



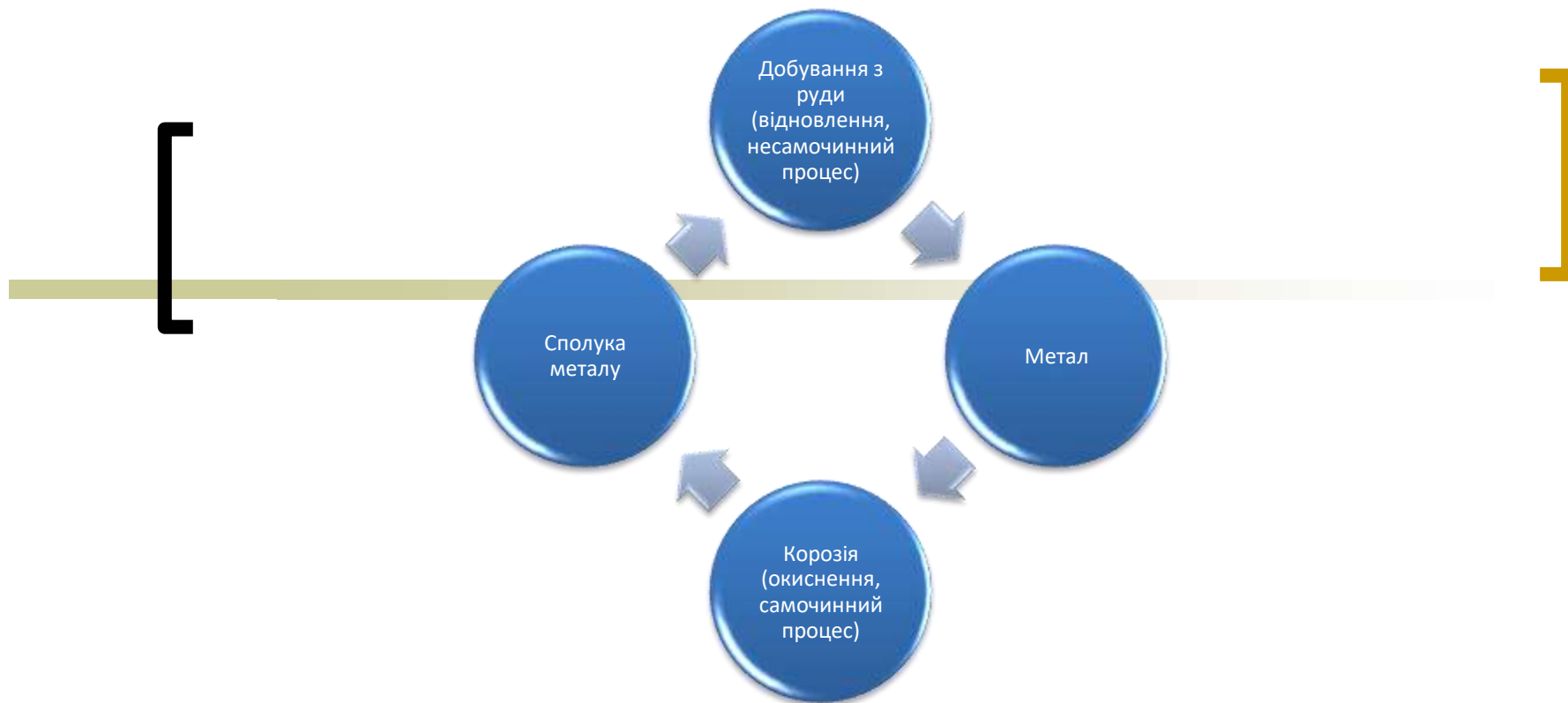
Лекція

КОРОЗІЯ МЕТАЛІВ



Корозія металів

- причини корозії
- класифікація корозійних процесів
- кількісні характеристики корозії
- фактори корозії



- **Корозія** – самочинний ($\Delta G < 0$) гетерогенний окисно-відновний процес взаємодії металу з компонентами зовнішнього середовища, в результаті якого відбувається:
 - погіршення експлуатаційних властивостей металу і його руйнування;
 - забруднення навколишнього середовища.

Корозія




Корозія

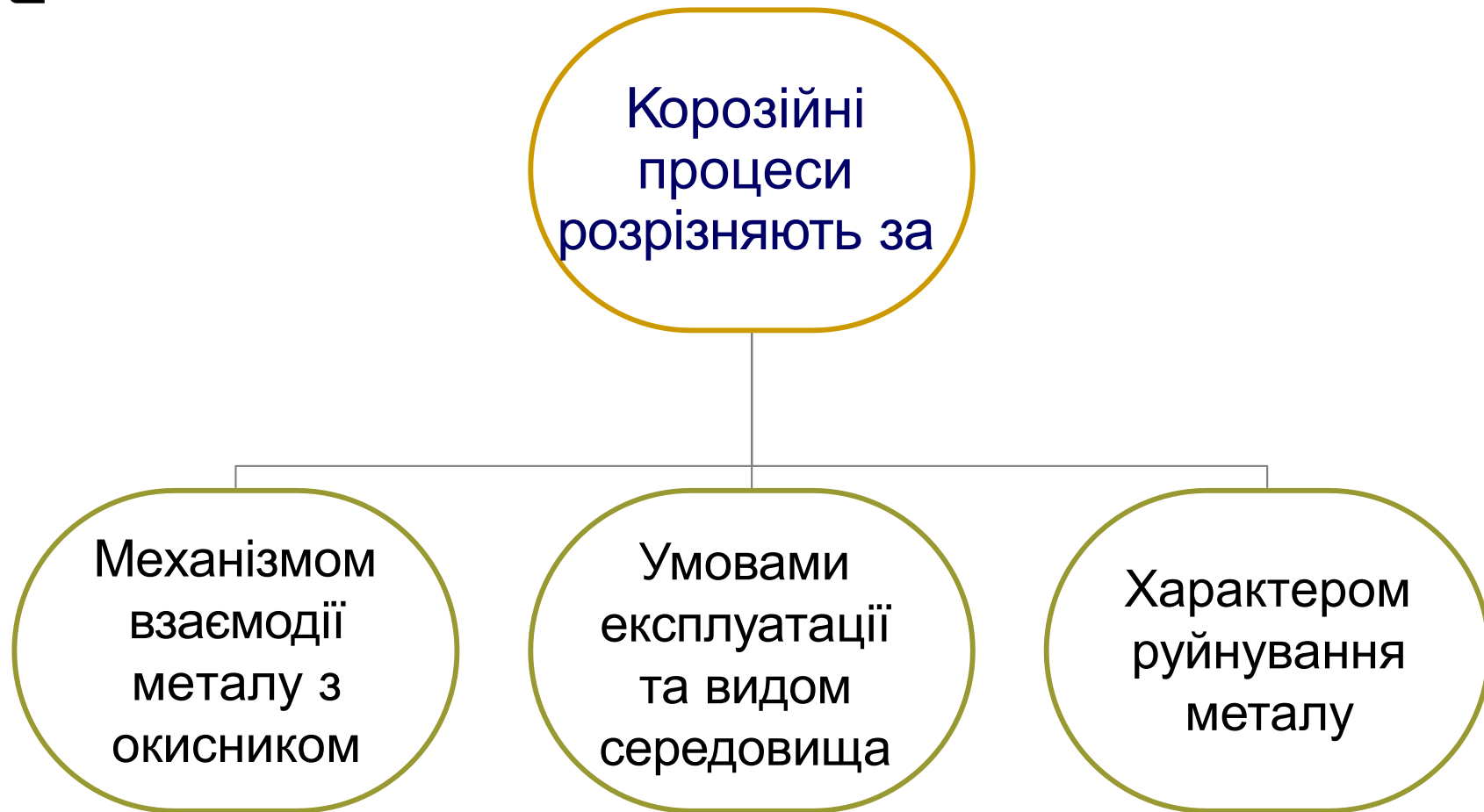


[Корозія]



- 
- A decorative graphic consisting of a horizontal line with a gradient from light green to white. On the left side, there is a large black left square bracket. On the right side, there is a large yellow right square bracket.
- Головною причиною корозії є термодинамічна нестійкість метала в оточуючому середовищі, особливо за присутності кисню.
 - **Корозійний процес** включає дві паралельні (спряжені) реакції:
 - окиснення метала
 - відновлення окисника: O_2 , H_2O , H^+ та ін.

Класифікація корозійних процесів

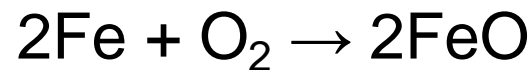


Класифікація за механізмом



Хімічна корозія

- Безпосередня взаємодія метала та окисника, коли немає конденсації вологи на міжфазній межі:



- Умови
 - корозія в сухих агресивних газах (F_2 , Cl_2 , NO_2 , SO_2 та ін.) за високих температур;
 - корозія в неелектропровідних рідинах – скрапленому газі, нафті, олії та ін.

Електрохімічна корозія

- **Електрохімічна корозія** відбувається у електропровідному середовищі за присутності вологи. Включає дві спряжені реакції на різних ділянках поверхні метала:

- **анодна** – окиснення метала M з утворенням катіону і вивільненням електронів:

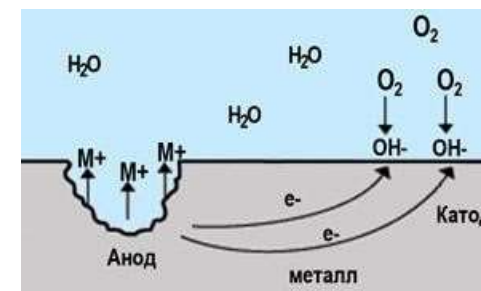
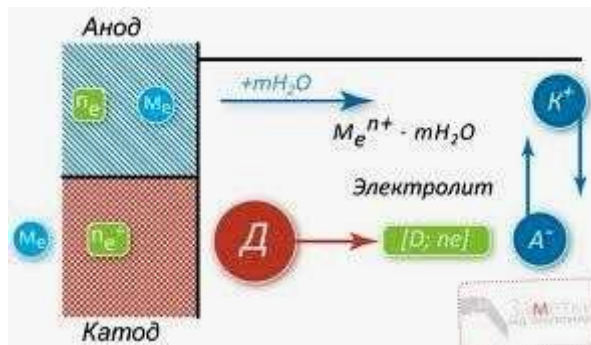
e^-



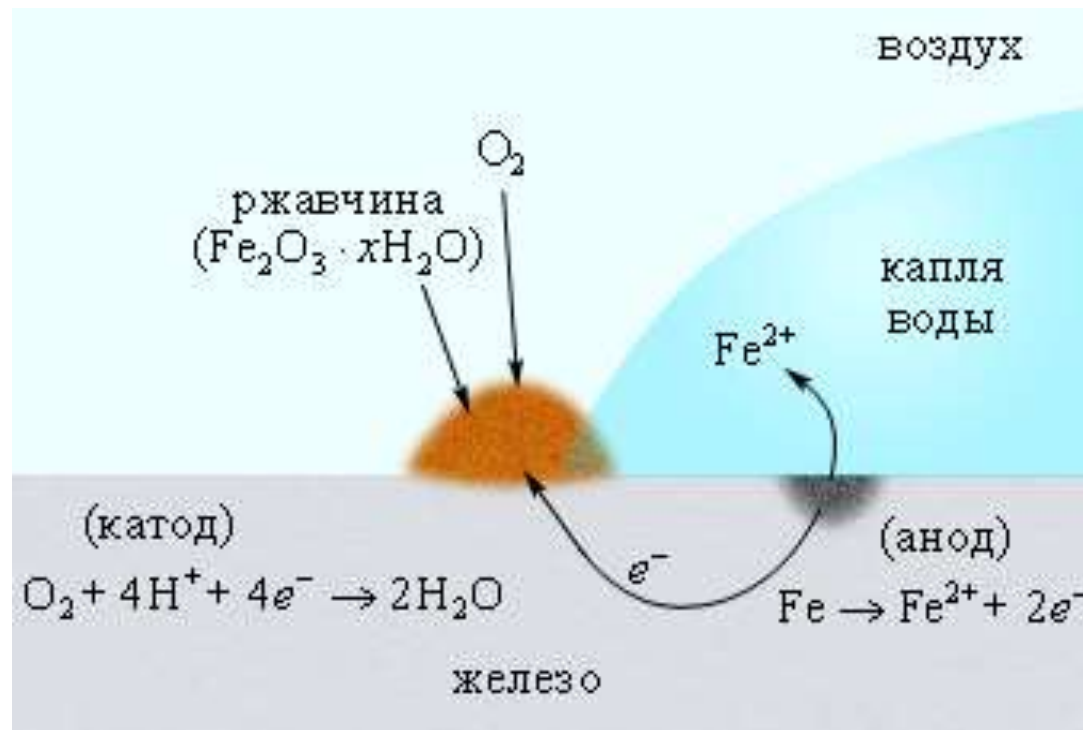
- **катодна** – відновлення окисника (деполяризатора) D



електрони переміщуються від анодних ділянок до катодних.



