

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

**Ю.В. Борисенко**

**Матеріали сучасної техніки та захист від  
руйнування**

Навчальний посібник

Київ КНУТД 2016

УДК 621.35:620.193(075.8)

ББК 24.57

Б 82

Рекомендовано Вченою Радою Київського національного  
університету технологій та дизайну як навчальний посібник  
для самостійної роботи студентів напрямку 6.051301 «Хімічна технологія»  
спеціальності «Технічна електрохімія»  
(протокол № від березня 2015)

Рецензенти:

*Ниркова Л.І.* – канд. хім. наук, ст.н.с. групи корозійних випробувань  
відділу №28 Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

*Усенко Н.І.* – канд. хім. наук, доцент кафедри фізичної хімії Київського  
Національного університету ім. Т. Шевченка.

Борисенко Ю. В.

Б 82 Матеріали сучасної техніки та захист від руйнування : навчальний  
посібник / Ю. В. Борисенко. – К. : КНУТД, 2016. – 111 с.

ISBN

В навчальному посібнику приділяється велика увага самостійній роботі студентів. Зважаючи на специфічність дисципліни, яка включає в себе не тільки розділи по корозії металів та захисту від неї, але й елементи матеріалознавства, створення допоміжної літератури з дисципліни «Матеріали сучасної техніки та захист від руйнування» є актуальним, бо сприятиме кращому засвоєнню теоретичного матеріалу дисципліни.

В посібнику міститься теоретичний матеріал для самостійного опрацювання з усіх розділів дисципліни. Велика увага приділяється сучасним композитним матеріалам та сплавам різного призначення, їх стійкості до корозійного руйнування. Наведено теоретичні відомості про хімічну та електрохімічну корозію металів і сплавів, а також методи боротьби з нею. Після кожної теми наведено контрольні питання для кращого засвоєння матеріалу, а також тестові питання для підсумкового контролю з дисципліни.

УДК 621.35:620193(075.8)  
ББК 24.57

ISBN \_\_\_\_\_

© Ю. В. Борисенко, 2016  
© КНУТД, 2016

# Матеріали сучасної техніки та захист від руйнування

## Зміст

	<b>Передмова</b>	<b>5</b>
	<b>Рекомендована література</b>	<b>6</b>
<b>Тема 1.</b>	<b>Матеріали сучасної техніки</b>	<b>7</b>
1.1.	Полімерні матеріали	7
1.2.	Композиційні матеріали, властивості, стійкість до руйнування	10
1.2.1.	Структура композиційних матеріалів	11
1.2.2.	Полімерні композиційні матеріали (ПКМ)	11
1.2.3.	Композиційні матеріали з металевою матрицею	15
1.2.4.	Композиційні матеріали на основі кераміки	16
	<b>Контрольні питання до теми 1</b>	<b>16</b>
<b>Тема 2.</b>	<b>Сучасні сплави, їх властивості та застосування</b>	<b>17</b>
2.1.	Сплави, одержання, загальні властивості, класифікація	17
2.2.	Залізні сплави	17
2.2.1.	Маркування сталей	18
2.3.	Алюмінієві сплави	22
2.4.	Магнієві сплави	22
2.5.	Мідні сплави	23
2.6.	Кобальтові сплави	23
2.7.	Нікелеві сплави	23
2.8.	Титанові сплави	23
2.9.	Ніобієві сплави	24
2.10.	Вольфрамові сплави	24
2.11.	Танталові сплави	24
2.12.	Бабіти	24
2.13.	Інші сплави	24
	<b>Контрольні питання до теми 2</b>	<b>25</b>
<b>Тема 3.</b>	<b>Поняття про корозію металів, класифікація корозійних процесів</b>	<b>25</b>
3.1.	Корозія металів, загальні відомості	25
3.2.	Класифікація корозійних процесів	27
	<b>Контрольні питання до теми 3</b>	<b>29</b>
<b>Тема 4.</b>	<b>Показники швидкості корозії</b>	<b>30</b>
	<b>Контрольні питання до теми 4</b>	<b>33</b>
<b>Тема 5.</b>	<b>Хімічна корозія металів</b>	<b>33</b>
5.1.	Газова корозія	33
5.2.	Термодинаміка процесу газової корозії	33

5.3.	Вплив температури і складу газового середовища на швидкість корозії металів	35
5.4.	Плівки на металах, їх класифікація та захисні властивості	36
5.5.	Закони росту плівок на металах	37
5.5.1.	Ріст пористої (незахисної) плівки	37
5.5.2.	Ріст суцільної (захисної) плівки	39
5.6.	Напруги в захисних плівках та їх руйнування	43
	<b>Контрольні питання до теми 5</b>	<b>44</b>
<b>Тема 6.</b>	<b><i>Захист від газової корозії</i></b>	<b>45</b>
6.1.	Жаростійке легування	45
6.2.	Захисні металічні та неметалічні покриття	46
6.2.1.	Металічні покриття	46
6.2.2.	Неметалічні покриття	46
6.2.3.	Покриття з тугоплавних сполук	47
6.2.4.	Металокерамічні покриття	47
6.3.	Захисні або контрольовані атмосфери	47
6.3.1.	Захисні атмосфери, застосовувані для деяких металів та сплавів	47
6.3.2.	Захисні атмосфери для сталей	48
	<b>Контрольні питання до теми 6</b>	<b>49</b>
<b>Тема 7.</b>	<b><i>Електрохімічна корозія металів</i></b>	<b>49</b>
7.1.	Корозійні гальванічні елементи	49
7.2.	Поляризація електродних процесів та її причини	51
7.3.	Вторинні процеси і продукти електрохімічної корозії металів	56
7.4.	Корозійний процес з водневою деполяризацією	57
7.4.1.	Методи боротьби з корозією з водневою деполяризацією	60
7.5.	Корозійний процес з кисневою деполяризацією	60
	<b>Контрольні питання до теми 7</b>	<b>63</b>
<b>Тема 8.</b>	<b><i>Захист металів від електрохімічної корозії</i></b>	<b>63</b>
8.1.	Легування	64
8.2.	Обробка корозійного середовища	64
8.3.	Кількісна характеристика дії інгібіторів	65
8.4.	Захисні покриття	66
8.5.	Електрохімічний захист	67
8.5.1.	Катодний захист	67
8.5.1.1.	Катодний протекторний захист	69
8.5.1.2.	Катодний захист зовнішнім струмом	70
8.5.2.	Анодний захист	71
8.6.	Раціональне конструювання	72
8.7.	Атмосферна корозія та захист від неї	73

8.8.	Корозія при нерівномірній аерації та захист від неї	76
8.9.	Морська корозія та захист від неї	78
8.10.	Корозія під дією мадрівних струмів та захист від неї	82
	<b>Контрольні питання до теми 8</b>	<b>84</b>
	<b>Підсумковий контроль за темами 1-8</b>	<b>85</b>
	<b>ДОДАТКИ</b>	<b>96</b>
	<i>Таблиця 1.</i> Хімічна стійкість та застосовуваність еластомерів в різних середовищах	96
	<i>Таблиця 2.</i> рН побутових речовин, матеріалів та продуктів Електрохімічний ряд напруг металів	99 100
	<i>Таблиця 3.</i> Стандартні електродні потенціали деяких окисно-відновних систем	100
	<i>Таблиця 4.</i> Стандартні електродні потенціали	102
	<i>Таблиця 5.</i> Розчинність кисню в прісній воді	102
	<i>Таблиця 6.</i> Розчинність кисню в солоній (морській) воді (солоність ~ 35 г/кг води)	103
	<i>Таблиця 7.</i> Десятибальна шкала корозійної стійкості металів	103
	<i>Таблиця 8.</i> Сумісність металів та сплавів (оцінка ризику гальванічної корозії)	104
	<i>Таблиця 9.</i> Корозійна стійкість металів і сплавів за нормальних умов	105
	<i>Таблиця 10.</i> Захисні суміші при фарбуванні, нанесенні металічного покриття, лакуванні, травленні	110

### Передмова

Навчальний посібник «Матеріали сучасної техніки та захист від руйнування» призначено для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» освітньої програми «Технічна електрохімія». Посібник повністю відповідає робочій програмі навчальної дисципліни «Матеріали сучасної техніки та захист від руйнування», метою якої є надання студентам повноцінних уявлень про сучасні матеріали, застосовувані в техніці, та про принципи протидії корозії за допомогою сучасних методів захисту при виборі необхідних некородуючих матеріалів. Основними завданнями вивчення дисципліни є формування у студентів цілісних, систематизованих уявлень про корозію як явища; методи боротьби з корозією за допомогою активних засобів (покриття, інгібіторний захист і т.п.); причини виникнення корозійних руйнувань та методи запобігання дії корозії. Студенти повинні: знати спектр новітніх матеріалів конструкцій: метали, полімери, комбіновані матеріали; фактори руйнування матеріалів; методи електрохімічного захисту матеріалів; склади корозійностійких сплавів та сфери їх практичного застосування; закономірності хімічного та електрохімічного руйнування чистих металів та сплавів; схеми катодного та анодного захисту; універсальні інгібітори руйнівних процесів; вміти активно користуватись знаннями, отриманими при

вивченні курсу, а саме - аналізувати стан середовища та ризику руйнування матеріалів; використовувати шкалу потенціалів та десятибальну шкалу корозійної стійкості металів як основу оцінки якості конструкції; визначати показники швидкості корозії металів, ефективність дії інгібіторів, застосовувати різні методи захисту металів від хімічної та електрохімічної корозії.

В посібнику міститься теоретичний матеріал для самостійного опрацювання з усіх розділів дисципліни. Велика увага приділяється сучасним композитним матеріалам та сплавам різного призначення, їх стійкості до корозійного руйнування. Наведено теоретичні відомості про хімічну та електрохімічну корозію металів і сплавів, а також методи боротьби з нею. Після кожної теми наведено контрольні питання для кращого засвоєння матеріалу, а також тестові питання для підсумкового контролю з дисципліни.

### **Рекомендована література**

#### **Базова**

1. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – Учебн. пособие для вузов.- 2-е издание, стереотипное. - М.: ООО ТИД «Альянс», 2006, 472 с.
2. Перепелиця О.П. Екохімія та ендоекологія елементів. - К.: Екохім, 2004. -736 с.
3. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии / под ред. Семеновой И.В. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 336 с.
4. Улиг Г.Г., Ревы Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. – Л.: Химия, 1989. – 456 с.

#### **Допоміжна**

1. Дамаскин Б.Б. и др. Электрохимия / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирлина. – 2-е изд., испр. и перераб. - М.: КолосС, 2006. – 672 с.
2. Клинов И.Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы. М.: Машиностроение, 1967, 468 с.
3. Кофанова Н.К. Коррозия и защита металлов. – Алчевск, 2003. - 181 с.
4. Юхневич Р., Богданович В. и др. Техника борьбы с коррозией. Л.: «Химия», Ленинградское отделение, 1980, 224 с.
5. Красноярский В. В., Электрохимический метод защиты металлов от коррозии, М., 1961.
6. Люблинский Е. Я., Протекторная защита морских судов и сооружений от коррозии, Л., 1979;
7. Кузуб В. С., Анодная защита технологического оборудования, М., 1989.
8. Энциклопедия полимеров, т. 1-2, М., «Химия», 1972-74.
9. Сутягин, В. М. Общая химическая технология полимеров: учебное пособие / В. М. Сутягин, А. А. Ляпков – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 195 с.

