальванопарі на 1 м^2 :

- з катодом площею поверхні 20 см^2 :

$$\Delta m_n = 0,03 \text{ г};$$

$$S_a = 0,0002 \text{ м}^2.$$

$$\Delta m_{2\text{теор}} = \frac{0,03}{0,0002} = 150\text{г};$$

- з катодом площею поверхні 40 см^2 :

$$\Delta m_n = 0,038 \text{ г};$$

$$S_a = 0,0002 \text{ м}^2.$$

$$\Delta m_{3\text{теор}} = \frac{0,038}{0,0002} = 190\text{г};$$

3) Втрати маси на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 85 дні, при гальванопарі на 1 м^2 :

- з катодом площею поверхні 20 см^2 :

$$\Delta m_n = 0,0106 \text{ г};$$

$$S_a = 0,0002 \text{ м}^2.$$

$$\Delta m_{4\text{теор}} = \frac{0,106}{0,0002} = 530\text{г};$$

- з катодом площею поверхні 40 см^2 :

$$\Delta m_n = 0,0138 \text{ г};$$

$$S_a = 0,0002 \text{ м}^2.$$

$$\Delta m_{5\text{теор}} = \frac{0,138}{0,0002} = 690\text{г};$$

4) Втрати маси на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 106 днів, при гальванопарі на 1 м^2 :

- з катодом площею поверхні 18 см^2 :

$$\Delta m_n = 0,1084 \text{ г};$$

$$S_a = 0,0002 \text{ м}^2.$$

$$\Delta m_{\text{теор}} = \frac{0,1084}{0,0002} = 542 \text{ г};$$

5) Втрати маси на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 116 днів, при гальванопарі на 1 м^2 :

- з катодом площею поверхні 20 см^2 :

$$\Delta m_n = 0,139 \text{ г};$$

$$S_a = 0,0002 \text{ м}^2.$$

$$\Delta m_{\text{теор}} = \frac{0,139}{0,0002} = 695 \text{ г};$$

- з катодом площею поверхні 40 см^2 :

$$\Delta m_n = 0,17 \text{ г};$$

$$S_a = 0,0002 \text{ м}^2.$$

$$\Delta m_{\text{теор}} = \frac{0,17}{0,0002} = 850 \text{ г};$$

6) Втрати маси на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 126 днів, при гальванопарі 1 м^2 :

- з катодом площею поверхні 18 см^2 :

$$\Delta m_n = 0,148 \text{ г};$$

$$S_a = 0,0002 \text{ м}^2.$$

$$\Delta m_{\text{теор}} = \frac{0,148}{0,0002} = 740 \text{ г};$$

3. Розраховуємо експериментальні втрати маси на аноді за формулою:

$$\Delta m = (1 - S_{\infty}^I) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{\beta} i_0 + i^I t \right)$$

де S_{∞}^I - частина міжпорового простору бетону, контактуючого з поверхнею арматури.

де i_0, i^I - початковий та кінцевий струменевий показник корозії, в $\text{А}/\text{см}^2$;

β - коефіцієнт

1) Втрати маси першого зразка на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 22 дні, при гальванопарі на 1 м^2 :

- з катодом площею поверхні 18 см²:

$$\Delta m_1 = (1 - 0,9) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{100 \cdot 10^{-6}} \cdot 6 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-6} \cdot 768 \right) = 65,72;$$

Також розраховуємо проміжне значення через 20 днів:

$$\Delta m_7 = (1 - 0,9) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{100 \cdot 10^{-6}} \cdot 6 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-6} \cdot 480 \right) = 64,52;$$

Будуємо графік, який зображаємо на рис. 5.1

2) Втрати маси на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 44 дні, при гальванопарі на 1 м²:

- з катодом площею поверхні 20 см²:

$$\Delta m_2 = (1 - 0,91) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{73 \cdot 10^{-6}} \cdot 11 \cdot 10^{-6} + 8 \cdot 10^{-6} \cdot 1056 \right) = 149,25;$$