Електрохімічна корозія заліза

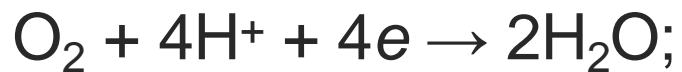


- Вторинна реакція в об'ємі $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$
- І далі можливо доокиснення Fe (II) до Fe (III) :
 $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$

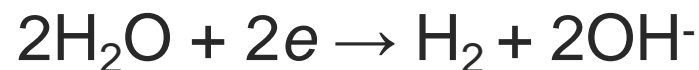
Типи деполяризаторів

- Необхідною і достатньою умовою корозії метала є наявність у середовищі деполяризатора, ОВП якого вищий потенціалу метала: $E(M^{z+}/M) < E(D)$.

Кисле середовище :



Нейтральне та лужне середовище:

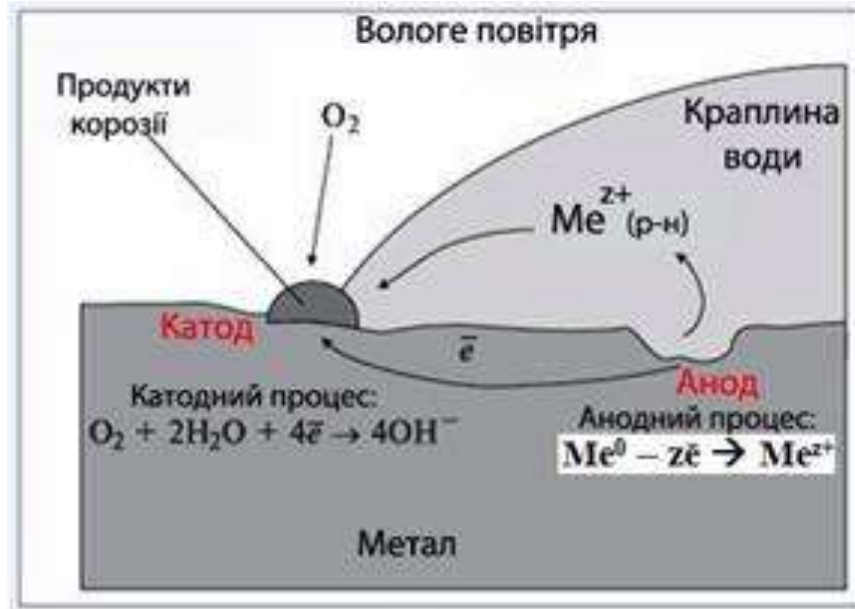


- Потенціали відновлення деполяризатора розраховують як:

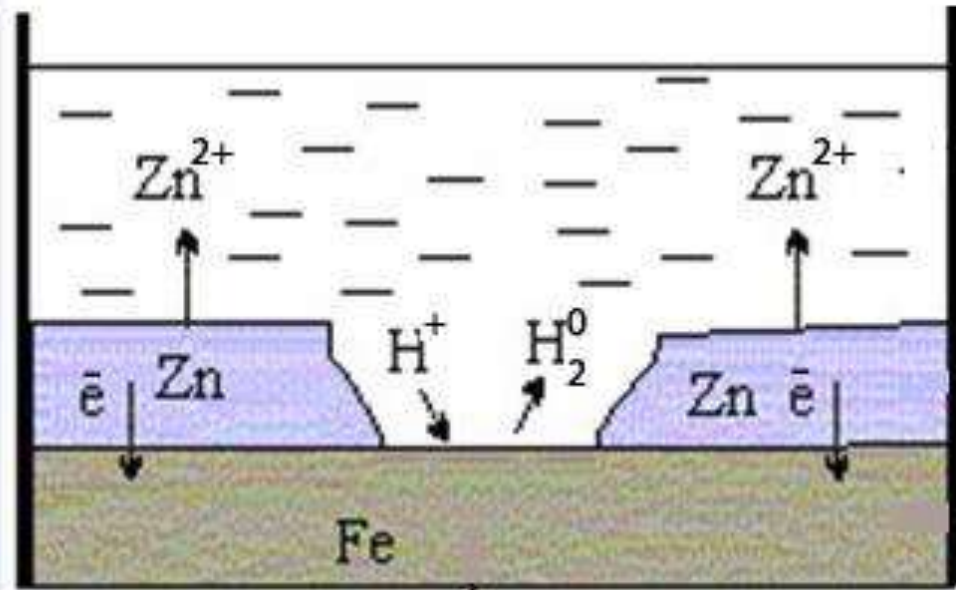
Водень $E_H = -0,059pH$

Кисень $E_O = 1,23 - 0,059pH$

Типи деполяризаторів



а



б

Схема корозії металу: а) з кисневою деполяризацією; б) з водневою деполяризацією

Корозійний процес, що супроводжується поглинанням і відновленням на катоді газоподібного кисню O_2 , називається **корозія з кисневою деполяризацією**. Корозійний процес, при якому на катоді відновлюються йони гідрогену H^+ і виділяється газоподібний водень H_2 , називається **корозія з водневою деполяризацією**.

Біологічна корозія

- відбувається під додатковим впливом біологічних факторів – мікро- (бактерії, віруси, грибки) або макро- організмів (рослин і тварин), життєві цикли яких ініціюють або прискорюють реакції.



Бактерія *thiobacillus ferrooxidans* отримує енергію шляхом окиснення Fe^{2+} до Fe^{3+} , переміщуючи електрони на O_2 . Вона також окислює сірку з утворенням H_2SO_4 .

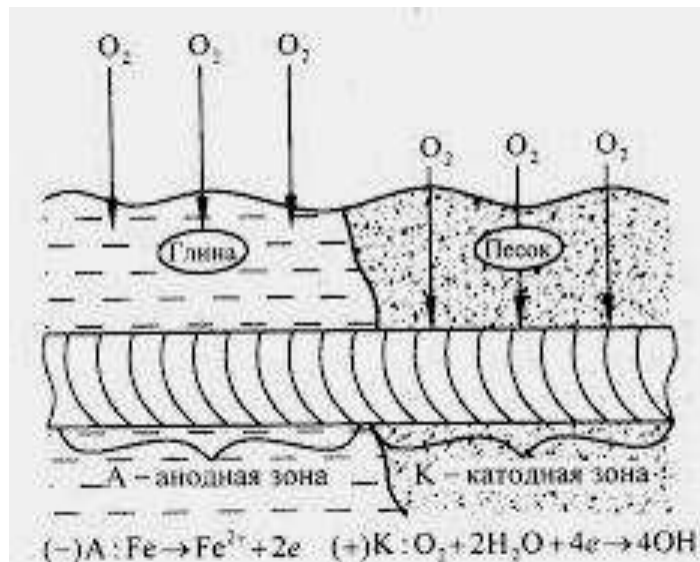
Класифікація за умовами експлуатації

- **Атмосферна корозія** – руйнування метала під дією температури і вологості, особливо під дією вологих газів (CO_2 , SO_2 , NO_2 , NH_3 , HCl), частинок солі, вугільного пилу та ін.



Класифікація за умовами експлуатації

- **Підземна корозія** – метал руйнується у ґрунті різного хімічного складу, вологості, ступеня пористості і аерації.



Класифікація за умовами експлуатації

- **Морська корозія** – у морській воді й атмосфері, які відрізняються високою концентрацією хлорид-іонів, електропровідністю, різним іонним і газовим складом та додатковою дією біологічних факторів.



За характером пошкодження метала

Вид корозії

Загальна

рівномірна

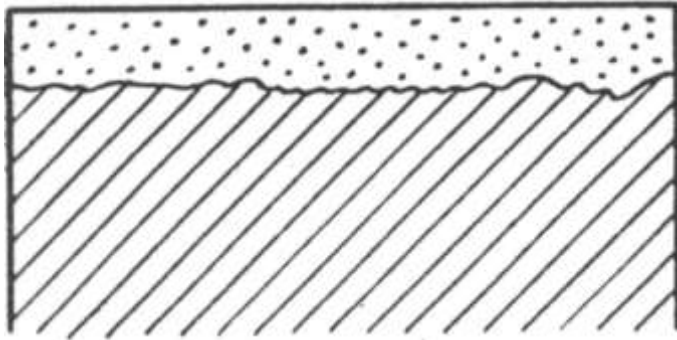
нерівномірна

Локальна

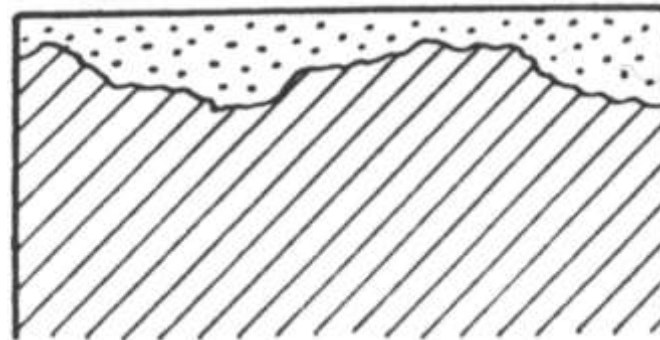
точкова,
пітингова

між- та транс-
кристалітна

[Суцільна корозія]