## Тема 1. Матеріали сучасної техніки

Матеріали, застосовувані в сучасній техніці, можна поділити на такі великі групи: 1. метали і сплави; 2. полімерні матеріали; 3. композиційні матеріали; 4. інші (дерев'яні, бетонні, скляні, керамічні матеріали). Особливо перспективне в теперішній час застосування полімерних, композиційних матеріалів, металів та сплавів, тому на них зупинимося детальніше.

### 1.1. Полімерні матеріали

**Полімери** (від грец. *polymeres* - що складається з багатьох частин, різноманітний), хімічні сполуки з високою молекулярною масою (від декількох тисяч до багатьох мільйонів), молекули яких (макромолекули) складаються з великого числа повторюваних угруповань (мономерних ланок). Атоми, що входять до складу макромолекул, з'єднані один з одним силами головних і (або) координаційних валентностей.

#### **Класифікація.**

За походженням полімери поділяються на *природні (біополімери)*, наприклад, білки, нуклеїнові кислоти, смоли природні, і *синтетичні*, наприклад, поліетилен, поліпропілен, феноло-формальдегідні смоли.

Атоми або атомні групи можуть розташовуватися в макромолекулі у вигляді: відкритого ланцюга або витягнутої в лінію послідовності циклів (*лінійні полімери*, наприклад, каучук натуральний); ланцюга з розгалуженням (*розгалужені полімери*, наприклад, амілопектин); тривимірної сітки (*зшиті полімери*, наприклад, затверділі епоксидні смоли).

Полімери, молекули яких складаються з однакових мономерних ланок, називаються *гомополімерами*, наприклад, полівінілхлорид, полікапроамід, целюлоза.

Макромолекули того самого хімічного складу можуть бути побудовані з ланок різної просторової конфігурації. Якщо макромолекули складаються з однакових стереоізомерів, або з різних стереоізомерів, що чергуються в ланцюзі у визначеній періодичності, полімери називаються *стереорегулярними*.

Полімери, макромолекули яких містять кілька типів мономерних ланок, називаються *сополімерами*. Сополімери, у яких ланки кожного типу утворюють досить довгі безперервні послідовності, що змінюють одна одну в межах макромолекули, називаються *блоксополімерами*. До внутрішніх (некінцевих) ланок макромолекули однієї хімічної будови можуть бути приєднані одна чи кілька ланцюгів іншої будови. Такі сополімери називаються *щепленими*.

Полімери, у яких кожна чи деякі стереоізомерні ланки утворюють досить довгі безперервні послідовності, що змінюють одна одну в межах однієї макромолекули, називаються *стереоблоксополімерами*.

У залежності від складу основного (головного) ланцюга полімери поділяють на:

*гетероланцюгові*, в основному ланцюзі яких містяться атоми різних елементів, найчастіше вуглецю, азоту, кремнію, фосфору, та

*гомоланцюгові*, основні ланцюги яких побудовані з однакових атомів.

З гомоланцюгових полімерів найбільш поширені карболанцюгові полімери, головні ланцюги яких складаються тільки з атомів вуглецю, наприклад, поліетилен, поліметилметакрилат, політетрафторетилен.

Приклади гетероланцюгових полімерів: полієфіри (поліетилентерефталат, полікарбонати та ін), поліаміди, сечовино-формальдегідні смоли, білки, деякі кремнійорганічні полімери.

Полімери, макромолекули яких поряд з вуглеводневими групами містять атоми неорганічних елементів, називаються *елементоорганічними*.

Окрему групу полімерів утворюють неорганічні полімери, наприклад, пластична сірка, поліфосфонітрилхлорид.

### **Властивості і найважливіші характеристики.**

Лінійні полімери мають специфічний комплекс фізико-хімічних і механічних властивостей. Найважливіші з цих властивостей такі: здатність утворювати високоміцні анізотропні високоорієнтовані волокна і плівки, здатність до великих, довгострокових оборотних деформацій, здатність у високоеластичному стані набухати перед розчиненням, висока в'язкість розчинів. Цей комплекс властивостей обумовлений високою молекулярною масою, ланцюговою будовою, а також гнучкістю макромолекул. При переході від лінійних ланцюгів до розгалужених, рідких тривимірних сіток і, нарешті, до густих сітчастих структур цей комплекс властивостей стає усе менш вираженим. Сильно зшиті полімери нерозчинні, неплавкі і не здатні до високоеластичних деформацій.

Полімери можуть існувати в кристалічному й аморфному станах. Необхідна умова кристалізації - регулярність досить довгих ділянок макромолекули. В кристалічних полімерах можливе виникнення різноманітних надмолекулярних структур (фібрил, сферолітів, монокристалів та ін), тип яких багато в чому визначає властивості полімерного матеріалу. Надмолекулярні структури в незакристалізованих (аморфних) полімерах менш виражені, ніж у кристалічних.

Незакристалізовані полімери можуть знаходитися в трьох фізичних станах: склоподібному, високоеластичному і в'язкотекучому. Полімери з низькою (нижче кімнатної) температурою переходу зі склоподібного у високоеластичний стан називаються **еластомерами**, з високою - **пластиками**.

В залежності від хімічного складу, будови і взаємного розташування макромолекул властивості полімерів можуть мінятися в дуже широких межах. Так, 1,4-цис-полібутадиєн, побудований із гнучких вуглеводневих ланцюгів, при температурі близько 20°C - еластичний матеріал, який при температурі 60°C переходить в склоподібний стан; поліметилметакрилат, побудований з більш твердих ланцюгів, при температурі близько 20 °C - твердий склоподібний продукт, який переходить у високоеластичний стан лише при 100 °C. Целюлоза - полімер з дуже твердими ланцюгами, з'єднаними міжмолекулярними



водневими зв'язками, взагалі не може існувати в високоеластичному стані до температури її розкладання. Великі розходження у властивостях полімерів можуть спостерігатися навіть у тому випадку, якщо розходження в будові макромолекул на перший погляд і невеликі. Так, стереорегулярний полістирол - кристалічна речовина з температурою плавлення близько 235°C, а нестереорегулярний (атактичний) взагалі не здатний кристалізуватися і розм'якшується при температурі близько 80 °C.

### **Хімічні властивості**

Полімери можуть вступати в наступні **основні типи реакцій**:

1. утворення хімічних зв'язків між макромолекулами (так зване зшивання), наприклад, при вулканізації каучуків, дубленні шкіри;
2. розпад макромолекул на окремі, більш короткі фрагменти;
3. реакції бічних функціональних груп полімерів з низькомолекулярними речовинами, що не порушують основний ланцюг (так звані полімераналогічні перетворення);
4. внутрішньомолекулярні реакції, що протікають між функціональними групами однієї макромолекули, наприклад, внутрішньомолекулярна циклізація.

Зшивання часто протікає одночасно з деструкцією. Прикладом полімераналогічних перетворень може служити омилення полівінілацетату, що призводить до утворення полівінілового спирту. Швидкість реакцій полімерів з низькомолекулярними речовинами часто лімітується швидкістю дифузії останніх у фазу полімеру. Найбільш явно це виявляється у випадку зшитих полімерів. Швидкість взаємодії макромолекул з низькомолекулярними речовинами часто істотно залежить від природи і розташування сусідніх ланок щодо реагуючої ланки. Це ж відноситься і до внутрішньомолекулярних реакцій між функціональними групами, що належать одного ланцюга.

Деякі властивості полімерів, наприклад, розчинність, здатність до в'язкого плину, стабільність, дуже чуттєві до дії невеликих кількостей домішок чи добавок, що реагують з макромолекулами. Так, щоб перетворити лінійний полімер з розчинного в цілком нерозчинний, досить утворити на одну макромолекулу 1-2 поперечні зв'язки.

Найважливіші характеристики полімерів - хімічний склад, молекулярна маса і молекулярно-масовий розподіл, ступінь розгалуженості і гнучкості макромолекул, стереорегулярність і інші. Властивості полімерів істотно залежать від цих характеристик. В таблиці 1 додатку наведено дані про хімічну стійкість та застосовуваність еластомерів в різних середовищах.

### **Отримання полімерів**

Природні полімери утворюються в процесі біосинтезу в клітинах живих організмів. За допомогою екстракції, фракційного осадження й інших методів вони можуть бути виділені з рослинної і тваринної сировини. Синтетичні полімери отримують полімеризацією і поліконденсацією. Карбоцепні полімери звичайно синтезують полімеризацією мономерів з одним чи декількома кратними вуглець-вуглецевими зв'язками, або мономерів, що містять нестійкі карбоциклічні угруповання (наприклад, з циклопропана і його похідних).

Гетероцепні полімери одержують поліконденсацією, а також полімеризацією мономерів, що містять кратні зв'язки вуглець-елемент (наприклад,  $C = O$ ,  $N = C = O$ ) чи неміцні гетероциклічні угруповання (наприклад, в оксидах олефінів, лактамах).

### Застосування полімерів

Завдяки механічній міцності, еластичності, електроізоляційним та іншим цінним властивостям вироби з полімерів застосовують у різних галузях промисловості та в побуті. Основні типи полімерних матеріалів - пластичні маси, гуми, волокна, лаки, фарби, клеї, іонообмінні смоли. Значення біополімерів визначається тим, що вони складають основу всіх живих організмів і беруть участь практично у всіх процесах життєдіяльності.

## 1.2. Композиційні матеріали, властивості, стійкість до руйнування

Композиційні матеріали (композити) – багатокомпонентні матеріали, що складаються з пластичної *основи (матриці)*, армованої *наповнювачами*, що мають високу міцність, жорсткість та ін. Поєднання різнорідних речовин приводить до створення нового матеріалу, властивості якого кількісно і якісно відрізняються від властивостей кожної з його складових. Варіюючи склад матриці і наповнювача, їх співвідношення, орієнтацію наповнювача, отримують широкий спектр матеріалів з необхідним набором властивостей. Багато композитів перевершують традиційні матеріали і сплави по своїх механічних властивостях та корозійній стійкості, і в той же час вони легші. Використання композитів зазвичай дозволяє зменшити масу конструкції та підвищити корозійну стійкість при збереженні або поліпшенні її механічних характеристик.

Компонентами композитів є найрізноманітніші матеріали – метали, кераміка, скло, пластмаси, вуглець і т.д. Відомі багатокомпонентні композиційні матеріали – **поліматричні**, коли в одному матеріалі поєднують декілька матриць, або **гібридних**, що включають різні наповнювачі. Наповнювач визначає міцність, жорсткість і деформованість матеріалу, а матриця забезпечує монолітність матеріалу, передачу напруги в наповнювачі і стійкість до корозії.

**Історія.** Те, що малі добавки волокна значно збільшують міцність і в'язкість крихких матеріалів, було відомо з якнайдавніших часів. Один з найстародавніших описів виготовлення композиційного матеріалу приводиться в Старому Заповіті: за часів єгипетського рабства євреї додавали **солому в цеглу**, щоб вони були міцніші і не розтріскувалися при сушці на спекотному сонці. Інки використовували рослинні **волокна при виготовленні кераміки**, а англійські будівельники до недавнього часу додавали в штукатурку трохи **волосу**. Оболонки для єгипетських мумій робили з шматків тканини **або папірусу, просочених смолою або клеєм**. Цей матеріал (**пап'є-маше**) був наново відкритий тільки в 18 ст. (замість папірусу використовувалися шматки паперу) і був популярний до середини 20 століття. З пап'є-маше робили іграшки, рекламні макети, а іноді навіть меблі.