Також розраховуємо проміжне значення через 20 днів:

$$\Delta m_2 = (1 - 0,91) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{73 \cdot 10^{-6}} \cdot 11 \cdot 10^{-6} + 8 \cdot 10^{-6} \cdot 480 \right) = 144,91;$$

- з катодом площею поверхні 40 см²:

$$\Delta m_3 = (1 - 0,95) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{55 \cdot 10^{-6}} \cdot 19 \cdot 10^{-6} + 16 \cdot 10^{-6} \cdot 1056 \right) = 188,78;$$

Також розраховуємо проміжне значення через 20 днів:

$$\Delta m_3 = (1 - 0,95) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{55 \cdot 10^{-6}} \cdot 19 \cdot 10^{-6} + 16 \cdot 10^{-6} \cdot 480 \right) = 183,74;$$

Будуємо графік, який зображено на рис. 5.2 (а, б)

3) Втрати маси на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 85 дні, при гальванопарі на 1 м²:

- з катодом площею поверхні 20 см²:

$$\Delta m_4 = (1 - 0,91) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{17 \cdot 10^{-6}} \cdot 9,3 \cdot 10^{-6} + 8 \cdot 10^{-6} \cdot 2140 \right) = 528,32;$$

Також розраховуємо проміжне значення через 44 дні:

$$\Delta m_4 = (1 - 0,91) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{17 \cdot 10^{-6}} \cdot 9,3 \cdot 10^{-6} + 8 \cdot 10^{-6} \cdot 1056 \right) = 520,89;$$

- з катодом площею поверхні 40 см²:

$$\Delta m_5 = (1 - 0,95) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{14 \cdot 10^{-6}} \cdot 18 \cdot 10^{-6} + 15 \cdot 10^{-6} \cdot 2040 \right) = 685,78z;$$

Також розраховуємо проміжне значення через 44 дні:

$$\Delta m_5 = (1 - 0,95) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{14 \cdot 10^{-6}} \cdot 18 \cdot 10^{-6} + 15 \cdot 10^{-6} \cdot 1056 \right) = 678,09z;$$

Будуємо графік, який зображаємо на рис. 5.3 (а,б)

4) Втрати маси на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 106 днів, при гальванопарі на $1m^2$:

- з катодом площею поверхні 18 cm^2 :

$$\Delta m_6 = (1 - 0,9) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{14 \cdot 10^{-6}} \cdot 7 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} \cdot 2544 \right) = 534,23z;$$

Також розраховуємо проміжне значення через 50 днів:

$$\Delta m_6 = (1 - 0,9) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{14 \cdot 10^{-6}} \cdot 7 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1200 \right) = 527,14z;$$

Будуємо графік, який зображаємо на рис. 5.4 (а)

Втрати маси на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 116 днів, при гальванопарі на $1m^2$:

- з катодом площею поверхні 20 cm^2 :

$$\Delta m_7 = (1 - 0,91) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{14 \cdot 10^{-6}} \cdot 10 \cdot 10^{-6} + 9 \cdot 10^{-6} \cdot 2784 \right) = 693,34z;$$

Також розраховуємо проміжне значення через 60 днів:

$$\Delta m_7 = (1 - 0,91) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{14 \cdot 10^{-6}} \cdot 10 \cdot 10^{-6} + 9 \cdot 10^{-6} \cdot 1440 \right) = 681,99z;$$

- з катодом площею поверхні 40 cm^2 :

$$\Delta m_8 = (1 - 0,95) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{12 \cdot 10^{-6}} \cdot 19 \cdot 10^{-6} + 17 \cdot 10^{-6} \cdot 2784 \right) = 846,55z;$$

Також розраховуємо проміжне значення через 60 днів:

$$\Delta m_8 = (1 - 0,95) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{12 \cdot 10^{-6}} \cdot 19 \cdot 10^{-6} + 17 \cdot 10^{-6} \cdot 1440 \right) = 837,48z;$$

Будуємо графік, який зображаємо на рис. 5.4(б) і 5.5 (а)

5) Втрати маси на аноді після витримування в 3%-му NaCl через 126 днів, при гальванопарі 1м²:

- з катодом площею поверхні 18 см²:

$$\Delta m_9 = (1 - 0,9) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{10 \cdot 10^{-6}} \cdot 7 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} \cdot 2784 \right) = 745,14 \text{ г};$$

Також розраховуємо проміжне значення через 60 днів:

$$\Delta m_9 = (1 - 0,9) \cdot 10419,77 \left(\frac{1}{10 \cdot 10^{-6}} \cdot 7 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1440 \right) = 736,89 \text{ г};$$

Будуємо графік, який зображено на рис. 5.5 (б)

Розрахункові дані кожного зразка заносимо до табл.5.2

Рис. 5.1 Корозійні втрати маси експериментальних та теоретичних зразків в 3% NaCl через 32 дні, анод розмірами 1x1, катод розмірами 2x4,5.

а)

б)

Рис. 32 Корозійні втрати маси експериментальних та теоретичних зразків в 3% NaCl через 44 дні: а) анод розмірами 1x1, катод розмірами 2x5; б) анод розмірами 1x1, катод розмірами 6,7x5,4.

б)

а)

Рис. 5.3 Корозійні втрати маси експериментальних та теоретичних зразків в 3% NaCl, через 85 днів: а) анод розмірами 1x1, катод розмірами 2x5; б) анод розмірами 1x1, катод розмірами 3,7x5,4.

а)

б)

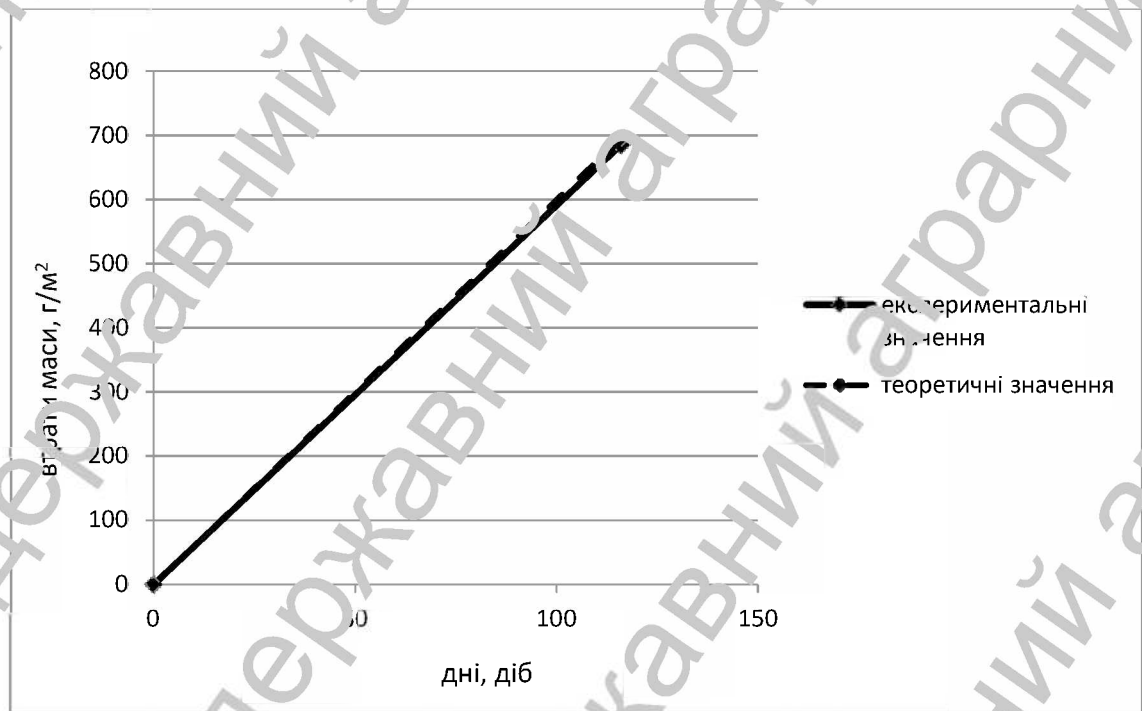


Рис. 5.4 Корозійні втрати маси експериментальних та теоретичних зразків в 3% NaCl: а) через 106 днів, анод розмірами 1x1, катод розмірами 2x4,5; б) через 116 днів, анод розмірами 1x1, катод розмірами 2x5.