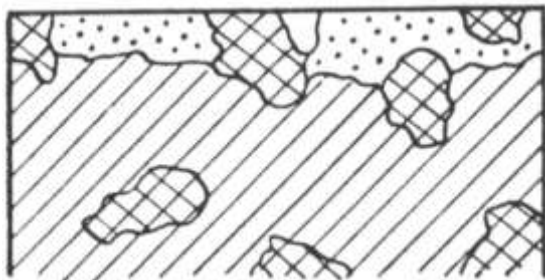


Рівномірна

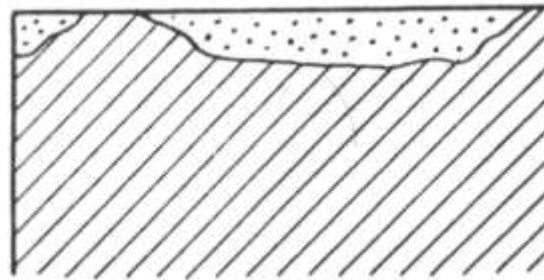


Нерівномірна

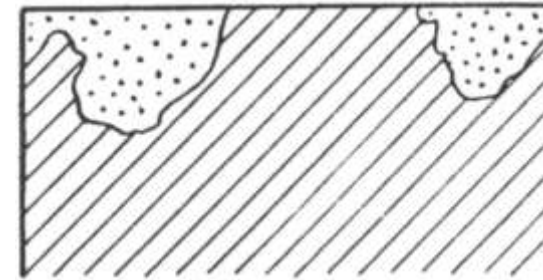
Локальна корозія



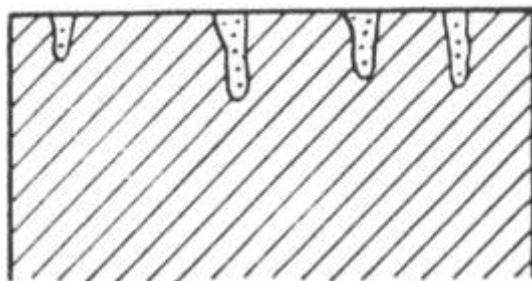
Структурно-селективна



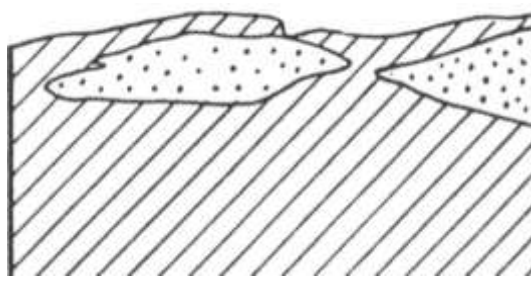
плямами



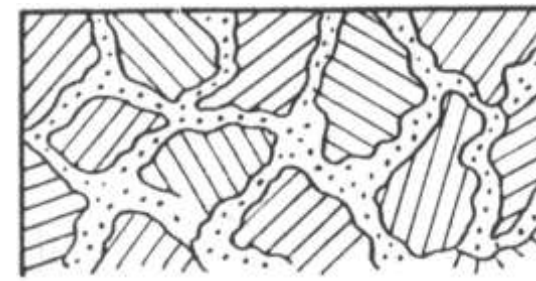
виразкова



пітингова



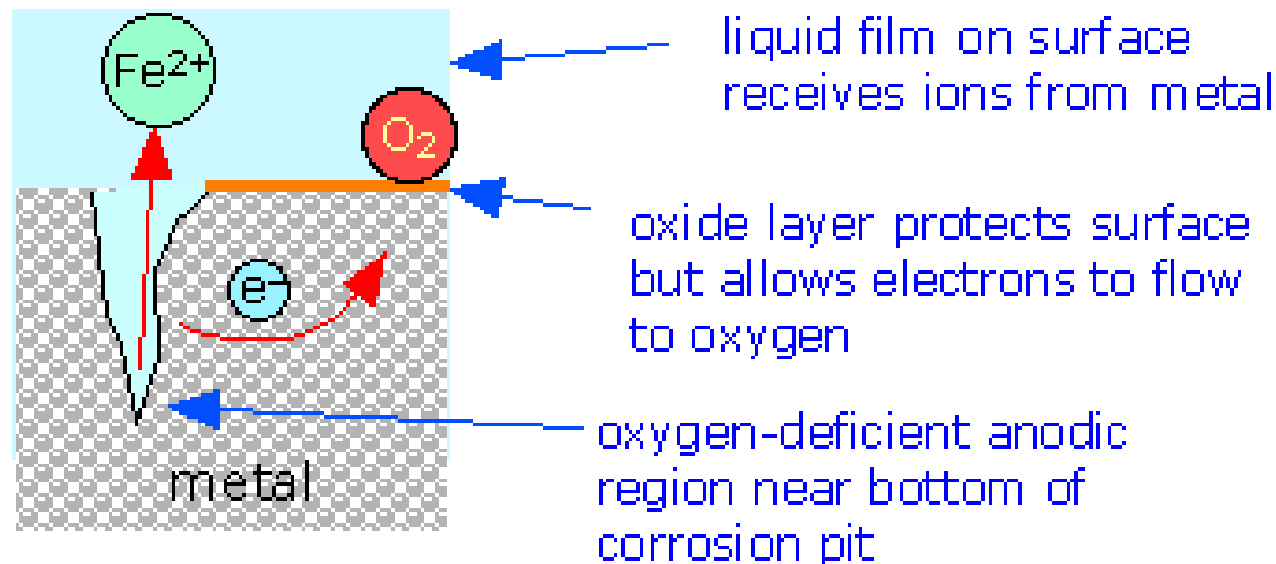
підповерхнева



міжкристалітна

Пітингова корозія

- Більшість металів на повітрі вкриті плівкою оксидів, яка заважає їх руйнуванню.
- За присутності Cl^- іонів плівка може руйнуватися, і зароджується пітинг – анодна ділянка. Катодна реакція відновлення деполяризатора відбувається у гирлі пітинга або на всій поверхні.
- Пітинг розповсюджується вглиб, оскільки відбувається підкислення середовища за рахунок гідролізу катіонів металу.



Кількісні характеристики корозії

Показник швидкості корозії

масовий

K_m

$\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$

глибинний

K_h

$\text{мм} \cdot \text{рік}^{-1}$

ТОКОВИЙ

$I_{\text{кор}}$

$\text{мкА} \cdot \text{м}^{-2}$

Масовий і глибинний показники

$$K_m = \frac{\Delta m}{S \cdot t},$$

де Δm – зміна маси, г;

S – площа поверхні металу, м²;

t – час корозійного руйнування, год.

$$K_h = \frac{h}{t},$$

де h – глибина проникнення корозії, мм;

t – час корозійного руйнування, рік.

Фактори корозії

Внутрішні

Зовнішні

Природа металу

Чистота поверхні

Склад та структура сплавів

pH середовища

Концентрація O₂

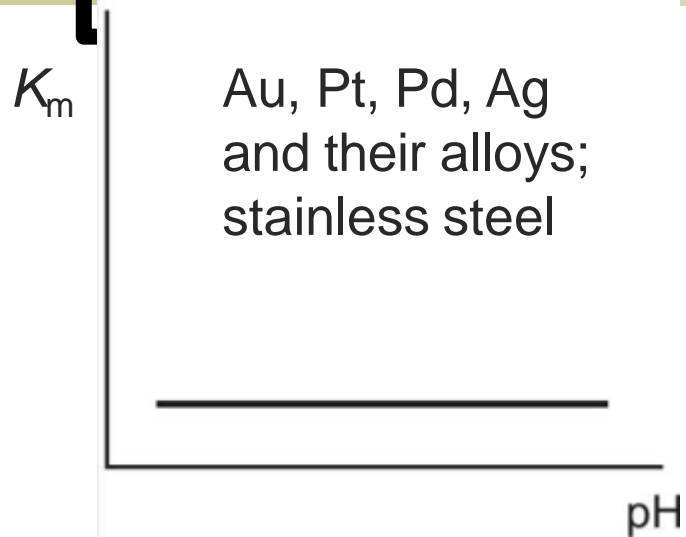
Іонний та газовий склад середовища

| metal | E^0, V | metal | E^0, V | metal | E^0, V | metal | E^0, V |
|----------------------|----------|----------------------|----------|----------------------|----------|------------------------------------|----------|
| Li+/Li | -3,045 | Al ³⁺ /Al | -1,663 | Co ²⁺ /Co | -0,277 | Tc ²⁺ /Tc | 0,400 |
| Rb+/Rb | -2,925 | Zr ⁴⁺ /Zr | -1,529 | Ni ²⁺ /Ni | -0,250 | Co ³⁺ /Co | 0,400 |
| K+/K | -2,924 | Ti ²⁺ /Ti | -1,210 | In+/In | -0,250 | Ru ²⁺ /Ru | 0,450 |
| Cs+/Cs | -2,923 | V ²⁺ /V | -1,186 | Mo ³⁺ /Mo | -0,200 | Cu+/Cu | 0,521 |
| Ba ²⁺ /Ba | -2,905 | Mn ²⁺ /Mn | -1,179 | W ³⁺ /W | -0,150 | Rh ²⁺ /Rh | 0,600 |
| Sr ²⁺ /Sr | -2, 888 | Ta ³⁺ /Ta | -1,126 | Sn ²⁺ /Sn | -0,139 | Os ²⁺ /Os | 0,700 |
| Ca ²⁺ /Ca | -2, 866 | Nb ³⁺ /Nb | -1,100 | Pb ²⁺ /Pb | -0,126 | Tl ³⁺ /Tl | 0,710 |
| Na+/Na | -2,714 | Cr ²⁺ /Cr | -0,912 | Fe ³⁺ /Fe | -0,037 | Hg ₂ ²⁺ /2Hg | 0,789 |
| Ac ³⁺ /Ac | -2,600 | V ³⁺ /V | -0,835 | 2H+/H ₂ | 0,000 | Ag+/Ag | 0,789 |
| La ³⁺ /La | -2,522 | Zn ²⁺ /Zn | -0,763 | Ge ²⁺ /Ge | 0,000 | Pb ⁴⁺ /Pb | 0,800 |
| Nd ³⁺ /Nd | -2,431 | Cr ³⁺ /Cr | -0,744 | Sn ⁴⁺ /Sn | 0,009 | Hg ²⁺ /Hg | 0,854 |
| Y ³⁺ /Y | -2,372 | Ga ³⁺ /Ga | -0,529 | Bi ³⁺ /Bi | 0,215 | Pd ²⁺ /Pd | 0,987 |
| Mg ²⁺ /Mg | -2, 363 | Fe ²⁺ /Fe | -0,440 | Sb ³⁺ /Sb | 0,240 | Ir ²⁺ /Ir | 1,100 |
| Sc ³⁺ /Sc | -2,077 | Cd ²⁺ /Cd | -0,403 | As ³⁺ /As | 0,300 | Pt ²⁺ /Pt | 1,188 |
| Be ²⁺ /Be | -1, 847 | In ³⁺ /In | -0,343 | Re ³⁺ /Re | 0,300 | Au ³⁺ /Au | 1,498 |
| Hf ⁴⁺ /Hf | -1,700 | Tl+/Tl | -0,336 | Cu ²⁺ /Cu | 0,340 | Au+/Au | 1,692 |

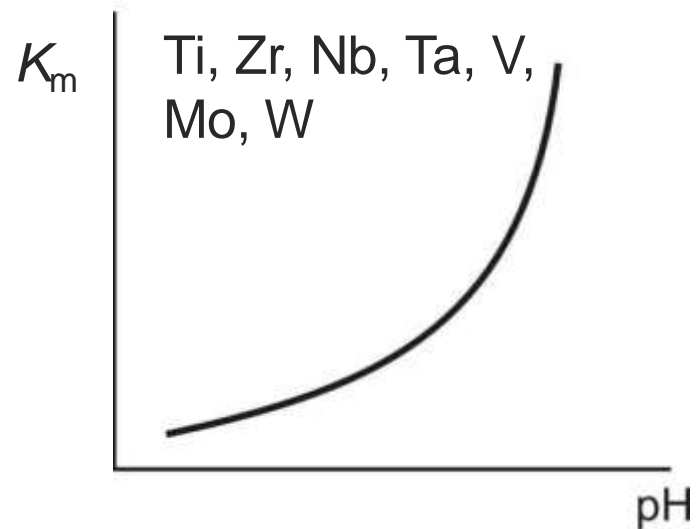
Природа метала

- Чим менший потенціал метала, тим вища швидкість його корозії за інших рівних умов.
- Формування суцільної оксидної плівки на поверхні метала в умовах атмосфери сприяє пасивності.
- За схильністю до пасивації метали розташовують у ряд:
Ti > Zr > Ta > Nb > Al > Cr > Be > Mo > Mg >
> Ni > Co > Fe > Mn > Zn > Cd > Cu.
- За рахунок оксидної плівки корозійна стійкість Al|Al₂O₃ в умовах атмосфери близька до стійкості Cu, але термодинамічна стійкість міді вища, ніж у Al.