**Сучасність:** в побуті широко використовуються меблі, зроблені з композиту – деревно-стружкових плит (*ДСП*), в яких матриця з синтетичних смол наповнена деревними стружками і тирсою. А найбільш відомим на сьогоднішній день композитом, найімовірніше, є *залізобетон*. Поєднання бетону і залізних стрижнів дає матеріал, з якого споруджують конструкції (прольоти мостів, балки і тому подібне), що витримують такі великі навантаження, які б викликали розтріскування звичайного бетону. Цікаво, що першими застосовувати залізо як арматуру почали стародавні греки, причому армували вони мрамур. Коли архітекторові Мнесиклу в 437 до н.е. знадобилося перекрити прольоти завдовжки в 4–6 м, він замурував в спеціальних канавках в мрамурових плитах двометрові залізні стрижні, щоб перекриття витримали напругу.

### 1.2.1. Структура композиційних матеріалів

За структурою композити діляться на класи: *волокнисті, шаруваті, дисперснопідсилені, зміцнені частинками і нанокомпозити.*

*Волокнисті композити* армовані волокнами або ниткоподібними кристалами – цегла з соломною і пап'є-маше. Вже невеликий вміст наповнювача в композитах такого типу приводить до появи якісно нових механічних властивостей матеріалу. Широко варіювати властивості матеріалу дозволяє також зміна орієнтації розміру і концентрації волокон. Крім того, армування волокнами додає матеріалу анізотропію властивостей (відмінність властивостей у різних напрямках), а за рахунок добавки волокон провідників можна додати матеріалу електропровідність уздовж заданої осі.

У *шаруватих композитах* матриця і наповнювач розташовані шарами, як, наприклад, в особливо міцному склі, армованому декількома шарами полімерних плівок (автомобільне скло - триплекс).

Мікроструктура решти класів композитів характеризується тим, що матрицю наповнюють частинками армуючої речовини, а розрізняються вони розмірами частинок. У *композитах, зміцнених частинками*, їх розмір більше 1 мкм, а зміст складає 20–25% (за об'ємом), тоді як дисперснопідсилені композити включають від 1 до 15% (за об'ємом) частинок розміром від 0,01 до 0,1 мкм. Розміри частинок, що входять до складу *нанокомпозитів* – нового класу композиційних матеріалів, – ще менше і складають 10–100 нм.

### 1.2.2. Полімерні композиційні матеріали (ПКМ)

Композити, в яких матрицею служить полімерний матеріал, є одним з найчисленніших і різноманітніших видів матеріалів. Їх застосування в різних областях дає значний економічний ефект за рахунок підвищення корозійної стійкості та зниження маси. Наприклад, використання ПКМ при виробництві космічної і авіаційної техніки дозволяє зменшити на 5-30% вагу літального апарату. А зниження ваги, наприклад, штучного супутника на навколосемній орбіті на 1 кг приводить до економії 1000\$.

Сектори ринку, обслуговувані хімічно стійкими композитами, — це очистка води та стоків, целюлозно-паперова, харчова, хімічна, гірничодобувна

промисловості, виробництво мікропроцесорів, фармацевтика та енергетика і т. д. Основні вироби — труби, фітінги, патрубки, резервуари, скрубери, литники, відтводи, лотки, ковпаки, ґратки, сходи, мостки, корпуси, панелі.

Як наповнювачі ПКМ використовується безліч різних речовин.

**А) Склопластики** – ПКМ, армовані скляними волокнами, які формують з розплавленого неорганічного скла. Як матриця найчастіше застосовують як термореактивні синтетичні смоли (фенольні, епоксидні, поліефірні і т. д.), так і термопластичні полімери (поліаміди, поліетилен, полістирол і т.д.). Ці матеріали мають високу міцність, низьку теплопровідність, високі електроізоляційні властивості, вони прозорі для радіохвиль. Використання склопластиків почалося в кінці Другої світової війни для виготовлення антенних обтічників – куполоподібних конструкцій, в яких розміщується антена локатора. В перших армованих склопластиках кількість волокон була невеликою, волокно вводилося, щоб нейтралізувати грубі дефекти крихкої матриці. Тепер вона почала служити тільки для склеювання міцних волокон між собою, вміст волокон в багатьох склопластиках досягає 80% по масі. Шаруватий матеріал, в якому як наповнювач застосовується тканина, що зплетена з скляних волокон, називається **склотекстолітом**.

Склопластики добре працюють в умовах, що вимагають стійкості до корозії у вологому ґрунті, в присутності кислот, окисників, солей металів, газів та сірчистого газу-відновника. Скрубери, підземні резервуари для бензину та каналізаційні труби, успішно експлуатуються по 40 та більше років.

Застосування. Склопластики – дешеві матеріали, їх широко використовують в будівництві, суднобудуванні, радіоелектроніці, виробництві побутових предметів, спортивного інвентаря, віконних рам для сучасних склопакетів і тому подібне.

**Б) Вуглепластики** – наповнювачем в них служать вуглецеві волокна. Вуглецеві волокна отримують з синтетичних і природних волокон на основі целюлози, сополімерів акрилонітрилу, нафтових і кам'яновугільних пеків і т.д. Термічна обробка волокна проводиться, як правило, в три етапи (окислення – 220°C, карбонізація – 1000–1500°C і графітизація – 1800–3000°C) і приводить до утворення волокон, що характеризуються високим вмістом (до 99,5% по масі) вуглецю. Залежно від режиму обробки і початкової сировини, отримане вуглеволокно має різну структуру. Для виготовлення вуглепластиків використовуються ті ж матриці, що і для склопластиків – найчастіше – термореактивні і термопластичні полімери. Основними перевагами вуглепластиків в порівнянні з склопластиками є їх низька щільність і вищий модуль пружності, вуглепластики – дуже легкі і, в той же час, міцні матеріали. Вуглецеві волокна і вуглепластики мають практично нульовий коефіцієнт лінійного розширення. Все вуглепластики добре проводять електрику, вони - чорного кольору, що трохи обмежує області їх застосування. Застосування: вуглепластики використовуються в авіації, ракетобудуванні, машинобудуванні, виробництві космічної техніки, медтехніки, протезів, при виготовленні легких велосипедів і іншого спортивного інвентаря.

На основі вуглецевих волокон і вуглецевої матриці створюють композиційні **вуглеграфітові матеріали** – найбільш термостійкі композиційні матеріали (**вуглеуглепластики**), здатні довго витримувати в інертних або відновних середовищах температури до 3000° С.

Отримання. 1 спосіб: вуглецеві волокна просочують фенолформальдегідною смолою, піддаючи потім дії високих температур (2000°С), при цьому відбувається піроліз органічних речовин і утворюється вуглець. Щоб матеріал був менш пористим і щільнішим, операцію повторюють кілька разів.

2 спосіб: полягає в прожарюванні звичайного графіту за високих температур в атмосфері метану. Дрібнодисперсний вуглець, що утворюється при піролізі метану, закриває всі пори в структурі графіту. Щільність такого матеріалу збільшується в порівнянні з щільністю графіту в півтора рази.

Застосування: З вуглеуглепластиків роблять високотемпературні вузли ракетної техніки і швидкісних літаків, гальмівні колодки і диски для швидкісних літаків і багаторазових космічних кораблів, електротермічне устаткування.

**В) Боропластики** – композити, що містять як наповнювач борні волокна, вставлені в термореактивну полімерну матрицю, при цьому волокна можуть бути як у вигляді монониток, так і у вигляді джгутів, обплетених допоміжною скляною ниткою або стрічкою, в якій борні нитки переплетені з іншими нитками. Завдяки великій твердості ниток, матеріал, що виходить, має високі механічні властивості (борні волокна мають найбільшу міцність при стисненні в порівнянні з волокнами з інших матеріалів) і велику стійкість до агресивних умов, але висока крихкість матеріалу утрудняє їх обробку і накладає обмеження на форму виробів з боропластиків. Крім того, вартість борних волокон дуже висока (порядку 400 \$/кг) у зв'язку з особливостями технології їх отримання (бор вилучають з бор хлориду на вольфрамову підкладку, вартість якої може досягати до 30% вартості волокна). Термічні властивості боропластиків визначаються термостійкістю матриці, тому робочі температури, як правило, невеликі.

Застосування боропластиків обмежується високою вартістю виробництва борних волокон, тому вони використовуються головним чином в авіаційній і космічній техніці в деталях, що піддаються тривалим навантаженням в умовах агресивного середовища.

**Г) Органопластики** – композити, в яких наповнювачами служать органічні синтетичні, рідше – природні і штучні волокна у вигляді джгутів, ниток, тканин, папери і так далі У термореактивних органопластиках матрицею служать, як правило, епоксидні, поліефирні і фенольні смоли, а також полііміди. Матеріал містить 40–70% наповнювача. Зміст наповнювача в органопластиках на основі термопластичних полімерів – поліетилену, ПВХ, поліуретану і тому подібне – варіюється в значно великих межах – від 2 до 70%. Органопластики мають високу хімічну стійкість, низьку щільність, вони легше скло- і вуглепластиків, мають високу міцність при розтягуванні, високий

опір удару і динамічним навантаженням, але, в той же час, мають низьку міцність при стисненні і вигині.

Важливу роль в поліпшенні механічних характеристик органопластика грає орієнтація макромолекул наповнювача. Макромолекули жорстколанцюгових полімерів, таких, як поліпарафенілтерефталамід (*кевлар*) в основному орієнтовані у напрямі осі полотна і тому володіють високою міцністю при розтягуванні уздовж волокон. З матеріалів, армованих кевларом, виготовляють кулезахистні бронежилети.

Органопластики знаходять широке застосування в авто-, судо-, машинобудуванні, авіа- і космічній техніці, радіоелектроніці, хімічному машинобудуванні, виробництві спортивного інвентаря і т.д.

*Д) Полімери, наповнені порошком.* Відомо більше 10000 марок наповнених полімерів. Наповнювачі використовуються як для зниження вартості матеріалу, так і для додання йому спеціальних властивостей. Вперше наповнений полімер почав робити доктор Бейкеленд (Leo H. Baekeland, США), що відкрив на початку 20 ст. спосіб синтезу фенолформальдегідної (бакелітової) смоли. Сама по собі ця смола – речовина крихка, така, що має невисоку міцність. Бейкеленд виявив, що добавка волокон, зокрема, деревної муки до смоли до її твердіння, збільшує її міцність. Створений ним матеріал – *бакеліт* – став дуже популярним. Технологія його приготування проста: суміш частково затверділого полімеру і наповнювача – прес-порошок - під тиском необоротно твердне у формі. Перший серійний виріб, зроблений за даною технологією в 1916 р., це – ручка перемикача швидкостей автомобіля «Роллс-ройс». Наповнені термореактивні полімери широко використовуються донині.

Зараз застосовуються різноманітні наповнювачі так термореактивних, так і термопластичних полімерів. Карбонат кальцію і каолін (біла глина) дешеві, запаси їх практично не обмежені, білий колір дає можливість забарвлювати матеріал. Застосовують для виготовлення жорстких і еластичних полівінілхлоридних матеріалів для виробництва труб, електроізоляції, облицювальних плиток і т. д., поліефірних склопластиків, наповнення поліетилену і поліпропілену. Додавання тальку в поліпропілен істотно збільшує модуль пружності і теплостійкість даного полімеру. Сажа більше всього використовується як наповнювач гум, але вводиться і в поліетилен, поліпропілен, полістирол і тому подібне. Як і раніше, широко застосовують органічні наповнювачі – деревне борошно, мелену шкаралупу горіхів, рослинні і синтетичні волокна. Для створення композитів, що біорозкладаються, в якості наповнювача використовують крохмаль.