8)

б)

Рис. 5.5 Корозійні втрати маси експериментальних та теоретичних зразків в 3% NaCl: а) через 116 днів, анод розмірами 1x1, катод розмірами 3,7x5,4; б) через 126 днів, анод розмірами 1x1, катод розмірами 2x4,5.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

6.1 Охорона праці

Аналіз шкідливих і небезпечних факторів, які діють на працюючих при експлуатації залізобетонних конструкцій в гальванічному цеху

Гальванічний цех характеризується шкідливими й небезпечними виробничими факторами, що призводять до типових професійних захворювань робітників. Так як повітря яке знаходиться місцевими виходами від гальванічної ванни, містить різні хімічні речовини, які є основними джерелами забруднення атмосфери. Таким чином, викид забруднюючих речовин в навколишнє середовище призводить до забруднення атмосферного повітря, яке впливає на стан здоров'я людини.

Шкідливі речовини можуть надходити в організм людини через органи дихання, шкіру. Особливо активні хімічні речовини потрапляють в організм робітника при високій температурі повітря. При вдиханні парів кислоти відзначається ураження слизової оболонки носоглотки і гортані, що може призвести до хронічного захворювання. При виконанні ручних операцій з

кислотою і лугом шкідливі речовини проникають через шкіру і можуть визвати роздратування і хімічні опіки шкірної поверхні робітника [20].

Більшість обладнання в гальванічному цеху харчується струмом, тому існує небезпека ураження електричним струмом. Підвищена вологість в приміщенні, наявність агресивних середовищ, можливість одночасного дотику людини з земляними частинами і корпусів електрообладнання дозволяють класифікувати гальванічні цехи по ступеню небезпеки ураження електричним струмом як особливо небезпечні приміщення.

Виявлені небезпечні та шкідливі фактори необхідно нейтралізувати. Для цього потрібно розробити систему промислової та екологічної безпеки на в цеху гальваніки.

Нормальні для роботи умови забезпечуються гарним освітленням, поточно-витяжною вентиляцією та підтриманням нормальної температури і вологості в цеху, тільки при виконанні цих умов можна зменшити зростання професійних захворювань у робітників.

Технічні засоби і організаційні заходи із зупинення дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів при експлуатації залізобетонних конструкцій у гальванічному цеху

Безпека праці при нанесенні гальванічних покриттів досягається в результаті впровадження комплексу технологічних будівельно-планувальних, санітарно-технічних і медико-профілактичних заходів. Частина цих заходів однакова для будь-якого виду гальванічних покриттів, інша частина обумовлена специфікою джерела небезпеки та характером небезпечних і шкідливих виробничих факторів конкретної технологічної операції.

Орієнтовна однотипність процесів і операцій гальванічного виробництва, їх багаторазова повторюваність дозволяють впровадити комплексну механізацію та автоматизацію з програмним управлінням, що дає можливість значно знизити витрати хімікатів і одночасно оздоровити виробниче середовище. При неможливості автоматизації процесу має бути забезпечена комплексна

механізація окремих операцій - підготовчих, транспортних, фінішних, зокрема, завантаження підвісок і виробів у ванни та їх вивантаження. Застосування ручних робіт допустимо при відсутності в технологічному процесі речовин 1-го і 2-го класів небезпеки і з використанням засобів колективного та індивідуального захисту.

Велике значення для безпеки праці має дотримання правил, що пред'являються до органів управління. При роботі на механічному обладнанні вимоги безпеки передбачаються спеціальною документацією для механічних цехів. Полірувальні та шліфувальні верстати обладнуються захисними екранами та місцевими відсмоктувачами, з'єднаними з механізмом пуску верстата. При застосуванні абразивного інструменту необхідно керуватися правилами і нормами безпечної роботи.

Технічні засоби і організаційні заходи із усунення дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів при експлуатації залізобетонних конструкцій у цеху гальванопари

Безпека праці при нанесенні гальванічних покриттів досягається в результаті впровадження комплексу технологічних будівельно-планувальних, санітарно-технічних і медико-профілактичних заходів. Частина цих заходів однакова для будь-якого виду гальванічних покриттів, інша частина обумовлена специфікою джерела небезпеки та характером небезпечних і шкідливих виробничих факторів конкретної технологічної сфери.