Вплив рН

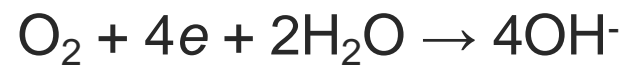
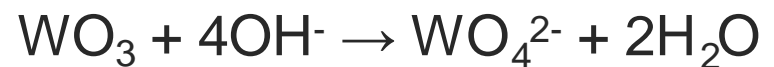


- Т/д стійки метали

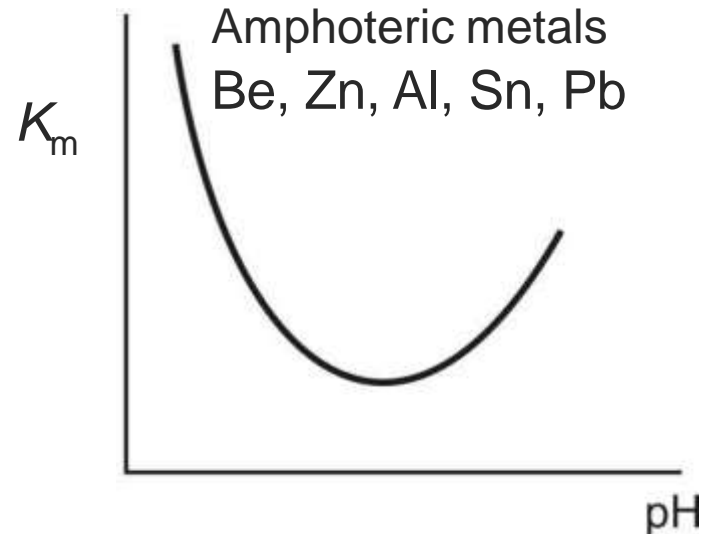
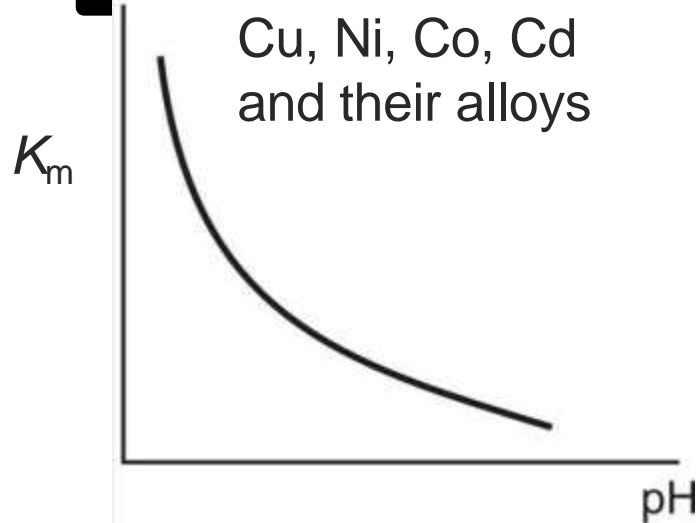


Оксидні плівки (MO_2 , M_2O_5 , MO_3).

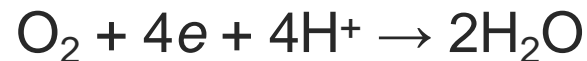
У лужному середовищі:



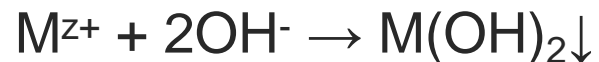
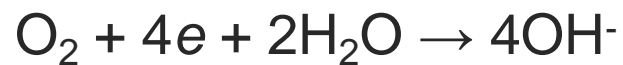
Вплив рН



- у кислому середовищі: $M - ze \rightarrow M^{z+}$



У нейтральному і лужному:



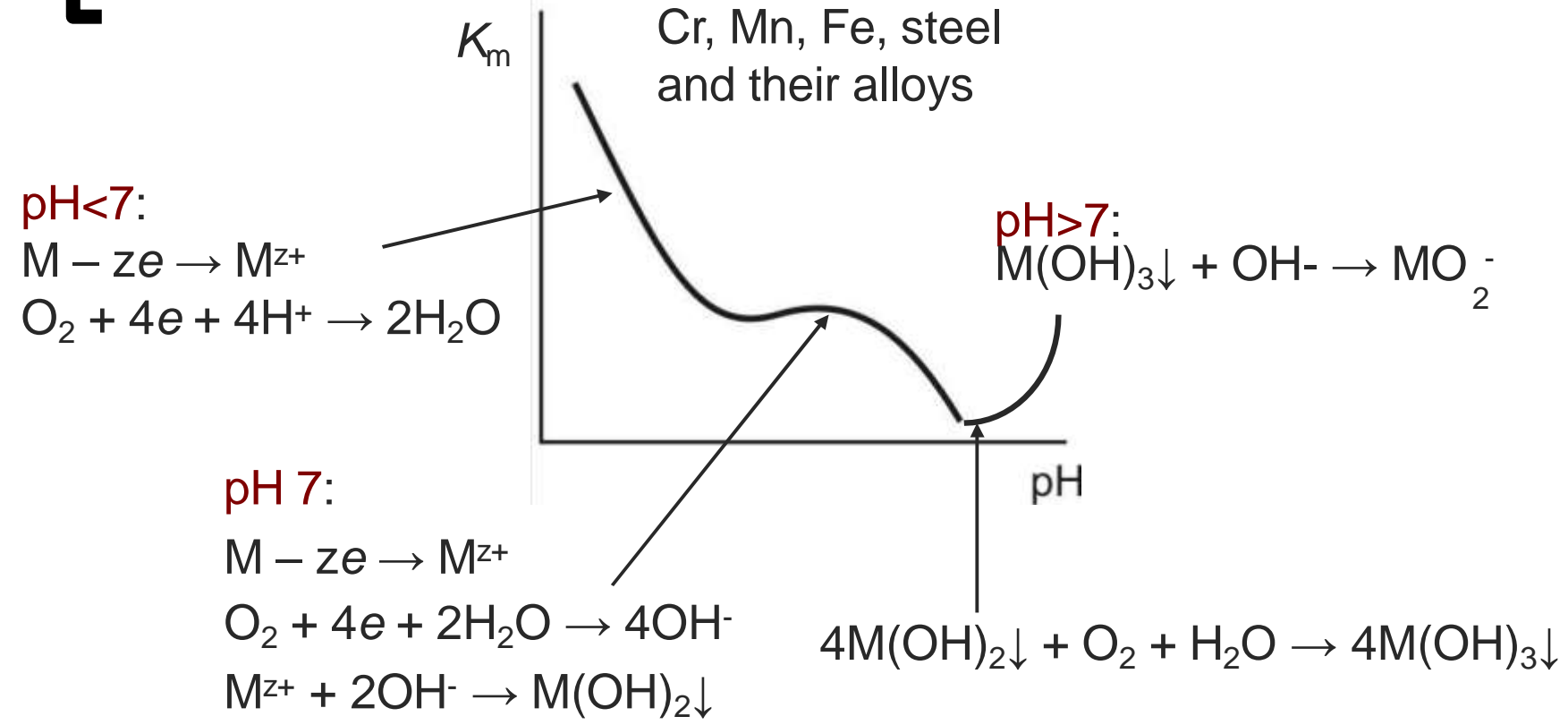
У нейтральному:



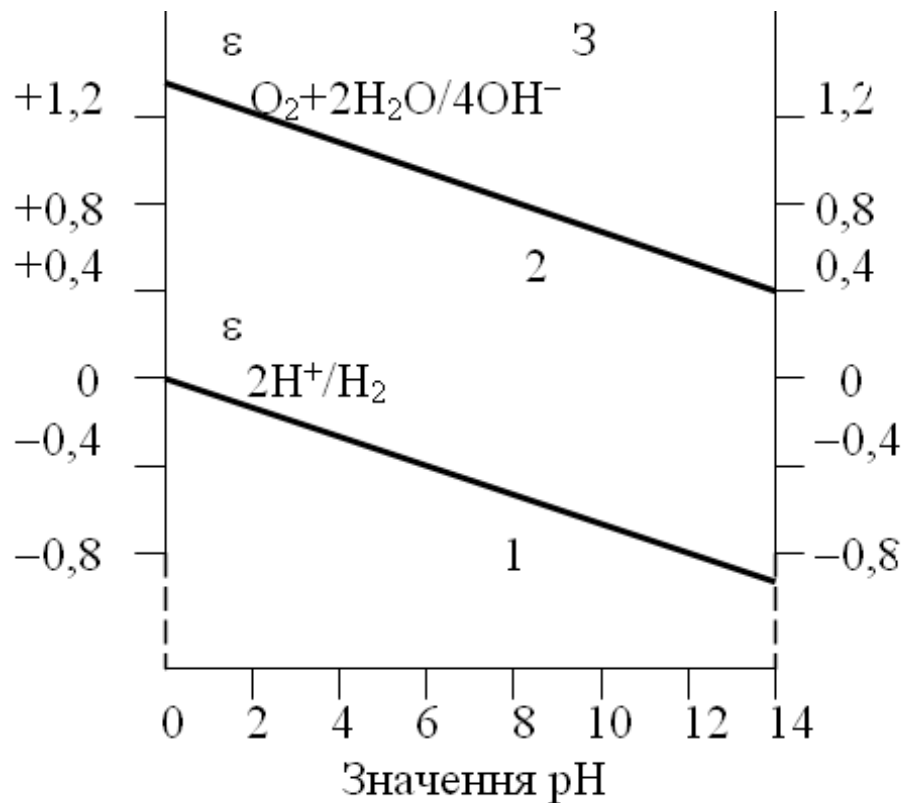
У лужному:



Вплив рН

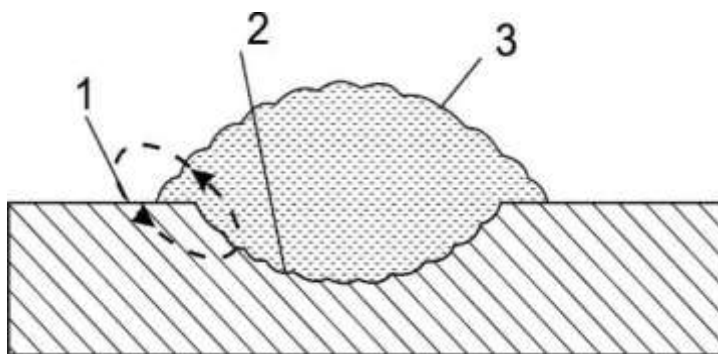


Вплив рН

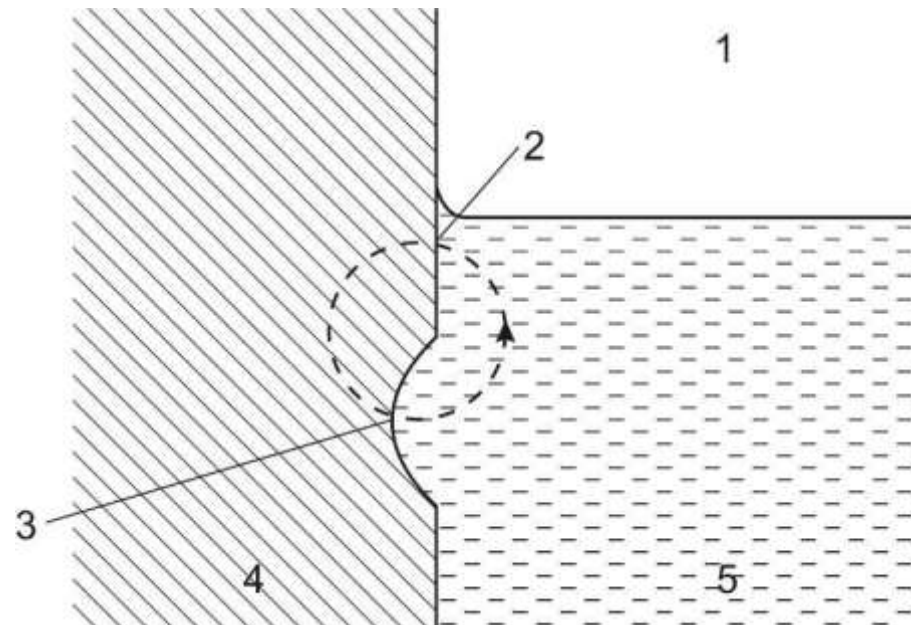


- корозія можлива, коли потенціал окисника в корозійному середовищі більш додатний, ніж потенціал металу.
- 3 – метал не кородує;
- 2 - метал кородує з кисневою деполяризацією;
- 1 - корозія металу можлива як з кисневою, так і з водневою деполяризаціями.