*Е) Текстоліти* – шаруваті пластики, армовані тканинами з різних волокон. Технологія отримання текстолітів була розроблена в 1920-х роках на основі фенолформальдегідної смоли. Полотна тканини просочували смолою, потім пресували при підвищеній температурі, отримуючи текстолітові пластини. Роль одного з перших застосувань текстолітів – покриття для кухонних столів – важко переоцінити.

Зараз з них формують не тільки пластини, але й фігурні вироби. В текстолітах застосовують широке коло термореактивних і термопластичних полімерів, іноді навіть застосовуються і неорганічні матриці – на основі силікатів і фосфатів. Як наповнювач використовуються тканини з найрізноманітніших волокон – бавовняних, синтетичних, скляних, вуглецевих, азбестових, базальтових і т.д. Відповідно - різноманітні властивості і застосування текстолітів.

### 1.2.3. Композиційні матеріали з металевою матрицею

При створенні композитів на основі металів у якості матриці застосовують алюміній, магній, нікель, мідь і т. д. Наповнювачем служать або високоміцні волокна, або тугоплавкі частинки різної дисперсності, що не розчиняються в основному металі.

Властивості дисперсноукріплених металевих композитів *ізотропні* – однакові на всіх напрямках. Додавання 5–10% армуючих наповнювачів (тугоплавких оксидів, нітридів, боридів, карбідів) приводить до підвищення опірності матриці навантаженням при підвищених температурах. Ефект збільшення міцності порівняно невеликий, проте суттєво збільшується жароміцність композиту в порівнянні з початковою матрицею. Так, введення в жароміцний хромонікелевий сплав тонкодисперсних порошоків оксиду торію або оксиду цирконію дозволяє збільшити температуру, при якій вироби з цього сплаву здібні до тривалої роботи, з 1000°C до 1200°C. Дисперсноукріплені металеві композити отримують, вводячи порошок наповнювача в розплавлений метал, або методами порошкової металургії.

Армування металів волокнами, ниткоподібними кристалами, дротом значно підвищує як міцність, так і жаростійкість металу. Наприклад, сплави алюмінію, армовані волокнами бору, можна експлуатувати при температурах до 450–500°C, замість 250–300°C. Застосовують оксидні, боридні, карбідні, нітридні металеві наповнювачі, вуглецеві волокна. Керамічні і оксидні волокна по причині своєї крихкості не допускають пластичну деформацію матеріалу, що створює значні технологічні труднощі при виготовленні виробів.

Отримання: просоченням пучків волокон розплавами металів, електроосадженням, змішуванням з порошком металу і подальшим спіканням та ін.

У 1970-х роках з'явилися перші **матеріали, армовані ниткоподібними монокристалами («вусами»)**. Ниткоподібні кристали отримують, протягуючи розплав через фільтри. Використовуються «вуса» оксиду алюмінію, оксиду берилію, карбідів бору і сіліцію, нітридів алюмінію і сіліцію і т. д. завдовжки 0,3–15 мм і діаметром 1–30 мкм. Армування «вусами» дозволяє значно збільшити міцність матеріалу і підвищити його жаростійкість. Наприклад, межа текучесті композиту з срібла, що містить 24% «вусів» оксиду алюмінію, в 30 разів перевищує межу текучесті срібла і в 2 рази – інших композиційних матеріалів на основі срібла. Армування «вусами» оксиду алюмінію матеріалів на основі вольфраму і молібдену удвічі збільшило їх міцність при температурі

1650°C, що дозволяє використовувати ці матеріали для виготовлення сопел ракет.

#### 1.2.4. Композиційні матеріали на основі кераміки

Армування керамічних матеріалів волокнами, а також металевими і керамічними дисперсними частинками, дозволяє отримувати високоміцні композити, проте, асортимент волокон, придатних для армування кераміки, обмежений властивостями початкового матеріалу. Часто використовують металеві волокна. Опір розтягуванню росте незначно, але підвищується опір тепловим ударам – матеріал менше розтріскується при нагріванні, але можливі випадки, коли міцність матеріалу падає. Це залежить від співвідношення коефіцієнтів термічного розширення матриці і наповнювача.

Армування кераміки дисперсними металевими частинками призводить до утворення нових матеріалів (*керметів*) з підвищеною корозійною стійкістю, стійкістю щодо теплових ударів, з підвищеною теплопровідністю. З високотемпературних керметов роблять деталі для газових турбін, арматуру електропечей, деталі для ракетної і реактивної техніки. Тверді зносостійкі кермети використовують для виготовлення ріжучих інструментів і деталей. Крім того, кермети застосовують в спеціальних областях техніки – це тепловідляючі елементи атомних реакторів на основі оксиду урану, фрикційні матеріали для гальмівних пристроїв і т.д.

Керамічні композиційні матеріали отримують методами гарячого пресування (таблетування з подальшим спіканням під тиском) або методом шлікерного литва (волокна заливаються суспензією матричного матеріалу, яка після сушки також піддається спіканню).

#### Контрольні питання до теми 1

1. Композиційні матеріали: основні поняття.
2. Історія застосування композиційних матеріалів.
3. Класифікація композиційних матеріалів.
4. Структура композиційних матеріалів. Волокнисті, шаруваті композити.
5. Полімерні композити (ПКМ): текстоліти, полімери, наповнені порошком - характеристика, одержання, застосування.
6. Полімерні композити (ПКМ): склопластики, вуглепластики - характеристика, одержання, застосування.
7. Полімерні композити (ПКМ): боропластики, органопластики - характеристика, одержання, застосування.
8. Дисперснопідсилені, зміцнені частинками і нанокомпозити.
9. Композиційні матеріали з металевою матрицею - характеристика, одержання, застосування.
10. Композиційні матеріали на основі кераміки - характеристика, одержання, застосування.



## Тема 2. Сучасні сплави, їх властивості та застосування

### 2.1. Сплави, одержання, загальні властивості, класифікація

**Сплави** – багатокомпонентні конденсовані системи з різних металів, або металів і неметалів, які мають характерні для металів властивості (високу електричну провідність, теплопровідність, металічний блиск).

#### **Одержання сплавів:**

- Сплавлянням компонентів;
- Сумісним осадженням з розчинів, газової фази;
- Дифузійним насиченням одного компоненту іншим.

Розрізняють однофазні і багатофазні сплави. Фазами можуть бути чисті компоненти, інтерметаліди, тверді розчини.

Властивості сплавів визначаються їх хімічним складом і структурою. Застосовуючи різні види обробки, можна зробити сплав при виготовленні виробу пластичним, а готові вироби міцними і твердими.

Структура і властивості сплавів піддаються змінам в результаті обробки в значно більшій мірі, ніж чисті метали. А за діапазоном змін багатьох властивостей значно переважають чисті метали.

Властивості металів та сплавів поділяють на **структурно-нечутливі** (густина, модуль пружності, температура плавлення) і **структурно-чутливі** (міцність, пластичність).

Розроблені сучасні сплави можуть бути жароміцними, жаростійкими, антифрикційними, корозійностійкими, легкими, надлегкими, а також існують сплави з особливими властивостями – тепловими, електричними, магнітними та іншими.

Класифікують сплави за вмістом основного компоненту: **алюмінієві, вольфрамкові, залізні, магнієві, титанові**.

### 2.2. Залізні сплави

**Чавун** – Fe + C (>2.2%), Si(0,3-5%), Mn (0,6%). Властивості: найдешевший, корозійностійкий, високі антифрикційні властивості, зносостійкість, міцність, непластичність.

**Сталі** – Fe + C (<2%), **леговані сталі** (вміст металів досягає: Co 42%, Cr 36%, Ni 29%, W 18%, Al 18%, Mn 15%, Si 6%, Mo 5%, U 2%). Міцні, тверді, пластичні, добра зварюваність, жаростійкі, паростійкі, зносостійкі.

**Нержавіючі сталі** містять 12-30% Cr, до 28% Ni, 2% Mn, 4,5% Mo. Стійкі до кислот – ортофосфатної, ацетатної, нітратної, хлоридної.

**Елінвар** – основа - Fe + Ni, містить Cr 5-16%. Властивості: постійність пружних властивостей, жаростійкість, висока міцність, добре зварюються, дешеві. За жароміцністю, корозійною стійкістю поступаються тільки нікелевим та алюмінієвим сплавам. Застосовуються для виготовлення мембран, камертонів, годинникових волосків.

**Інвар** – Fe + 36%Ni. Особлива властивість - малий температурний коефіцієнт розширення (застосовується для виготовлення вимірвальних приладів і інструментів).

**Ковар** – Fe + 29%Ni + 17,5%Co. Утворює вакуум-герметичні спаї зі склом; застосовується при виготовленні відповідних виробів та приладів.

**Фехраль** – Fe + Cr(8-15%) + Al(3.5-8%). Має високий електричний опір (виготовлення реостатів).

**Хромаль** – Fe +Cr(17-30%), Al(4,5-6%). Жаростійкість, високий електричний опір, мала жароміцність. Використовується для виготовлення високовольтних дротів.

### 2.2.1. Маркування сталей

#### Сталі вуглецеві звичайної якості (ГОСТ 380-88).

**Сталі вуглецеві звичайної якості** містять до 0,07% фосфору, 0,06% сірки, 0,06 ... 0,49% вуглецю і в рівноважному стані мають феритно-перлітну структуру.

Букви **Ст** в марці означають "сталь звичайної якості", цифри - умовний номер марки залежно від нормованих показників (величин механічних властивостей). Чим більше умовний номер сталі, тим більше вміст вуглецю і перліту в ній і тим вище її міцність і нижче пластичність.

Вуглецеві сталі звичайної якості виготовляють наступних марок: **Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6**. Стандартом передбачена також сталь з підвищеним (0,8 -1,1%) вмістом марганцю: **Ст3Гпс, Ст3Гсп і Ст5Гпс**.

За умовами поставки сталі звичайної якості класифікуються на три групи, літерне позначення яких (крім А) вказують на початку марки:

- **А** - поставляються *за механічними властивостями* (Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6) для виготовлення виробів, що не піддаються гарячій обробці;
- **Б** - поставляються *за хімічним складом* (БСт0, БСт1, ..., БСт6) для виготовлення виробів, що піддаються гарячій обробці;
- **В** - поставляються *за механічними властивостями і хімічним складом* (ВСт1, ВСт2, ..., ВСт5) для виготовлення зварних конструкцій.

Додатковими індексами вказуються ступінь розкислення і характер затвердіння сталі (наприклад, Ст3кп, Ст5пс, Ст6сп). У групі А за відсутності позначень сп, пс, кп мається на увазі сталь спокійна.

#### Якісні вуглецеві сталі

Сталі вуглецеві конструкційні якісні (ГОСТ 1050-74) містять не більше 0,35% фосфору, не більше 0,04% сірки, 0,05-0,6% вуглецю. Ці сталі характеризуються високими пластичністю і зварюваністю. Вони можуть використовуватися без термічної обробки або після неї.