Орієнтовна однотипність процесів і операцій гальванічного виробництва, їх багаторазова повторюваність дозволяють впровадити комплексну механізацію та автоматизацію з програмним управлінням, що дає можливість значно знизити витрати хімікатів і одночасно оздоровити виробниче середовище. При неможливості автоматизації процесу має бути забезпечена комплексна механізація окремих операцій - підготовчих, транспортних, фінішних, зокрема, завантаження підвісок і виробів у ванни та їх вивантаження. Застосування ручних робіт допустимо при відсутності в технологічному процесі речовин 1-го

і 2-го класів небезпеки і з використанням засобів колективного та індивідуального захисту.

, знову прийняті на роботу, можуть бути допущені на роботу тільки після проходження первинного протипожежного інструктажу.

Для виконання завдань пожежної безпеки на підприємствах створюються добровільні пожежні дружини, що займаються попередженням пожеж та своїх робочих місцях і мають на випадок пожежі бойові розрахунки. Оснащені пожежною технікою. В якості засобів пожежогасіння використовується вода, хімічна піна, тверді і рідкі пожежогасячі речовини. В цехах повинні бути протипожежні пости, де "знаходяться пожежний інвентар, пічні вогнегасники і ящики з сухим піском. У разі виникнення пожежі в цеху необхідно відразу повідомити майстра або старшого зміни і викликати пожежну команду, а до її прибуття організувати гасіння пожежі, використовуючи для цього вогнегасники, пісок, воду та інші засоби [15].

Інженерні рішення з охорони праці та техніки безпеки при експлуатації залізобетонних конструкцій у гальванічному цеху

. Часто зустрічається справно діюча витяжна установка при повній відсутності припливної повітря, що надходить у приміщення через щілини у вікнах і дверях, чи не врівноважує убутку, викликані витяжкою, у зв'язку з чим утворюється сильне розрідження, шкідливі для людини. У гальванічному цеху неприпустимі прийом їжі і паління. Гальванічна майстерня повинна мати приміщення для переодягання, миття, прийому їжі, куріння. Під час перерв у роботі ванни слід прикривати

кришками. Під час тривалих перерв, наприклад, вночі вентиляція зазвичай вимикається і з ванн, незважаючи на їх прикриття, виділяються шкідливі випари. Перед входом з приміщення з ваннами слід включити вентиляційну установку причому вимикач повинен бути зовні приміщення. Тільки після 15-хв вентиляції можна увійти до приміщення, зняти кришки з ванн і приступити до роботи.

РОЗДІЛ 7

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В даній магістерській роботі була розроблена фізична модель – макрогальванічна пара, яка утворювалась з двох пластин з'єднаних ізолюваним провідником. Була доведена гіпотеза про те, що швидкість корозії арматури під бетонним покриттям може бути оцінена долею активної частини її поверхні під порами. При цьому швидкість руйнування адгезійних зв'язків з арматурою міжпорівного простору пропорційна його частці. Була розроблена методика експериментальних досліджень. В результаті чого було експериментально доведено, що збільшення доли міжпорової поверхні, що контактує з арматурою, призводить до збільшення швидкості корозії арматури за рахунок роботи макрогальванічних пар. Експериментально доведено, що велику небезпеку представляють великі пори, які ініціюють в першу чергу появу корозійних виразок в результаті спільної роботи мікро- і макрокорозійних пар. Були проведені експериментальні та теоретичні розрахунки по втратам маси, а також побудовані графіки кожного досліджуваного зразка. Співставляючи теоретичні та експериментальні результати дослідження було встановлено, що результати розрахунків агресивного середовища моделі задовільно співпадають з експериментальними даними.