Вплив концентрації O_2



Катодна реакція (1)
відбувається на ділянках з
більшею концентрацією O_2 ,
анодна (2) – під шаром
продуктів корозії (3)

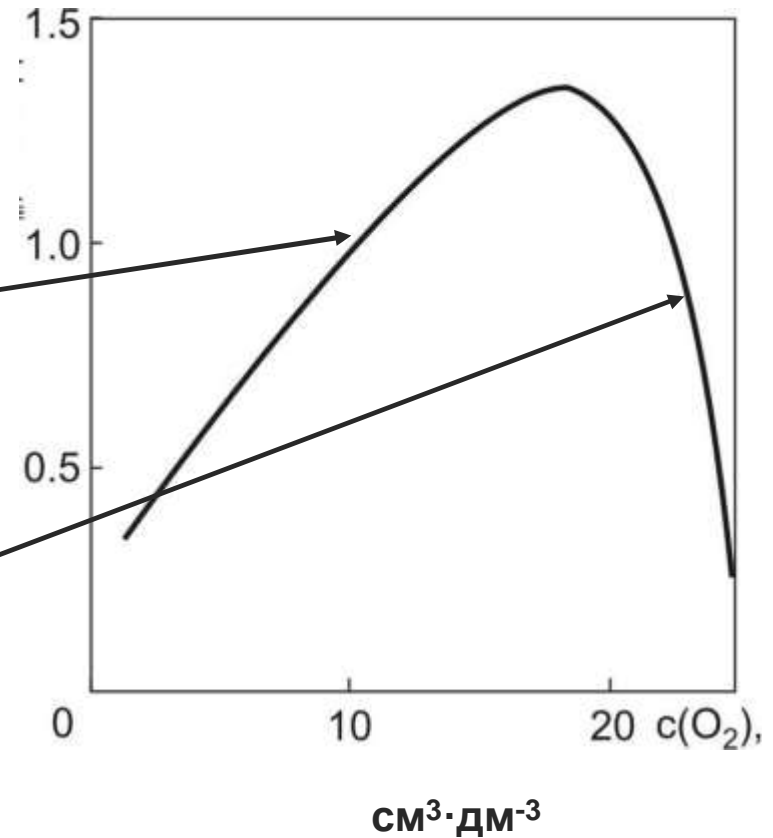


1 – повітря,
2 – катодна реакція,
3 – анодна реакція,
4 – метал,
5 – морська вода.

Вплив концентрації O_2

- $O_2 + 4e + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
- $O_2 + 4e + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$
- $v = k \cdot c(O_2) \cdot c(H^+)^4$
- $v = k \cdot c(O_2) \cdot c(H_2O)^2$
- Пасивація за рахунок утворення оксиду

$K_m, \text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1}$

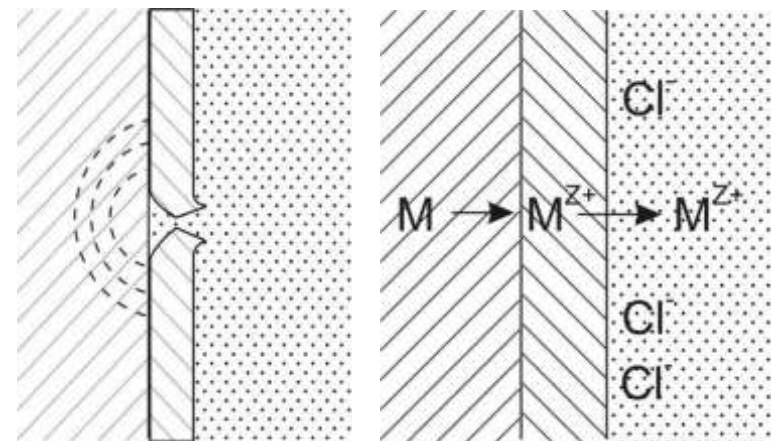
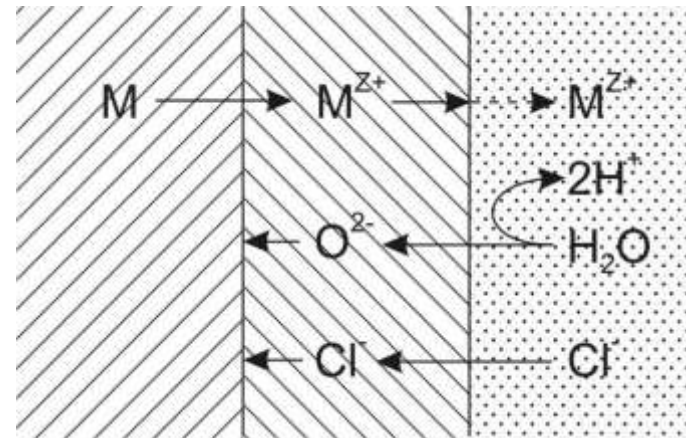


Активатори корозії

- **Аніони**, які руйнують оксидну плівку і запобігають пасивації. За активуючою дією аніони розташовують у ряд:

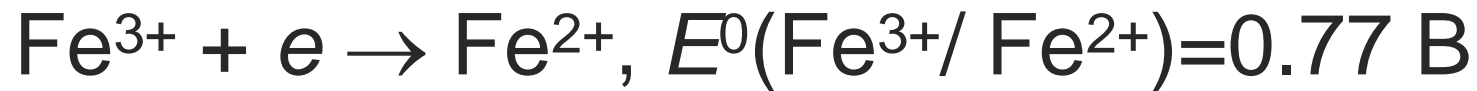


- Речовини, які утворюють розчинні продукти корозії:
 NH_3 , F^- , CN^- , CNS^- ,
 OH^- – для амфотерних металів

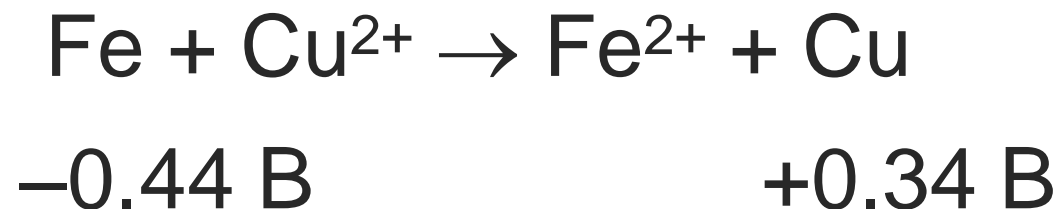


Активатори корозії

- катіони металів різної валентності:



- катіони менш активних металів, які є окисниками:

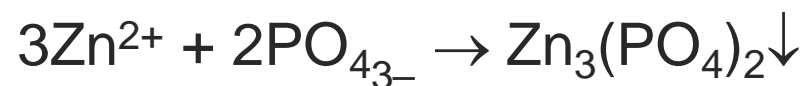


Сповільнювачі корозії

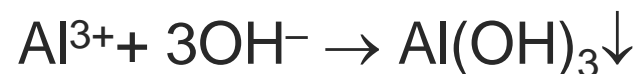
- **аніони – окисники** (CrO_4^{2-} , $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, NO_3^- , NO_2^- , MnO_4^- , WO_4^{2-} , MoO_4^{2-} ,) формують оксиди на поверхні метала:



- **аніони – пасиватори** (S^{2-} , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , OH^- , SiO_3^{2-}) утворюють нерозчинні продукти:



- **катиони більш активних металів** (Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} та інш) утворюють нерозчинні гідроксиди з OH^- -іонами:



Контакт металів

- Наступний метал прискорює корозію попереднього в одній групі;
- метал наступної групи прискорює корозію металів попередньої.
- метали однієї групи можна безпосередньо поєднувати у приладах, пристроях та конструкціях.

| Група | Метал |
|-------|-------------------------------------|
| I | Mg |
| II | Zn, Al та їх сплави, Cd |
| III | Fe, сталь, Sn, Pb |
| IV | Ni, Cr, хромисті та Ni-вмісні сталі |
| V | Cu-Ni, Cu-Sn, Cu-Zn сплави, Cu, Ag |
| VI | Pt, Pd, Au та їх сплави |



Захист металів від корозії



Методи захисту

- **Активні** – змінюють природу метала і середовища або механізм і кінетику корозії:
 - легування;
 - зниження агресивності середовища,
 - видалення деполяризаторів,
 - додавання інгібіторів,
 - електрохімічний захист.

Методи захисту

- **Пасивні** – не впливають на природу метала і механізм корозії та спрямовані на ізоляцію конструкції від агресивного середовища;
- **Пасивно-активні** не впливають на природу метала, але дещо змінюють механізм корозії – ізоляція поверхні металевими і неметалевими неорганічними покриттями.



Методи впливу на метал

- Вибір матеріалів
- Легування сталі
- Обробка поверхні
- Покриви



ВИБІР МАТЕРІАЛІВ

корозійно стійких у конкретному
агресивному середовищі

✓ **Метали та сплави**

✓ **Неметалеві** [гуми, пластмаси, кераміка,
вуглець і графіт, дерево]

Вибір матеріалу

| № | Середовище | Рекомендований метал |
|---|-----------------------------------|----------------------|
| 1 | HNO_3 | Нержавіюча сталь |
| 2 | NaOH | Ni та його сплави |
| 3 | HF | Монель (Ni-Cu) |
| 4 | HCl | Хастеллой (Ni-Cr-Mo) |
| 5 | Розведена H_2SO_4 | свинець |

Вибір матеріалу

| № | Середовище | Рекомендований метал |
|----|------------------------------------|----------------------|
| 6 | Атмосфера | Al |
| 7 | Дистильована вода, харчові кислоти | Sn |
| 8 | Гарячий розчин сильних окисників | Ti |
| 9 | Змінний опір | Ta |
| 10 | Концентрована H_2SO_4 | Сталь |

Легування

- додавання до складу металу компонентів, які підвищують схильність до пасивації, знижують катодну або анодну активність сплаву, запобігають структурній корозії.
- Легуючі домішки поділяють на макро – 5-20 % і мікро – до 3 %.

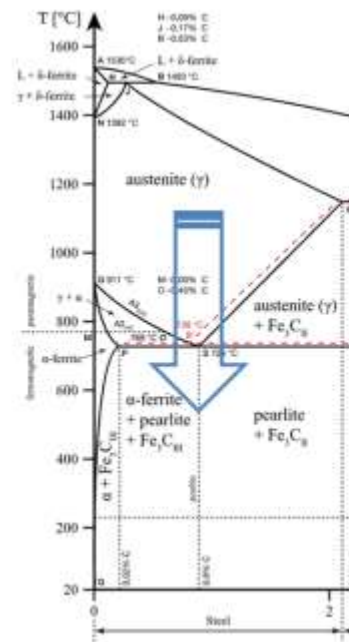
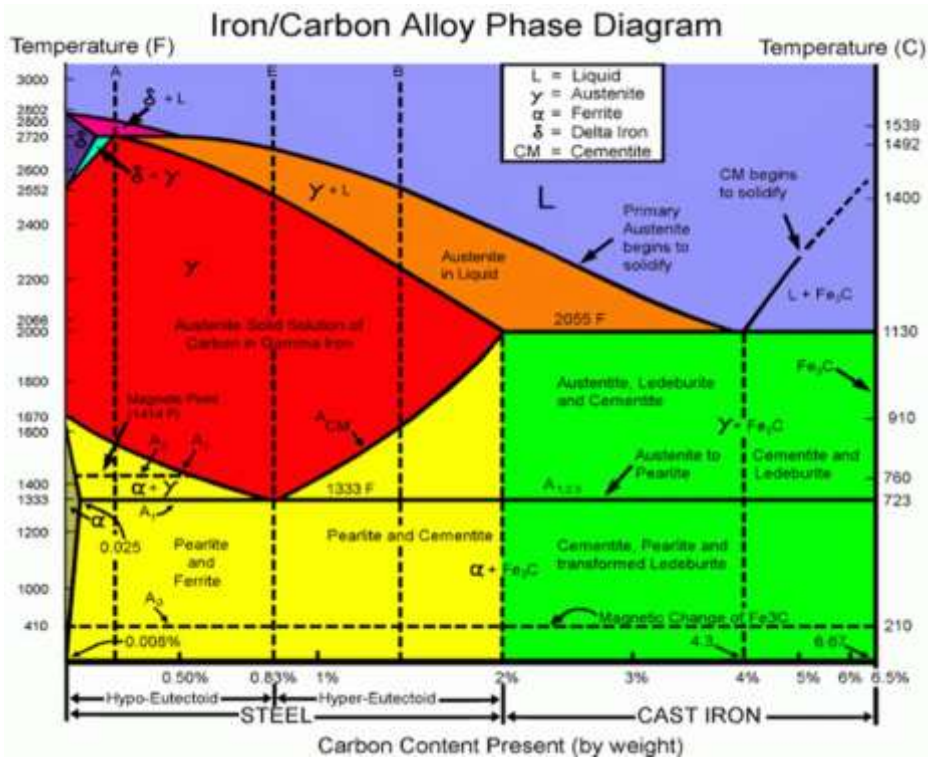
Сталь 20 (Fe-C)



Сталь X18H10T

Головні легувальні елементи Cr, Ni і C

- Карбон формує структуру сталей



Легувальні елементи сталей:

1. Хром Cr

- Мінімальний вміст 12-14 мас.%
- Хром підвищує здатність нержавіючих сталей (НС) до пасивації.
- Здатність Cr утворювати по межах зерен карбіди є високою, що викликає небезпеку розвитку міжкристалітної корозії.