Якісні вуглецеві сталі маркують цифрами 08, 10, 15, 20, .... 85. Двозначні числа в марці показують вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Додатковими індексами можуть бути вказані ступінь розкислення і характер затвердіння сталі (наприклад, сталь 08кп).

Низьковуглецеві (менше 0,25% С) якісні конструкційні сталі мають невисоку міцність і високу пластичність. Сталі 05кп, 08кп, 08, 10 йдуть на виготовлення деталей складної конфігурації методом холодного штампування. З сталей 15кп, 15, 20 виготовляють болти, гайки, гвинти, пальці, валки, осі, гаки, шпильки та інші деталі невідповідального призначення.

Середньовуглецеві (0,3-0,5% С) сталі 30, 35, ..., 55 використовуються після нормалізації, поліпшення та поверхневого гарту. Прожарюваність цих сталей невелика. Сталі 30, 35, 40, 45 використовуються для виготовлення деталей, від яких потрібно поєднання високої міцності з в'язкістю серцевини (осі, валики, гвинти, шайби, втулки, колінчаті вали та ін.).

Сталі 60, 65, ..., 85 з високим вмістом (0,6 - 0,85%) вуглецю мають підвищені міцність, зносостійкість і пружні властивості. Їх застосовують після гарту і відпуску, нормалізації та відпуску та поверхневого гарту. Із сталей 65, 70, 75, 80, 85 виготовляють деталі, що працюють в умовах тертя і вібраційних навантажень: прокатні валки (сталь 60), кранові колеса (сталь 75), диски зчеплення і впускні клапани компресорів (сталь 85), а також пружини і ресори (ГОСТ 14959-79).

### **Інструментальні вуглецеві сталі**

У вуглецевих інструментальних сталях (ГОСТ 1435-74) буква У в позначенні марки означає "вуглецева сталь", а цифра показує вміст вуглецю в десятих частках відсотка.

Вуглецеві інструментальні сталі можуть випускатися якісними (вміст сірки не перевищує 0,03%, фосфору - 0,035%) і високоякісними (з вмістом сірки не більше 0,02% і фосфору - 0,03%). Наприкінці марки високоякісних вуглецевих інструментальних сталей ставиться літера А.

Сталі У7, У8, У8А найбільш пластичні з вуглецевих інструментальних сталей. Вони йдуть на виробництво молотків, стамесок, зубил.

Із сталей У10, У11, У11А виготовляють різці, свердла, мітчики, фрези, плитки та інший міряльний і різальний інструмент для різання м'яких матеріалів. Сталі У12, У13, У13А використовуються для виготовлення інструменту, що працює без ударних навантажень (напилки, рашпілі, бритви).

### **Леговані конструкційні сталі**

Хімічний склад багатьох легованих конструкційних сталей визначено ГОСТ 4543-71 «Прокат з легованої конструкційної сталі. Технічні умови». Цей же стандарт визначає основні літерні символи для позначення легуючих елементів (таблиця 1). Необхідно враховувати, що в даний час випускають сталі з добавками елементів, позначення яких не передбачено стандартом. У цьому випадку елементи в марці сталі зазвичай позначають за першими літерами назви.

Якщо після букви немає цифри, то вміст легуючого елемента в сталі складає, як правило, близько 1,0 - 1,5%. Виняток зроблено для тих елементів, вплив яких проявляється вже при вмісті в сотих і десятих частках відсотка (азот, бор, ніобій, молібден, титан, ванадій, цирконій, алюміній, РЗМ).

Умовно за змістом легуючих елементів сталі поділяють на низьколеговані (вміст легуючих елементів менше 2,5%), леговані (від 2,5 до 10%) і високолеговані (більше 10% легуючих елементів при вмісті основного елемента - заліза - не менше 45%) .

**Таблиця 1. Умовні літерні позначення основних легуючих елементів в сталях**

А - азот *	П - фосфор
Б - ніобій	Р - бор *
В - вольфрам	С - кремній
Г - марганець	Т - титан
Д - мідь	Ф - ванадій
Е - селен	Х - хром
К - кобальт	Ц - цирконій
Л - берилій *	Ч - РЗМ
М - молібден	Ю - алюміній
Н - нікель	Ш - магній *

\* - Якщо буква стоїть в середині маркування, наприклад, 16Г2АФ

Якщо легуючого елемента більше 1,5%, то цифра після букви показує його вміст у відсотках. Наприклад, марка сталі 15Х означає сталь, що має в середньому 0,15% С і 1,0-1,5% Cr, сталь 35Г2 - 0,35% С і 2% Mn.

Літера «А» в середині марки вказує на підвищений вміст азоту в сталі. Зазначена вище марка сталі - 16Г2АФ містить 0,14 - 0,20% С; 1,3 - 1,7% Mn; до 0,025% N; 0,08 - 0,14% V.

Літера «А» на початку маркування вказує на те, що сталь належить до так званих автоматних, які використовують для обробки з великими швидкостями різання на спеціальних верстатах-автоматах (ГОСТ 1414-75). Наприклад, сталь А30 - містить близько 0,30% С і підвищений вміст сірки - до 0,15%. Сталь АС35Г2 для збільшення оброблюваності містить підвищену кількість свинцю (0,15 - 0,30% Pb).

Літера «А» в кінці марки є ознакою високоякісної сталі. Наприклад, сталь 40ХНМ - якісна, а 40ХНМА - високоякісна.

Особливо високоякісну сталь позначають буквою або декількома буквами через дефіс в кінці марки залежно від способу виробництва (**Ш** - електрошлаковий переплав, **ВД** - вакуумно-дуговий переплав, **ШВД** - електрошлаковий з подальшим вакуумно-дуговим, **ВІ** - вакуумно-індукційна виплавка, **ЕЛ** - електронно-променеви переплав, **ГР** - газокисневе рафінування та ін.) - 40ХНМ-Ш.

Буква «К» в кінці маркування вказує на те, що сталь має підвищений рівень і стабільність властивостей. Ці сталі називають котельними і використовують для виготовлення посудин, які працюють під високим тиском (ГОСТ 5520-79). Така сталь є конструкційною і дві цифри попереду вказують

на вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Наприклад, сталь 22К містить в середньому 0,22% С.

Літери «пп» наприкінці маркування означають «знижена прожарюваність» - сталь з регламентованим вмістом елементів, яку використовують при поверхневій обробці струмами високої частоти. Приклад, сталь 55пп.

Ливарні сталі у відповідності з ГОСТ 997-88 позначаються так само, як і конструкційні, тільки наприкінці маркування вказують літеру «Л». Наприклад, сталь 110М13Л - містить 1,1% С, близько 13% Мп, ливарна.

Для прикладу розглянемо маркування такого вигляду: 12х18н10т.

Перше цифрове значення говорить нам про наявність в сплаві 0,12% вуглецю. Далі маркування вказує на 18-процентну частку хрому і 10-процентну частку нікелю. Нарешті, остання буква «т» свідчить про наявність титану, а оскільки після неї відсутнє будь-яке значення, значить, частка цього елемента не перевищує 1,5%. Що можна сказати про цей сплав? 0,1% вуглецю надає сплаву аустенітну структуру, велика концентрація хрому гарантує сплаву високу корозійну стійкість, нікель захищає сталь від впливу кислотних середовищ, а титан позбавляє сплав від такого явища, як межкристалітна корозія.

Частково розшифрувати марку сталі можна і за кольором маркування. Використовувана для цих цілей фарба є незмивною, проте її застосування необов'язкове - замовник сам вказує необхідність нанесення кольорового маркування. В таблиці 2 містяться відомості про кольорове маркування сталей (яке наноситься у вигляді кольорових квадратиків).

**Таблиця 2. Кольорове маркування сталей**

<b>Сталь</b>	<b>Опис маркування</b>
<b><i>Сталь звичайної якості</i></b>	
Ст0, ВСт0, БСт0	Червоний і зелений
Ст1, ВСт1кп	Жовтий і чорний
Ст2, ВСт2кп	Жовтий
Ст3, ВСт3кп, ВСт3, БСт3	Червоний
Ст4, ВСт4кп, ВСт4, БСт4	Чорний
Ст5, ВСт5	Зелений
Ст6	Синій
<b><i>Вуглецева якісна сталь</i></b>	
08, 10, 15, 20	Білий
25, 30, 35, 40	Білий і жовтий
45, 50, 55, 60	Білий і коричневий
<b><i>Легована конструкційна сталь</i></b>	
Хромиста	Зелений і жовтий
хромомолібденова	Зелений і фіолетовий
Хромованадієва	Зелений і чорний
Марганцевиста	Коричневий і синій
Хромомарганцевиста	Синій і чорний

Хромокремнієва	Синій і червоний
Хромокремніймарганцева	Червоний і фіолетовий
Хромонікелева	Жовтий і чорний
Нікельмолібденова	Жовтий і фіолетовий
Хромоалюмінієва	Алюмінієвий
Хромонікельмолібденова	Фіолетовий і чорний
<b><i>Корозійностійка сталь</i></b>	
Хромиста	Алюмінієвий і чорний
Хромонікелева	Алюмінієвий і червоний
Хромотитанова	Алюмінієвий і жовтий
Хромонікелькремнієва	Алюмінієвий і зелений
Хромонікельтитанова	Алюмінієвий і синій
Хромонікельніобієва	Алюмінієвий і білий
Хромомарганценікелева	Алюмінієвий і коричневий
Хромонікельмолібденотитанова	Алюмінієвий і фіолетовий

### **2.3. Алюмінієві сплави**

Алюмінієві сплави – сплави на основі алюмінію. Властивості: мала густина (2,5-3,0 г/см<sup>3</sup>, високі механічні властивості, задовільна стійкість до окиснення. Застосовуються для різних потреб промисловості і побуту: виготовлення ємностей, деталей обладнання, фольги для продуктів.

***Алюмінієві сплави з підвищеною пластичністю*** містять Mg до 2,8%, Mn до 1,5%.

***Дуралюміні*** – Al + Cu 1.4-13%, Mg 0.4-48%, Mn 0.2-1%, Si 0.5-6%, Zn 5-7%. Листовий дуралюмін плакують алюмінієм. Найменш корозійностійкі з усіх алюмінієвих сплавів, схильні до міжкристалічної корозії, погано зварюються, але найміцніші з алюмінієвих сплавів (тому застосовуються в авіабудуванні).

***Силуміни*** – Al + Si 3-26%, Cu 1-4%, Mg 0,2-1,3%. Невисока міцність, хороші ливарні властивості, крихкість, по корозійній стійкості вище дуралюмінію. Широко використовується в авіа-, вагоно-, автомобілебудуванні.

### **2.4. Магнієві сплави**

Легкі, висока питома міцність, стійкість до удару і вібрацій. Низька корозійна стійкість, поступаються навіть алюмінієвим сплавам. Потребують захисту. Низька жароміцність (до 350<sup>0</sup>C). Mg + Al 9% - найпоширеніший магнієвий сплав.

***Надлегкі магнієві сплави*** - (Mg + Li 5%, Al 6%, 0,6-1,2% Zr). Найменш корозійностійкі.

## 2.5. Мідні сплави

**Латуні** – сплав Cu + Zn, якщо Zn до 50% - латуні пластичні, міцні; якщо Zn до 20% - стійкі до атмосферної корозії, вище 20% – корозійне розтріскування.

**Олов'яна латунь (адміралтейська)** 1-1,5% Sn і **алюмінієва латунь** до 2,5% Al – стійкі в морській воді, кислотах-неокисниках.