Розроблена математична модель роботи елементарної макрогальванічної пари дозволила визначити роль геометричних параметрів гетерогенності поверхні арматури, електрохімічних параметрів та процес виразкової корозії арматури, встановити розподіл швидкості корозії в межах одного корозійного гирла. Тому комбінування електрохімічних і гравіметричних експериментів дозволяє виконувати довгостроковий прогноз корозійних втрат сталеві арматури під бетонним покриттям в конкретних умовах діючого агресивного середовища.

Список використаних джерел

1. Чехов, А. П., & Глущенко, В. М. (1994). Захист будівельних конструкцій від корозії. К.: Вища школа.
2. Байрачний, Б. І., Тульський, Г. Г., Штефан, В. В., & Токарева, І. А. (2016). Технічна електрохімія. Частина V. Сучасні хімічні джерела струму, електроліз розплавів, електросинтез хімічних речовин. Харків: НТУ «ХП».
3. Плугін, А. А., Плугін, А. М., Каганонський, О. С., Градбоєв, О. В. (2013). Колоїдна хімія та фізико-хімічна механіка як основа виробництва ресурсозберігачих мінеральних в'язких речовин та вискоефективних композиційних матеріалів на їх основі. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту, (138), 7-18.
4. ДСТУ 2651:2005. Сталь вуглецева звичайної якості. Марки .
5. ДСТУ 2904-94. Кислота соляна синтетична технічна. Технічні умови.
6. ДСТУ 4484:2005 «Прокат сортовий і фасольний із сталі вуглецевої звичайної».
7. Бондар Л.В., Бондар В.О. Особливості корозії арматури надземних залізобетонних конструкцій виробничих будівель та споруд. Деп. 10.07.95 в ДНТБ України, №1758 Ук, 95.
8. Zybur A. a. m// Opis elektrodyfuzyjnego procesu korjzji zbrojenia w zelebecide/ Arch. inz. lad - - 1989.-35, №4,-с.63-79.
9. Бондар, Л. В., Бондар, В. О., & Попович, Н. М. (2021). Використання конструктивних рішень будівель і споруд, умов експлуатацій при влаштуванні електрохімічного захисту арматури залізобетонних конструкцій Publishing House “Baltija Publishing”.
10. Стоєв П. І., Пшовченко С. В., Гірка І. О., Грицина В. Т. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник : Харків, ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с. ISBN 978-966-285-548-7.

11. Інгібітор. [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%8%D0%BD%D0%8%D1%96%D0%B%D1%96%D1%82%D0%BE%D1%80>.
12. Валовой, О. І., Валовой, М. О., & Сіянко, Б. Г. Захист металевих будівельних конструкцій від корозії (Doctoral dissertation. Криворізький національний університет), (2022)
13. В.Г. Поклонський, О.А. Фесенко, В.Г. Тарасюк та ін. Розрахунок залізобетонних конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 2. Практичний посібник. Київ: Інтертехнологія, 2016. 83 с. ISBN 978-966-97486-0-7 http://pb.puzd.edu.ua/images/ppnp/MethodVudavnDiyal/12_.pdf.
14. Л.Й. Дворкін. Гідротехнічні бетони : навч. посібник. Київ : Каравела. 2023. 285 с.
15. Биробництво залізобетонних конструкцій і виробів: довідник/ під заг. редакцією Гоца В.І.-К.. Основа, 2019. 464 с.
16. О. М. Пшіцько, М. В. Савицький, А. М. Зінкевич. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій : навчальний посібник. Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро, 2018. 220 с. ISBN 978-966-8471-86-5 <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi71/0051990.pdf>
17. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шелюк П. С. Бетони і будівельні розчини: підручник Київ: Основа, 2016. 568 с.
18. Потенціал електрохімічної корозії. Схема процесу електрохімічної корозії металів. <http://www.korstanta.kiev.ua/ua/publications/str349/5780>
19. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії загальні технічні вимоги (ГОСТ 31334:2008, neq)
20. Охорона праці. Інструкція з охорони праці при експлуатації електроустановок до 1000В в установах та закладах освіти. http://oipb.at.ua/load/instrukciya_z_okhoroni_praci_pri_eksplyuatacii_elektroustanovok_do_1000_v_v_ustanovakh_ta_zakladakh_osviti/3-1-0-1812