Макро-легувальні елементи:

2. Нікель Ni

- Додають для одержання аустенітних або дуплексних НС.
- Ці матеріали мають відмінну пластичність і міцність, піддаються зварюванню.
- Ni покращує механічні властивості НС і термостійкість.
- Ni підвищує водостійкість НС.

Мікро-легувальні елементи:

- **Манган Mn** – аустеніто-твірний елемент, який використовують для заміщення Ni. Вміст Mn у НС 2-3 мас%.
- **Молібден Mo** – ферито-твірний елемент. Підвищує опір **пітинговій корозії**, вміст 2-4 мас%. Покращує механічні властивості НС за високих температур. Підвищує опір до корозії у середовищі кислот-відновників.
- **Вольфрам W** підвищує міцність і твердість мартенситних НС.

Микро-легувальні елементи:

- Азот N (до 0.25 мас%) стабілізує аустенітну структуру, підвищує міцність і корозійну стійкість, здатність дуплексної НС до зварювання.
- Ti, Nb і Ta стабілізують НС і знижують схильність до міжкристалітної корозії.
- Cu підвищує корозійну стійкість у середовищі, що містить сульфатну кислоту.
- Si підвищує опір НС пітинговій корозії.

Обробка поверхні

Полірування поверхні сприяє зниженню швидкості корозії за рахунок зменшення шорсткості і питомої площі.



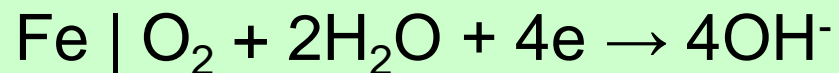
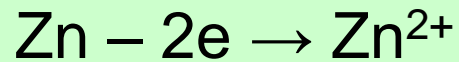


Захисні покритви

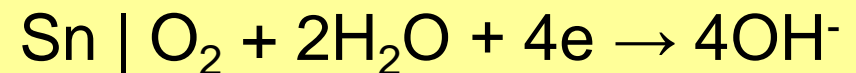
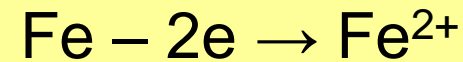
- Забезпечують бар'єр між металом і середовищем або служать протекторами
- Металічні покритви:
 - Бар'єрні (з більшим потенціалом) – Ag, Cu, Ni, Cr, Sn, Pb на сталі. Мають бути безпористими. Порушення суцільності покритву викликає швидке руйнування основи.
 - Протекторні (з меншим потенціалом) – Zn, Al, Mn на сталі. Основа у порах покритву буде катодом.
 - Способи нанесення – гаряча прокатка, напилення, плакування, електроосадження тощо.

Захисні металеві покриття

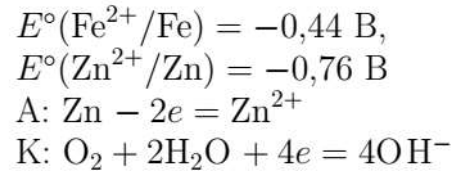
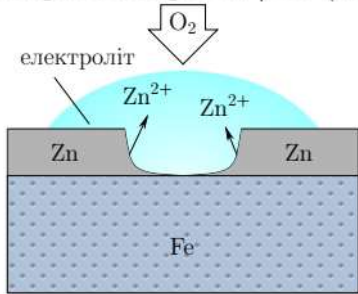
■ Анодні (протекторні)



■ Катодні (бар'єрні)



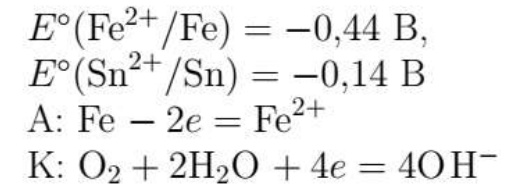
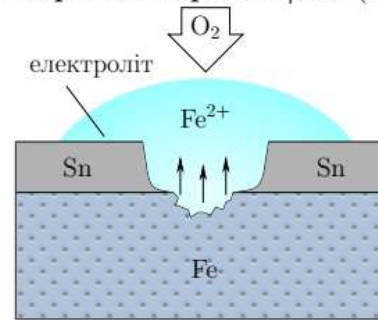
- Корозія пари Fe|Zn (анодне покриття)



- Анодне покриття захищає метал навіть при пошкодженні



- Корозія пари Fe|Sn (катодне покриття)



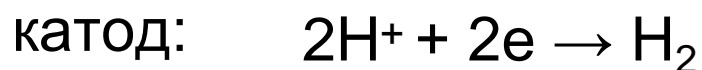
- Пошкоджене покриття не захищає метал від руйнування



- Нанесення неметалевих неорганічних покриттів: цемент, скло, кераміка, конверсійні.

- Конверсійні покритви:

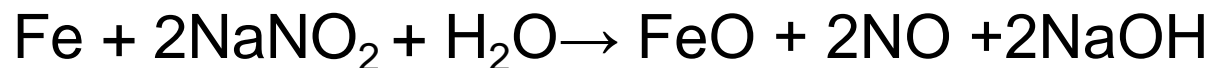
- Анодування (Al в H_2SO_4)



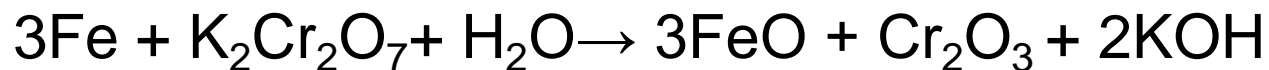
- Фосфатування



- Оксидування



- Хроматування



Неорганічні покритви

- *Бетонні покритви* використовують для захисту громіздких металевих споруд та підземних комунікацій.
- *Неорганічні емалі* за своїм складом належать до силікатних матеріалів. Емалюванню піддають чорні та кольорові метали, які застосовуються при виробництві апаратури у фармацевтичній, хімічній чи харчовій промисловостях та при виготовленні речей побутового вжитку. Основною вадою силікатних емалей є крихкість та розтріскування під дією теплових і механічних напружень.
- *Оксидні плівки* нарощують на металах, схильних до пасивації (Al, Ti, Fe, Cr).



воронування



оксидування



фосфатування



Органічні покритви



- **Органічні покритви:** фарби, лаки, полімери.
- Складаються з розчинника (затверджувача), смоли і пігментів.
- Покрив забезпечує бар'єр для середовища, а пігменти є інгібіторами корозії.

A decorative graphic consisting of a thin horizontal line at the top, a thicker horizontal bar below it, and a light green gradient bar at the bottom. A thin yellow circle is positioned behind the text. On the left, a black bracket is partially visible. On the right, a yellow bracket is visible.

Методи впливу на середовище

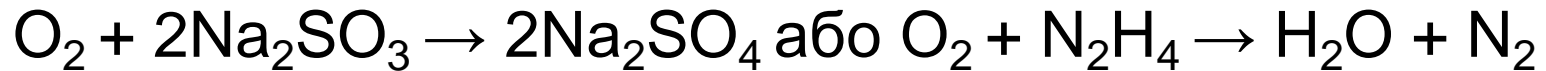
- видалення деполяризатора;
- нейтралізація середовища;
- температура і швидкість руху середовища;
- інгібітори корозії.

[

]

- Видалення кисню (деаерація середовища):

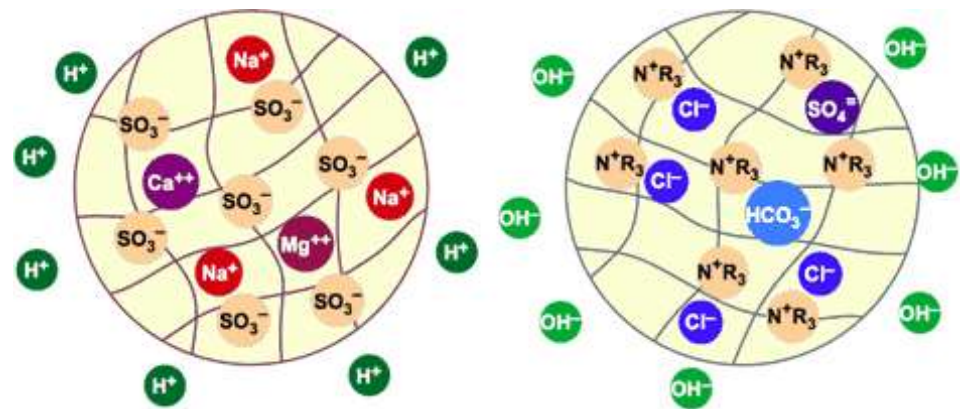
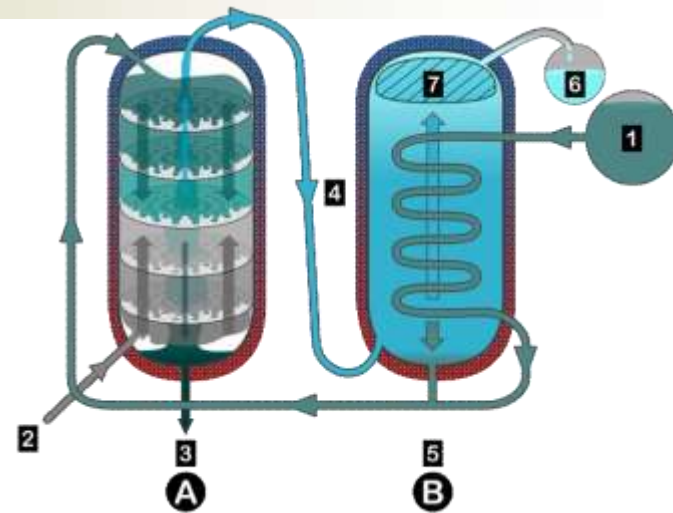
- Реагентний метод



- Продувка інертними газами (N_2 , Ar) або кип'ятіння.
- Вакуумування.
- Не рекомендується для металів, що пасивуються, оскільки може порушувати оксидний покрив.

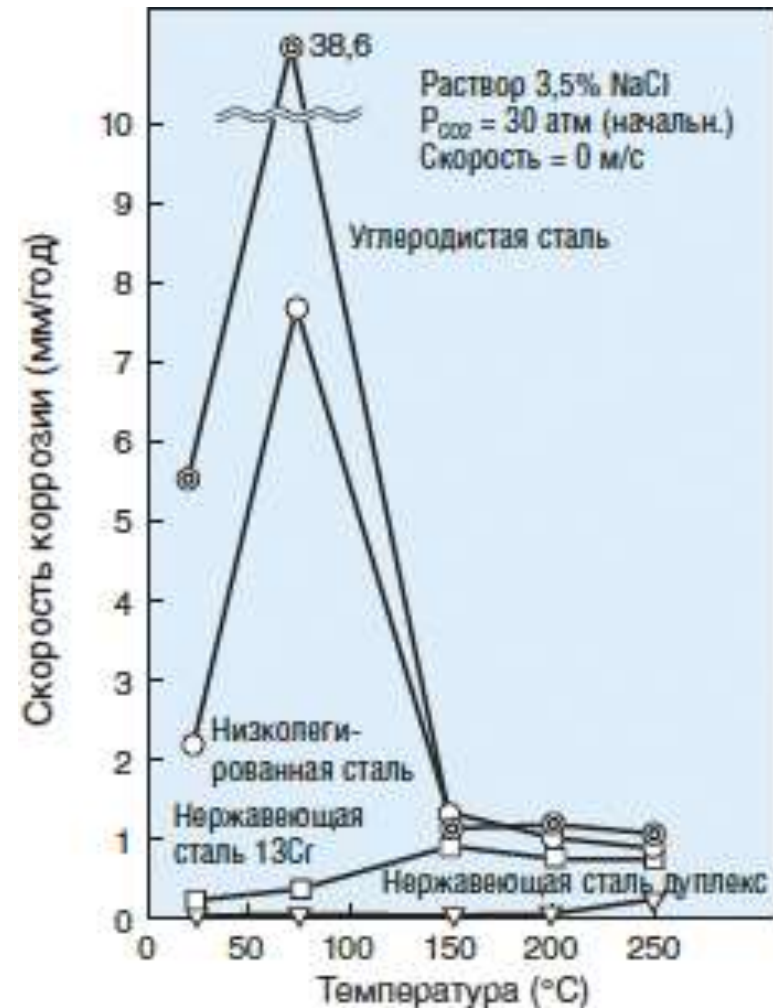
Нейтралізація середовища

- змінення концентрації H^+ іонів – нейтралізація середовища содою або гашеним вапном.
- видалення активаторів із середовища:
 - Реагентний метод:
 $2Cl^- + Pb^{2+} \rightarrow PbCl_2$.
 - Дистиляція.
 - Використання іонообмінних мембран.