**Нікелева латунь** 12-16,5% Ni – стійка в кислотах-неокисниках, морській воді, розчинах солей. Застосовується в хімічному машинобудуванні.

**Мельхіор** – Cu + 5-33% Ni, Fe 1%, Mn 1%. Стійкий до атмосферної корозії і у морській воді, пластичний. З нього виготовляють посуд, прикраси.

**Константан** – Cu + 39-41% Ni, 1-2% Mn. Малий температурний коефіцієнт електричного опору. Виготовляють з нього резисторні елементи випромінювальних приладів, термопари.

**Копель** – Cu + 44%Ni, 1%Mn. Стійкий до атмосферної корозії. Застосовується як електрод термопар для вимірювання температури до 600<sup>0</sup>С.

**Хромель** – Cu + 17-30% Cr. Застосовується як нагрівальні елемент високотемпературних печей.

**Бронзи** – на основі Cu. Переважають чисту мідь і латунь за антикорозійними властивостями і міцністю, зносостійкістю. Бронзи стійкі на **в H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**

повітрі, водяній парі, ;

**олов'яні** – Sn 2,5-19,5%;

**алюмінієві** Al 4-11%; стійкі в морській воді; розведеної HCl;

**берилієві** Be 1,6-2,1%;

**кремнієві** Si 0,6-3,5%. стійкі в сухих газах **Cl<sub>2</sub>, Br<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>**.

Застосовуються для виготовлення підшипників, втулок, алюмінієві – монет, олов'яні – для виготовлення відливок складної форми, берилієві – у приладобудуванні (мембрани).

**Манганін** – Cu + 11-14% Mn, має малий температурний коефіцієнт електричного опору. Застосовується для виготовлення еталонних опорів.

## 2.6. Кобальтові сплави

**Вікалой** – Co + Fe 51%, V до 13%. Висока жароміцність, висока вартість. Постійні магніти.

**Віталіум** – Co + Cr 25-30%, Mo 4.5-6.5%, Ni 1.5-3.5%. Висока міцність при температурі 90-800<sup>0</sup>С, корозійна стійкість. Виготовлення литих деталей газових турбін.

## 2.7. Нікелеві сплави

**Пермалой** – Ni + Fe 20-60%. Висока магнітна проникність, застосовується в апаратурі техніки зв'язку. Корозійно стійкі, міцні, жароміцні, жаростійкі, але мають високу вартість.

**Алюмель** – на основі Ni + Al 1,8-2,5%, Mn 1,8-2,2%, Si 0,85-2,0%, Co 0,6-1,0%. Висока жаростійкість до 1000<sup>0</sup>С. Виготовлення термоелементів термопар.

### 2.8. Титанові сплави

Властивості: мала густина (~4,5 г/см<sup>3</sup>), висока міцність, відмінна корозійна стійкість (морська вода, царська горілка не руйнують їх). Недоліки: висока вартість, окиснення при гарячій обробці (>600<sup>0</sup>С). Застосування: авіа-, ракето-, суднобудування (відповідальні вузли).

**Нітінол** – Ti + 45% Ni. Ефект пам'яті після пластичного деформування – застосовується для виготовлення деталей в автоматичних реле протипожежних пристроїв, антен космічних кораблів.

### 2.9. Ніобієві сплави

Жароміцніші, ніж нікелеві та кобальтові сплави, пластичніші, ніж вольфрамкові та молібденові сплави, але вище 400<sup>0</sup>С – інтенсивно кородують на повітрі. Застосовують з покриттям, висока вартість; літако- і ракетобудування.

**Пермінвар** – Nb + Fe 30%, Co 23-25%, стала магнітна проникність. Застосовується у вимірювальній техніці та радіотехніці для виготовлення високостабільної апаратури, яка мінімально спотворює перетворюваний сигнал.

**Монель-метал** – Nb + 23-27% Cu, корозійно стійкий. Застосовується в хімічному машинобудуванні, медицині.

### 2.10. Вольфрамкові сплави

На основі W. Висока жароміцність, але крихкі (нестійкі) на повітрі вище 600<sup>0</sup>С; поглинають іонізуюче випромінювання. З них виготовляють нагрівальні елементи, теплоекрани, контейнери для зберігання радіоактивних відходів.

### 2.11. Танталові сплави

Висока жароміцність, вище 280<sup>0</sup>С – окислюються. За стійкістю в кислотах неокисниках переважають всі благородні метали і сплави. Висока вартість. Виготовляють з цих сплавів деталі літаків і ракет, нагрівальні елементи електронних ламп, деталі кислотостійкої апаратури.

### 2.12. Бабіти

Бабіти - група антифрикційних сплавів (мають низький коефіцієнт тертя). Висока зносостійкість, пластичність. Застосовуються для заливки вкладишів підшипників ковзання. Склад бабітів:

На основі Sn: Sb (до 12%), Cu (до 6.5%), Pb (до 1.5);

На основі Pb: Sb (до 18%), Sn (до 17%), Cu (до 2%), Cd (до 1.7%);

На основі Zn: Al (до 10%), Cu (до 10%);

На основі Al: Ca (до 9.5%), Sb (до 6%), Pb (до 5%) ;



## 2.13. Інші сплави

**Амальгами** - сплави на основі ртуті. Бувають рідкі і тверді. Інертні до корозії, мають добрі теплофізичні властивості. Амальгами – проміжні продукти при вилученні благородних металів з рудні концентратів (метод амальгамації). На основі рідких амальгам створена амальгамна металургія індію, кадмію, талію, свинцю, галію. Амальгама талію, яка твердне при (мінус)  $-60^{\circ}\text{C}$ , застосовується для виготовлення низькотемпературних термометрів. Амальгами цинку і лужних металів – відновники в лабораторній практиці.

**Захисні металічні покриття** – від атмосферної корозії захищає покриття Zn завтовшки до 30 мкм, Ni - до 15 мкм, Cr - до 200 мкм, застосовуються також комбіновані захисні покриття.

**Сплав Вуда** – містить Bi 50%, Pb 25%, Sn 12.5%, Cd 12.5%. Низька температура плавлення ( $+68^{\circ}\text{C}$ ). Застосовується для виготовлення мелатевих моделей, паяння деяких сплавів. Токсичний.

### Контрольні питання до теми 2

1. Класифікація матеріалів, що застосовуються в сучасній техніці: метали та сплави, пластичні матеріали, композиційні матеріали, інші матеріали (бетон, залізобетон, дерев'яні вироби).
2. Властивості сучасних матеріалів (структурно-нечутливі, структурно-чутливі).
3. Класифікації сплавів.
4. Сучасні сплави: типи, способи одержання.
5. Основні алюмінієві сплави, їх склад, властивості, корозійна стійкість, застосування.
6. Основні залізні сплави, їх склад, властивості, корозійна стійкість, застосування.
7. Основні мідні сплави, їх склад, властивості, корозійна стійкість, застосування.
8. Основні хромвмісні сплави, їх склад, властивості, корозійна стійкість,
9. Застосування.
10. Магнієві, титанові сплави, їх склад, властивості, корозійна стійкість, застосування.
11. Кобальтові, нікелеві сплави, їх склад, властивості, корозійна стійкість, застосування.
12. Ніобієві, танталові, вольфрамові сплави, їх склад, властивості, корозійна стійкість, застосування.
13. Стійкість різних сплавів проти дії агресивних газів.

## **Тема 3. Поняття про корозію металів, класифікація корозійних процесів**

### **3.1. Корозія металів, загальні відомості**

**Корозією** металів називають самовільну руйнацію металічних матеріалів (сплавів) в наслідок їх фізико-хімічної взаємодії з оточуючим середовищем.

Не слід плутати корозію з радіоактивним розпадом, розчиненням металів для одержання солей, руйнуванням їх в гальванічних елементах, з ерозією металів при механічних обробках.

Корозійний процес є гетерогенним, тому що протікає на межі двох фаз: метал – оточуюче середовище.

**Приклади корозії:** іржавіння металічних конструкцій в атмосфері (дахів, мостів, верстатів); металічної обшивки суден у воді; руйнація металічних баків та апаратів з розчинами кислот, солей, лугів на хімічних підприємствах; сталіних трубопроводів під землею.

### **Значення захисту металів:**

**Втрати від корозії металів** складаються: 1. з вартості виготовлення металічних конструкцій, що вийшли з ладу, внаслідок корозії, 2. незворотних витрат металу у вигляді продуктів корозії; 3. інших витрат.

1. Амортизаційний лом, що містить зруйновані корозією металічні конструкції, складає не менше 1/5 річного виробництва сталі. Хоча амортизаційний лом переплавляють в мартеновських печах, однак вартість виготовлення конструкцій, яка часто перевищує вартість металу, незворотно губиться.
2. Незворотні витрати металів від корозії за термін служби металевих конструкцій складають 8% від початкової маси металу; таким чином, частина виробничої потужності металургії йде на компенсацію корозійних витрат металу.
3. До інших витрат належать витрати, пов'язані з раптовим псуванням під час роботи металевих конструкцій, їх простоем, псуванням продуктами корозії харчових продуктів, витрат на ремонт, забруднення довкілля.

**Наука про корозію та захист металів** вивчає взаємодію металів з довкіллям, механізм цієї взаємодії та його загальні закономірності.

**Кінцева практична мета** – захист металів від корозійної руйнації при експлуатації металевих конструкцій в атмосфері, воді, розчинах електролітів, ґрунті, продуктах горіння палива.

**Наукова база вчення про корозію** – це фізична хімія (термодинаміка та кінетика гетерогенних і електрохімічних процесів). Термодинаміка дає відомості, про можливість або неможливість самовільного протікання корозійного процесу при певних умовах. Хімічна кінетика вивчає швидкості корозійного процесу та фактори, що впливають на швидкість.

**Практичний метод захисту металів** – це створення умов, що зменшують або повністю виключають можливість протікання корозійного процесу (застосування захисних газових атмосфер, знекиснювання води, катодний захист).

**Особливість корозійних процесів** – їх складність та багатостадійність.

Розрізняють 3 основні стадії корозійних процесів:

- 1) Перенос реагуючих речовин до поверхні розділу фаз – реакційної зони;
- 2) Власне гетерогенна реакція;
- 3) Відвод продуктів реакції від реакційної зони.

**Фактори, що впливають на швидкість корозії:**

1. Швидкість дифузії реагентів до поверхні металу, або продуктів реакції в зворотньому напрямку (дифузійний контроль процесу);
2. Швидкість хімічних або електрохімічних реакцій корозії – взаємодія металу с довкіллям (кінетичний контроль процесу).
3. Швидкість цих двох стадій з урахуванням гальмування (кінетично-дифузійний контроль процесу).

### 3.2. Класифікація корозійних процесів

**I. За механізмом процесу:**

- 1) **Хімічна корозія** – при ній окиснення металу та відновлення окисника корозійного середовища відбувається в одному акті.
- 2) **Електрохімічна корозія** – це корозія в присутності електролітичного середовища, в якому окиснення металу та відновлення окисника відбувається не в одному акті та їх швидкості залежать від електродного потенціалу металу.

**II. За умовами протікання корозії:**

- 1) **Газова корозія** – корозія металів в газах, звичайно за високих температур (окиснення металів при нагріванні);
- 2) **Корозія в неелектролітах** – корозія металів в непровідящих електричний струм рідких органічних середовищах (корозія сталі в бензині);
- 3) **Атмосферна корозія** – корозія в природній атмосфері повітря (іржавіння металевих конструкцій в цеху або на вулиці);
- 4) **Корозія в електролітах** – корозія в рідких середовищах, що проводять електричний струм. За природою електроліта корозію поділяють на:
  - Кислотну
  - Лужну
  - Сольову
  - Корозію в морській воді
  - Корозію в розплавлених солях та лугах.
- 5) **Грунтова корозія** – корозія металів в ґрунті (трубопроводи);
- 6) **Структурна корозія** – пов'язана з структурною неоднорідністю металу (наприклад, прискорення корозії в  $H_2SO_4$  катодним включенням: карбідами в сталі, графітом в чавуні, інтерметалідом  $CuAl_2$  в дюралюмінії).
- 7) **Корозія зовнішнім струмом** – електрохімічна корозія металів під впливом струму від зовнішнього джерела (розчинення сталюого

анодного заземлення станції катодного захисту підземного трубопровода).

- 8) **Електрокорозія** – корозія металів, що виникає під впливом струмів розсієння (наприклад, руйнування трубопровода мандрівним струмом);
- 9) **Контактна корозія** – електрохімічна корозія при контакті металів, що мають різні потенціали в даному електроліті (наприклад, корозія у морській воді деталей з алюмінієвих сплавів, що знаходяться в контакті з мідними деталями);
- 10) **Щільова корозія** – посилення корозії металів електролітами у вузьких зазорах та щілинах;
- 11) **Корозія під напругою** – корозія металів при одночасному впливі корозійного середовища та механічних напруг.

Розрізняють:

- а) при сталому навантаженні (корозія металу парових котлів);
  - б) при змінному навантаженні (корозія насосів, ресор, сталевих канатів).
- Цей вид корозії викликає **корозійну втому** – зниження витривалості металу;

12) **Корозія при терті (корозійна ерозія)** – руйнування металу при одночасному впливі корозійного середовища та тертям;

13) **Біокорозія** – корозія металів при участі продуктів, що виділяють мікроорганізми.

14) **Корозійна кавітація** – при одночасному корозійному і ударному впливі зовнішнього середовища (руйнування лопатей гребних гвинтів у морській воді);

### ***III. За умовами взаємодії металічних конструкцій з корозійним середовищем:***

- 1) Корозія при повному, неповному, змінному зануренні;
- 2) Корозія по ватерлінії (на межі між зануреної та незануреної частини поверхні металу);
- 3) Корозія в переміщуваному та непереміщуваному електроліті.

### ***IV. За характером корозійного руйнування:***

- 1) **Загальна (суцільна)** – корозія що охоплює всю поверхню металу:
  - а) рівномірна – відбувається з однаковою швидкістю по всій поверхні металу (рис.1а);
  - б) нерівномірна – відбувається з неоднаковою швидкістю на різних ділянках поверхні металу (рис.1б);
  - в) вибіркова (селективна) – при якій руйнується один компонент сплаву (рис.1в).

2) **Місцева корозія** – що охоплює лише деякі ділянки поверхні металу:

- а) плямами корозія у вигляді окремих плям (рис.1г), (наприклад, латунь у морській воді);
- б) виразками – у вигляді окремих глибоких уражень (рис.1д).

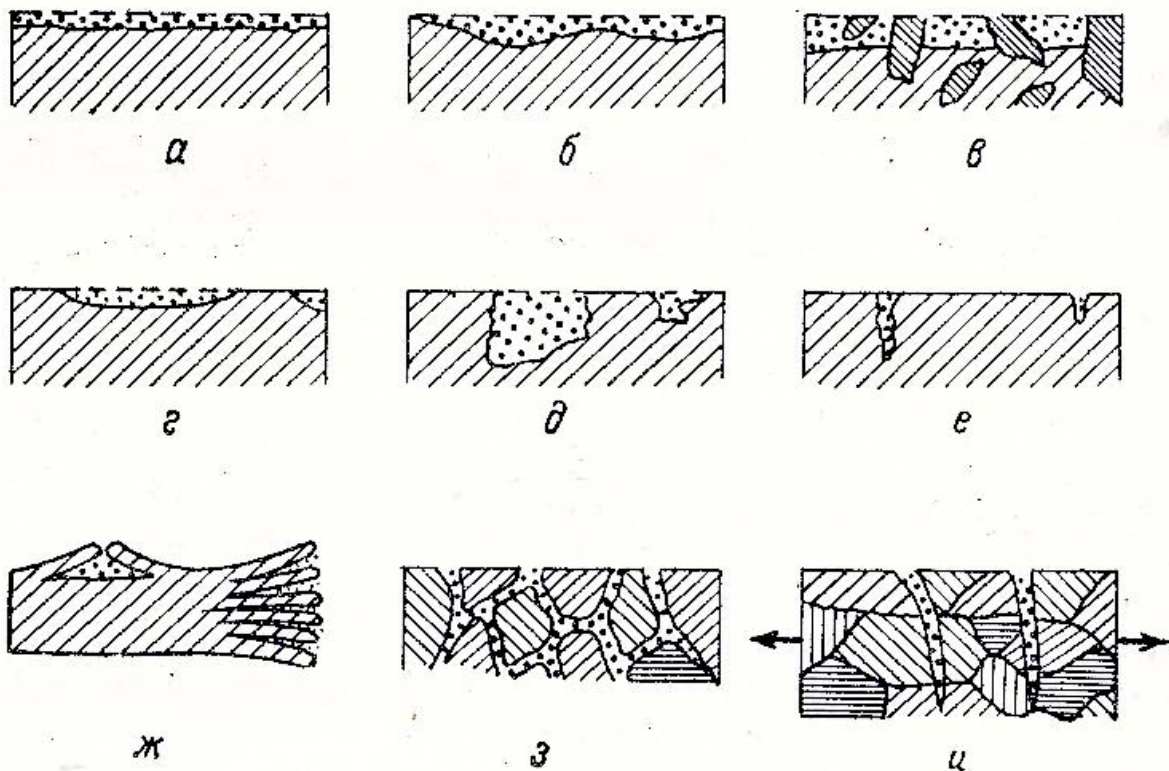
в) точечна (пітінг) – у вигляді окремих точок діаметром 0,1-2 мм (рис.1е).

г) скрізна – скрізна руйнація металу;

д) підповерхнева – починається на поверхні, але розповсюджується під поверхнею металу (рис.1ж);

е) міжкристалітна корозія – розповсюджується по межах зерен кристалів металу. Небезпечна тому, що не змінюється зовнішній вигляд металу, а міцність та пластичність його втрачена (рис.1з);

ж) корозійне розтріскування – утворення тріщин металу при одночасному впливі корозійного середовища та розтягуючих напруг, при цьому корозійна тріщина розповсюджується не тільки інтеркристалічно, але й транскристалічно (по тілу кристалу) (рис.1и).



**Рис.1.** Характер корозійних руйнувань: а – рівномірна корозія; б – нерівномірна корозія; в – селективна; г – плямами; д – виразкова; е – точечна (пітінг); ж – підповерхнева; з – міжкристалітна; и – корозійне розтріскування.

### Контрольні питання до теми 3

1. Що означає термін «корозія металів»?
2. Які особливості протікання процесу корозії?
3. Як розрізняються види корозії за механізмом процесу?
4. Як класифікуються корозійні процеси за характером корозійного руйнування?
5. Як класифікуються корозійні процеси за умовами протікання корозійних процесів?
6. Що таке електрокорозія?

7. Чим небезпечне піттингове і виразкове ураження металів?
8. На які види поділяється корозія в рідких електролітах?
9. За яких умов виникає розтріскуюча корозія?
10. Де на практиці зустрічається корозія в неелектролітах?

#### Тема 4. Показники швидкості корозії

##### Кількісна оцінка процесу корозії

1. **Ваговий (негативний) показник корозії** – показник зміни маси металу за даний проміжок часу (характеризує зменшення маси одиниці площини металу за одиницю часу)

$$\frac{g_0 - g_1}{ST}$$

$$W_c^- = \quad ;$$

- $g_0$  – початкова маса зразка металу, г  
 $g_1$  – маса зразка металу після корозії, г  
 $S$  – площа поверхні зразка, м<sup>2</sup>  
 $T$  – тривалість процесу корозії, год.  
 $g_0 \geq g_1$

2. **Ваговий (позитивний) показник корозії** – показник збільшення маси одиниці площі металу (за рахунок утворення продуктів корозії) за одиницю часу:

$$\frac{g_2 - g_0}{ST}$$

$$W_c^+ = \quad ;$$

$g_2$  – маса зразка металу з продуктами корозії

3. **Глибинний показник корозії** – характеризує зміну товщини зразка за одиницю часу за умови рівномірності розчинення металу (зазвичай, зменшення товщини зразка в мм за 1 рік):

$$P_c = \frac{(g_0 - g_1) \cdot 8760}{1000 \cdot S \cdot T \cdot d} ; \quad \left[ \frac{\text{Мм}}{\text{рік}} \right]$$

- $d$  – питома вага металу, г/см<sup>3</sup> (густина);  
 8760 – кількість годин у році;

S – площа поверхні зразка в м<sup>2</sup>

Таким чином,

$$P_c = \frac{W_c * 8760}{1000 * p}$$

4. **Об'ємний показник корозії** – характеризує середню швидкість електрохімічної корозії, яка розраховується за об'ємом водню (або кисню), що виділився під час корозії з одиниці поверхні металу за одиницю часу:

$$V_c = \frac{V_0}{S * T};$$

$$V_c = \frac{V * 273 (p_{\text{барометр.}} - p_{(H_2O)} - h_{(H_2O)})}{760 * S * T * (273 + t)}$$

Де V – об'єм Н<sub>2</sub>, зібраний за час досліду T при температурі t, см<sup>3</sup>;

t - температура, °С;

p<sub>барометр.</sub> – атмосферний тиск, мм. рт. ст.;

p<sub>(H<sub>2</sub>O)</sub> – тиск пари води при температурі досліду, мм. рт. ст. (див. таблицю 3);

h<sub>(H<sub>2</sub>O)</sub> - висота стовпа води в авдіометрі в кінці досліду, мм;

S – площа поверхні зразка, см<sup>2</sup>

$$P_{\text{бар}} = P_{H_2} + P_{H_2O} + \frac{h}{13,6};$$

$$P_{H_2} = P_{\text{бар}} - P_{H_2O} - \frac{h}{13,6}$$

13,6 г/см<sup>3</sup> – густина ртуті.