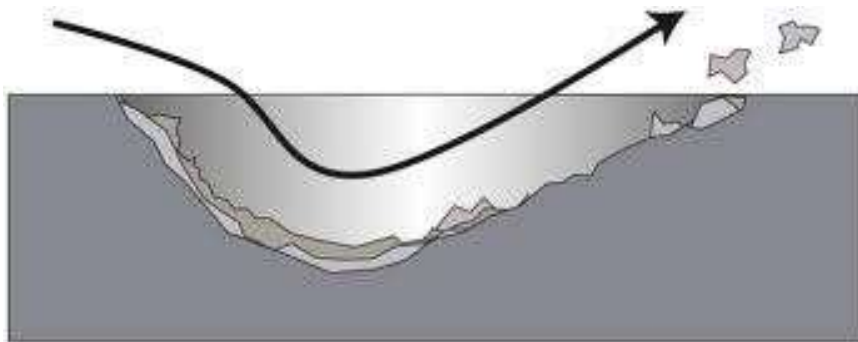


Вплив температури

- Головний підхід – зниження температури.
- У деяких випадках з ростом температури швидкість корозії падає:
- при випаровуванні електроліту
- або зниженні концентрації кисню.



Швидкість руху середовища

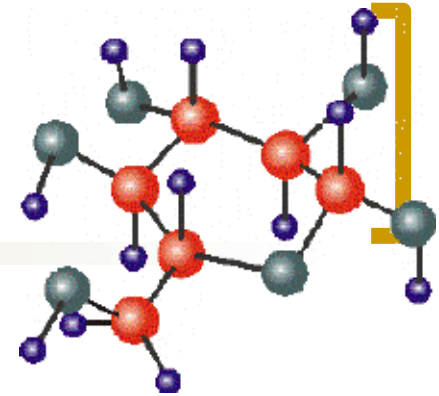


- Зниження швидкості руху агресивного середовища запобігає ерозійному руйнуванню метала і кавітаційній корозії.

Інгібітори корозії



Інгібітори корозії

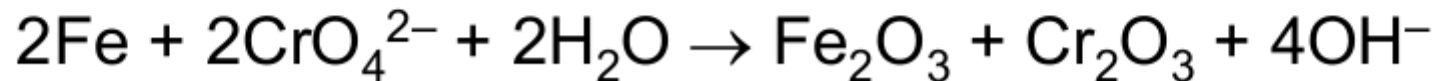


- Додають у малій концентрації до складу середовища або покривів для зниження швидкості корозії за рахунок формування тонких плівок на поверхні метала і зменшення:
 - поверхні анодної реакції;
 - потоку деполяризатора і швидкості катодної реакції.

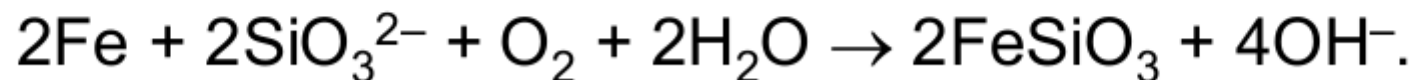
Пасивуючі неорганічні інгібітори



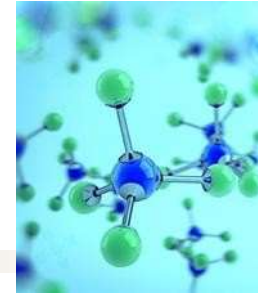
Окисники: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, NO_3^- , NO_2^- , MoO_4^{2-} , WO_4^{2-} , утворюють пасивні оксидні плівки на металі за відсутності кисню:



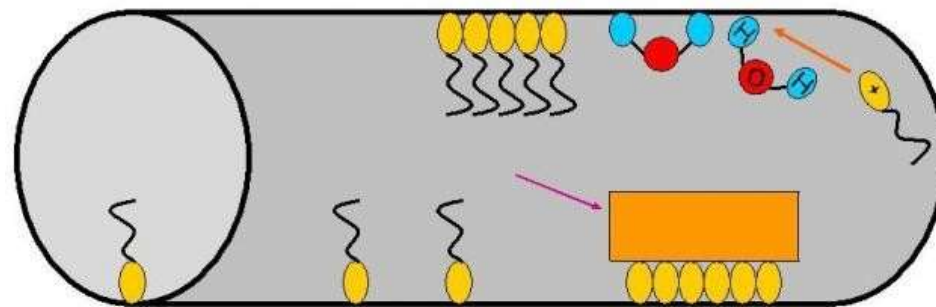
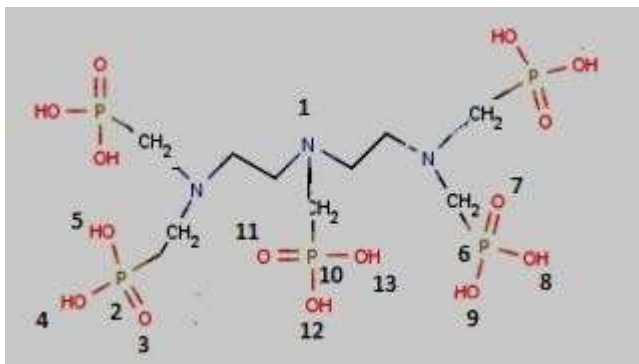
Неокисники: PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} , CO_3^{2-} , потребують присутності кисню для пасивації сталі:



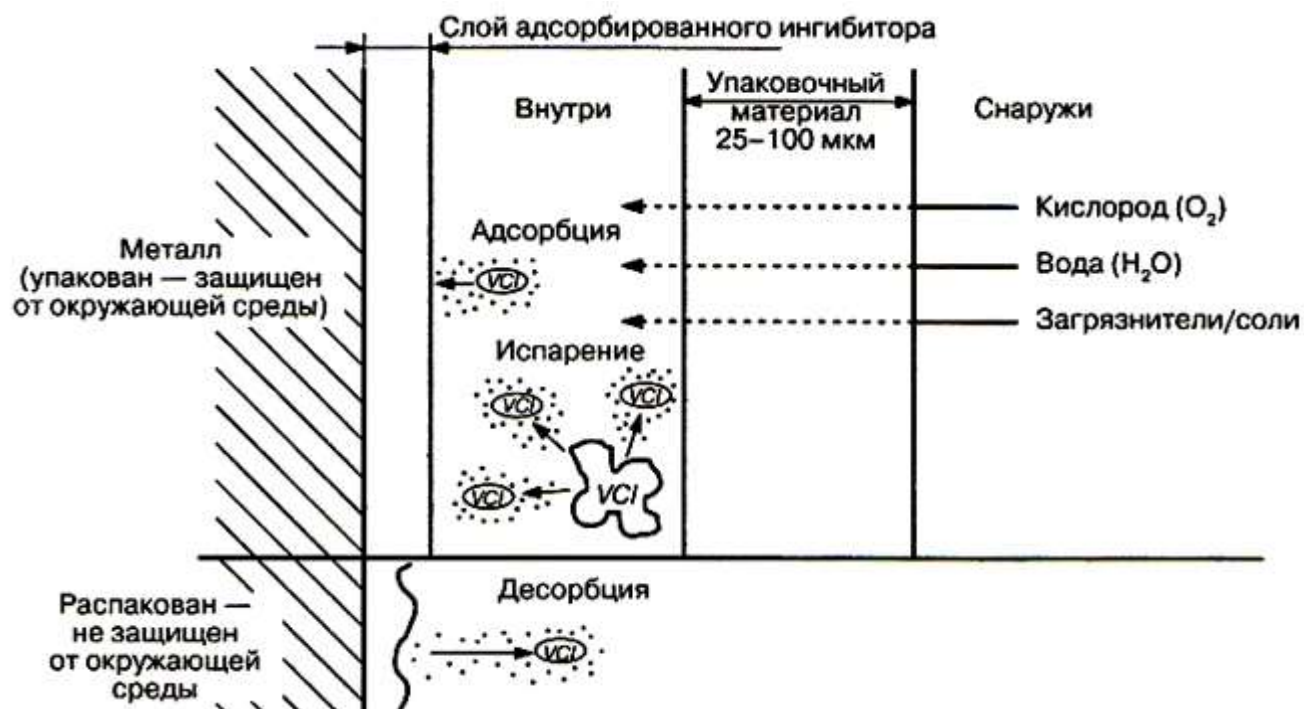
Органічні інгібітори



- Гальмують анодну і катодну реакції корозійного процесу, однак при достатньо високій концентрації.
- Захищають метал, утворюючи гідрофобну плівку на поверхні, тому їх ефективність залежить від складу, структури і спорідненості до метала.
- На адсорбційну і захисну здатність впливають температура і тиск.



Леткі інгібітори корозії

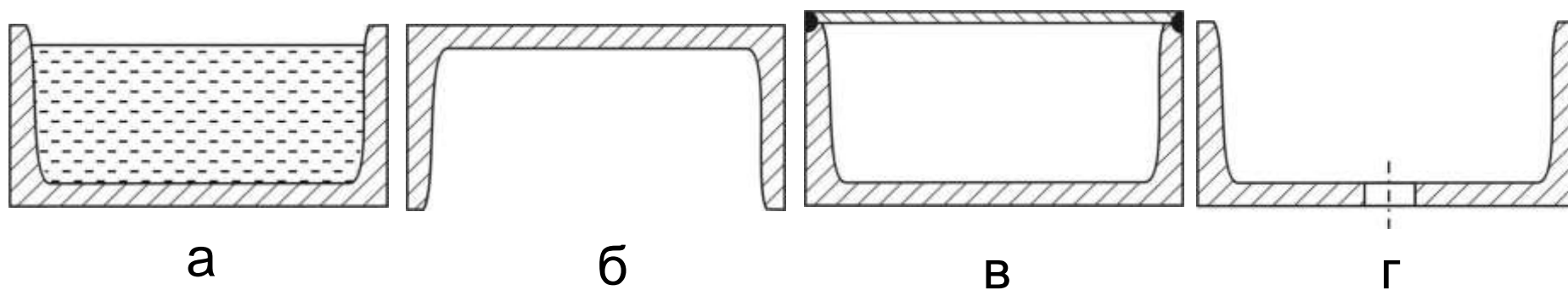


- Леткі інгібітори корозії (Volatile Corrosion Inhibitors VCI) – засоби тимчасового захисту.
- В замкнутому середовищі розпилюють органічні основи (гідразин), які запобігають корозії труб шляхом нейтралізації кислотних газів (CO_2) або підвищення рН.

Раціональне конструювання

- Вибір правильної товщини стінок метала.
- Запобігання дії механічних напруг, що розтягують, в поєднанні з агресивним середовищем.
- Уникати гальванічного контакту різних за активністю металів.
- Уникати гетерогенності поверхні і глибоких зазорів між деталями.

Раціональне конструювання



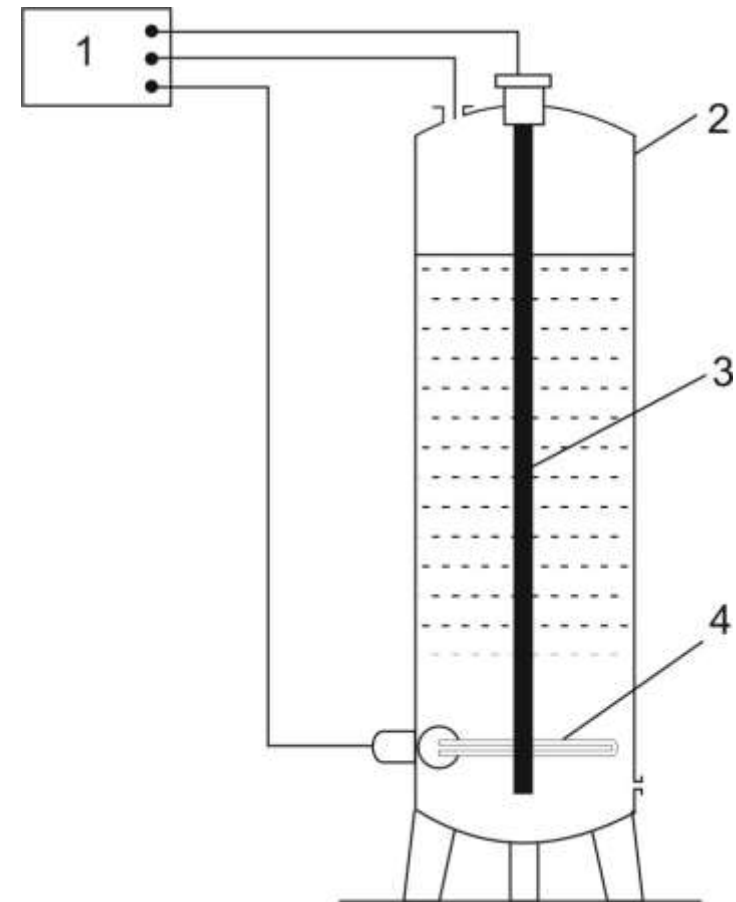
- Накопичення вологи у конструктивних елементах (а) і приклади його усунення за рахунок: ефективного розташування (б), ізоляції від середовища (в) і видалення через дренажні отвори (г).

Електрохімічний захист



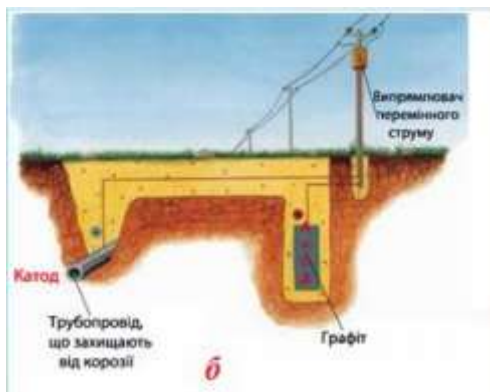
Анодний захист (АЗ)

- 10 Використовують лише для металів і сплавів, що здатні до пасивації
- 10 Пристрій (2) підключають до позитивного полюсу джерела постійного струму (1), на поверхні металу утворюється оксидний шар і він переходить до пасивного стану.
- 10 3 – катод, 4 – електрод порівняння.
- 10 Для АЗ необхідно застосовувати складне обладнання контролю потенціалу, а також підтримувати сталий склад середовища.



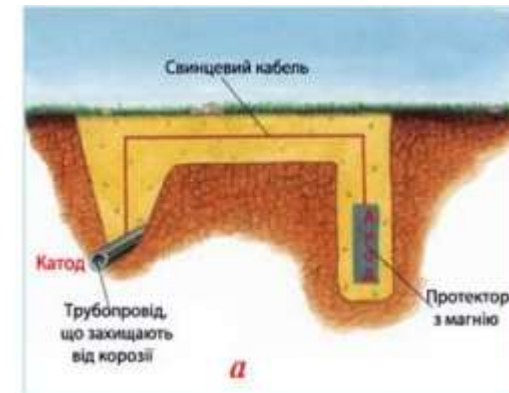
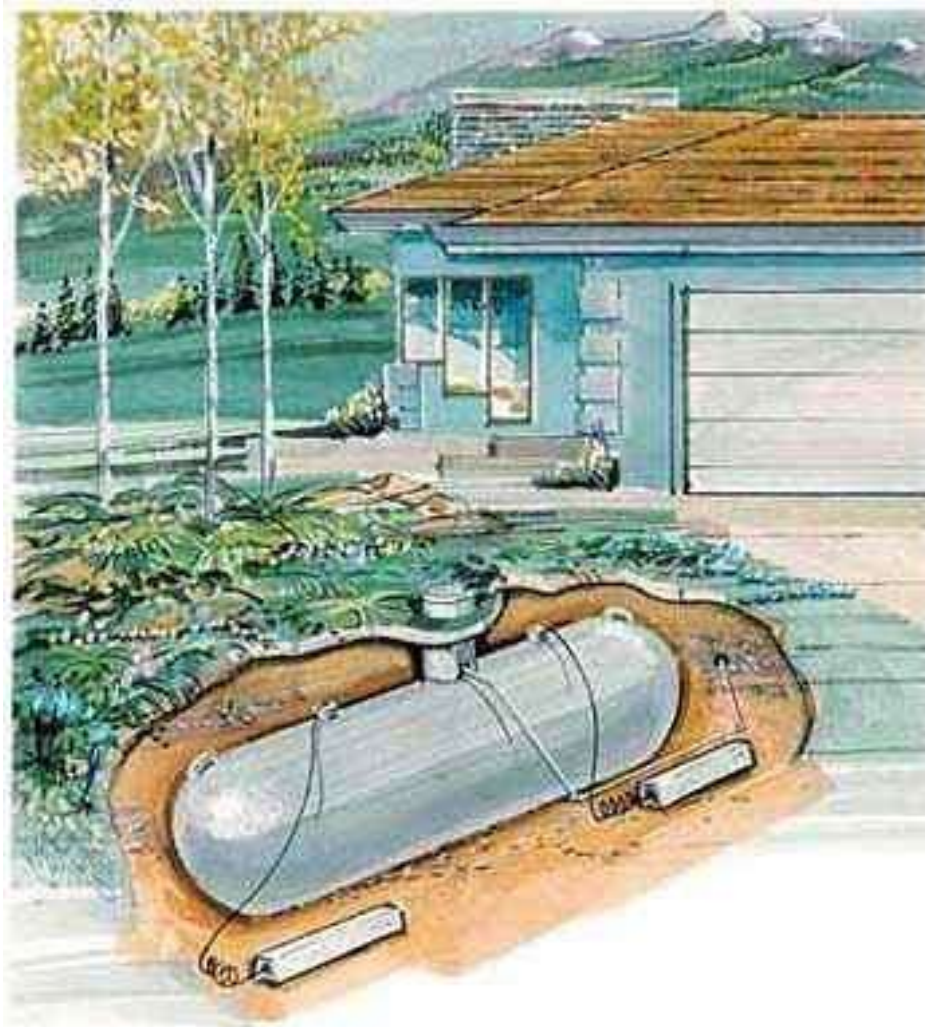
Катодний захист (КЗ) зовнішнім струмом

- Пристрій підключають до негативного полюсу джерела постійного струму (ДС).
- Позитивний полюс ДС з'єднують з анодом-заземлювачем.



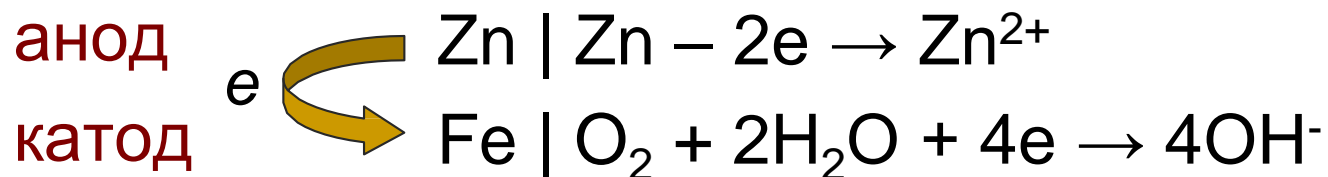
- Реакція на катоді:
$$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} \rightarrow 4\text{OH}^-$$
- Реакція на аноді (залізний лом):
$$\text{Fe} - 2\text{e} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$$

Катодний захист протектором

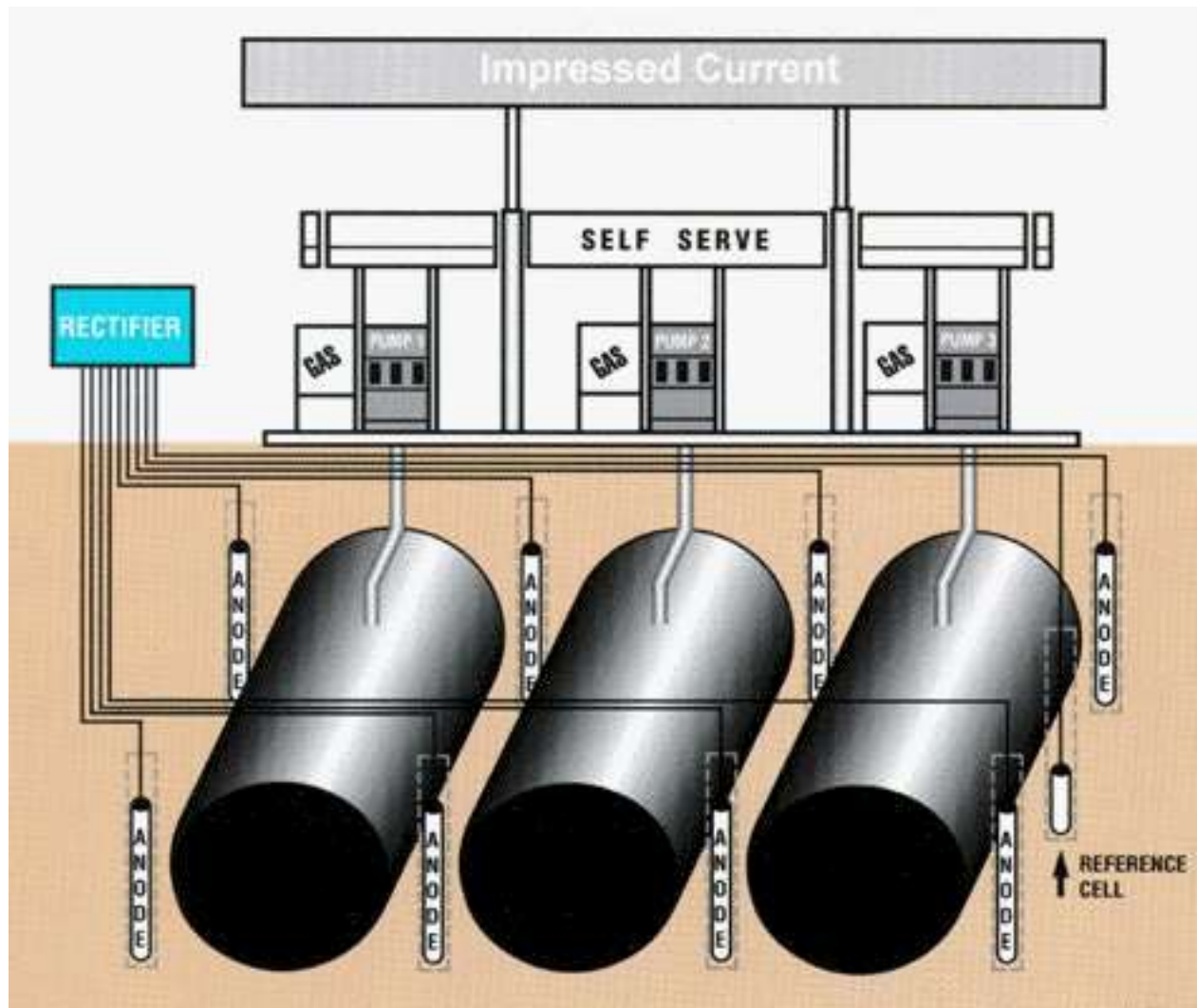


Протекторний захист

- Пристрій безпосередньо з'єднують з анодом, що виготовлений з більш активного металу
- Аноди (Mg, Al, Zn та їх сплави) масою 300 – 400 кг розташовують на відстані 150 м від пристрою, що захищають, та один від одного.
- реакції:



Захист підземних смностей



Комплексный захист