**Таблиця 3. Тиск пари води за різних температур**

t, °C	P <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , мм.рт.ст.	t, °C	P <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , мм.рт.ст.
18	15,5	21	18,5
19	16,5	22	19,5
20	17,5	24	22,4

Формула побудована з застосуванням об'єднаного газового закону:

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P V}{T}; \quad V_0 = \frac{T_0 p V}{p_0 T}$$

Це приведений до н.у. об'єм водню, віднесений до одиниці поверхні металу (за годину). Тоді:

$$V_c = \frac{V_0}{S T} = \frac{T_0 p V}{p_0 T * S T} = \frac{273 V (P_{\text{бар}} - P_{H_2O} - h/13,6)}{760 * (273 + t) S T}$$

5. **Струмний показник корозії** характеризує швидкість електрохімічної корозії у струмових одиницях. Це анодна густина струму, що відповідає швидкості даного корозійного процесу:

$$i_c = \frac{n * 2,68 * 10^{-3} * W_c}{A}, \quad [A/cm^2]$$

$$i_c = 2,3896 * 10^{-3} V_c(H_2),$$

$$W_c = \frac{3,73 * 10^{+2} * A * i_c}{n}$$

$$i_c = \frac{W_c * n}{3,73 * 10^2 * A} = \frac{2,68 * 10^{-3} * W_c}{A}$$

$n$  – валентність металу при корозії;

$A$  – атомна маса металу;

$F'$  – стала Фарадея [ $A * год$ ]  $\rightarrow F' = \frac{96500}{3600} = 26,8 A * год$

Об'ємні показники в формулах швидкості електрохімічної корозії:

$W_c^- = V_c(H_2) * 08917 * A/n$  ; (негативний ваговий показник швидкості корозії з водневою деполяризацією);

$W_c^- = V_c(O_2) * 1,7862 * A/n$  ; (негативний ваговий показник швидкості корозії з кисневою деполяризацією);

Струмний показник швидкості корозії з водневою деполяризацією:

$$i_c = V_c(H_2) * 2,3896 * 10^{-3} ; [A/cm^2]$$

Струмний показник швидкості корозії з кисневою деполяризацією

$$i_c = V_c(O_2) * 4,7870 * 10^{-3} ; [A/cm^2]$$

Якщо одночасно присутня воднева і киснева деполяризація, то:

$$W_c^- = A/n (V_c(H_2) * 08917 + V_c(O_2) * 1,7862)$$

Перехід до глибинного показника корозії:

$$P_c = \frac{W_c * 8760}{1000 * V}$$

$$P_c = i_c * A * 3268,7 ; \quad [мм/рік]$$



**nd**

$$P_c = \frac{V_c(\text{H}_2) * A}{nd} * 7,8113$$

$$P_c = \frac{V_c(\text{O}_2) * A}{nd} * 15,6471$$

В таблиці 7 додатку наведена десятибальна шкала корозійної стійкості металів в залежності від значення глибинного показника швидкості корозії, згідно з якою метали поділяються, в залежності від значення глибинного показника швидкості корозії, на дуже стійкі, вельми стійкі, стійкі, зниженостійкі, малостійкі, нестійкі. Металам присуджується бал корозійної стійкості від одного до десяти, причому чим стійкіший метал, тим бал *нижчий*.

#### **Контрольні питання до теми 4**

1. Кількісна оцінка процесу корозії: ваговий позитивний та негативний показники.
2. Струмівий показник швидкості корозії, фізичний зміст, формула.
3. Об'ємний показник швидкості корозії, фізичний зміст, формула.
4. Експериментальне визначення об'єму газу, що виділився при корозії і приведення його до нормальних умов.
5. Глибинний показник швидкості корозії.
6. Наведіть формули для визначення швидкості електрохімічної корозії з водневою деполяризацією.
7. Наведіть формули для визначення швидкості електрохімічної корозії з кисневою деполяризацією.
8. Наведіть формули для визначення швидкості електрохімічної корозії з одночасною кисневою і водневою деполяризацією.
9. Десятибальна шкала корозійної стійкості металів.
10. Наведіть формули переходу від одного показника швидкості корозії до іншого.

#### **Тема 5. Хімічна корозія металів**

**Хімічна корозія** – це корозія внаслідок хімічної взаємодії з зовнішнім середовищем, в якому окиснення металу та відновлення окисника відбувається в одному акті. Спостерігається при дії на метали сухих газів (повітря, продуктів горіння палива) та різних неелектролітів (нафти, бензина), і є гетерогенною реакцією.

##### **5.1. Газова корозія**

**Газова корозія** – це корозія в газах за високих температур. Причина – термодинамічна нестійкість металів в даному газовому середовищі, за даної температури і парціальному тиску агресивного компонента.

Кордують: металічна арматура печей, двигуни внутрішнього згорання, лопатки газових турбін, металічні хімічні апарати, метали при механічних обробках.

**Жаростійкість металів** – здатність металів чинити опір корозії газами за високих температур.

**Жароміцність металів** – здатність металів зберігати за високих температур механічні властивості: міцність і опір повзучості.

Необхідне сполучення цих властивостей для придатності металів в умовах корозії в газовому середовищі: наприклад, алюмінієві сплави жаростійкі в атмосферному повітрі, але не жароміцні; а сплави нікелю з хромом і жаростійкі, і жароміцні; вольфрамова сталь за 600-700<sup>0</sup>С жароміцна, але не жаростійка.

## 5.2. Термодинаміка процесу газової корозії

У якості критерію рівноваги та самовільності будь-яких процесів користуються  $\Delta G_{xp}$  – ізобарно-ізотермічним потенціалом.

Якщо  $\Delta G_{xp} < 0$  - корозія можлива

$\Delta G_{xp} > 0$  - корозія неможлива

$\Delta G_{xp} = 0$  - система знаходиться в стані хімічної рівноваги

Для найбільш розповсюдженої реакції газової корозії металів – реакція окиснення киснем при сталих тиску та температурі (p,t =const).

Рівняння ізотерми хімічної реакції :

$$\Delta G_T^0 = -2.303RT \lg(K_p)$$

$$\Delta G_T = RT * 2.303 \lg \frac{1}{P_{O_2}^4} - RT * 2.303 \lg \frac{1}{P_{O_2}^4_{плк}} =$$

$$= RT * 2.303 \lg \frac{1}{P_{O_2}^4} - 2.303RT \lg(K_p)$$

$$\Delta G_T = RT * 2.303 \lg \frac{1}{P_{O_2}^4} + \Delta G_m^0$$

$$\Delta G_T = -2.303RT \lg \frac{P_{O_2}^4}{P_{O_2}^4_{плк}}$$

$\Delta G_T$  – зміна ізобарно-ізотермічного потенціалу;

$R$  – універсальна газова стала;

$P_{O_2}$  – парціальний тиск, що відповідає вихідному стану системи;

$P_{O_2_{р\text{івн}}}$  – парціальний тиск, що відповідає рівноважному стану системи;

$m$  – число атомів металу в молекулі оксиду;

$n$  – валентність металу;

$K_p$  – константа хімічної рівноваги;

$\Delta G_T^0$  – стандартна зміна ізобарно-ізотермічного потенціалу при

$P_{O_2} = 101325 \text{ Па}$  (1 атм).

З останнього рівняння випливає, що реакція можлива ( $\Delta G_m < 0$ ), тобто, корозія можлива, коли  $P_{O_2} > P_{O_2_{р\text{івн}}}$  і корозія неможлива, коли  $P_{O_2} < P_{O_2_{р\text{івн}}}$ .

За визначеною експериментально залежністю тиску дисоціації оксидів (парціальному тиску кисню, що відповідає рівноважному стану) від температури  $\lg(P_{O_2_{р\text{івн}}}) = f\left(\frac{1}{T}\right)$  встановлено, що тільки для Ag (за  $T > 420 \text{ K}$ ), Pt ( $T > 750 \text{ K}$ ), Ir ( $T > 900 \text{ K}$ ), Pd і Rh ( $T > 1080 \text{ K}$ ) настає область термодинамічної стійкості. Решта металів в широкому діапазоні температур піддаються газовій корозії.

### 5.3. Вплив температури і складу газового середовища на швидкість корозії металів

З підвищенням температури корозійний процес прискорюється, хоча його термодинамічна можливість зменшується. Характер впливу температури на швидкість окиснення металу визначається температурною залежністю константи швидкості реакції (при кінетичному контролі процесу окиснення металу) або коефіцієнта дифузії (при дифузійному контролі процесу).

Рівняння Арреніуса пов'язує константу швидкості хімічної реакції корозії металу (при кінетичному контролі окиснення металів) або коефіцієнт дифузії (при дифузійному контролі процесу), енергію активації та температуру (рис. 2 а,б):

$$K = A e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

$K$  – константа швидкості хімічної реакції або коефіцієнт дифузії;

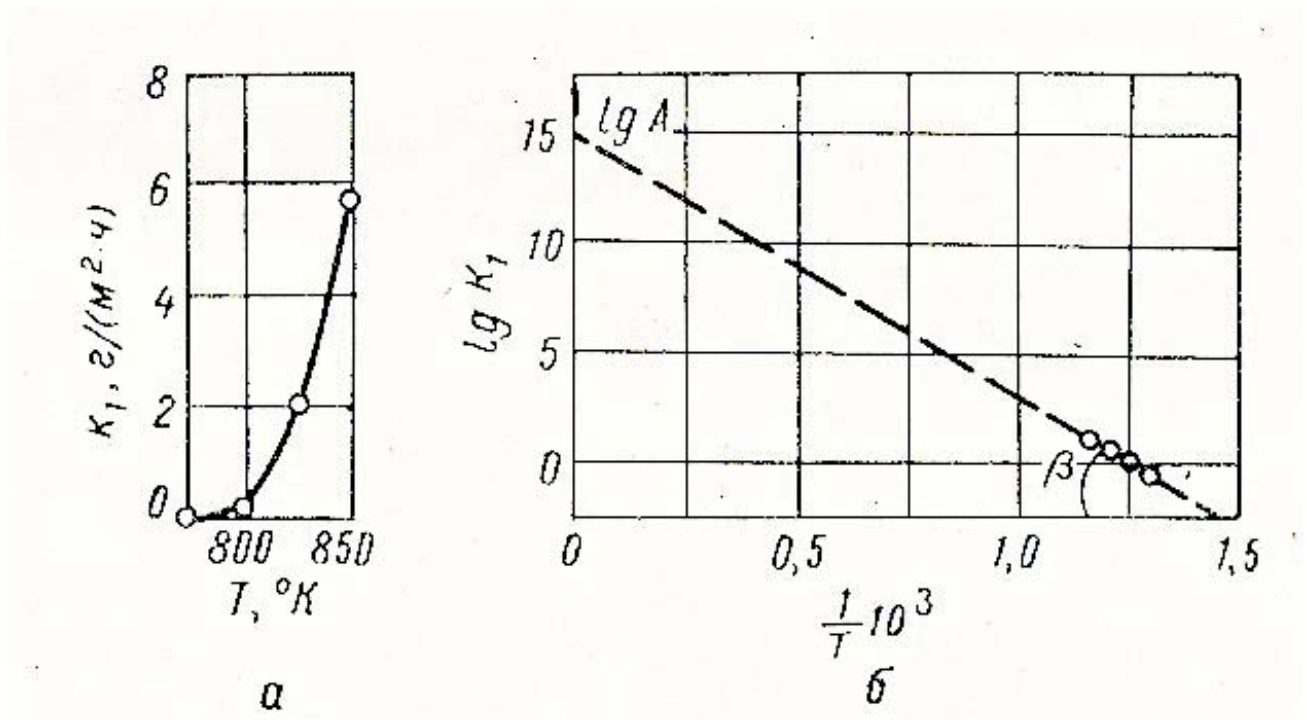
$A$  – множник Ареніуса;

$E_a$  – енергія активації хімічної реакції або коефіцієнт дифузії.

$$\lg K = \lg A - \frac{E_a}{2,303RT}$$

$$\text{tg } \beta = \frac{E_a}{2,303R}$$

$$\lg A = \lg K \quad \text{при} \quad \frac{1}{T} = 0$$



**Рис. 2.** Температурна залежність констант швидкості окислення магнію в кисні

Вплив складу газового середовища на швидкість корозії металів дуже суттєвий, специфічний для різних металів та змінюється з температурою, як видно з таблиці 4. Нікель відносно стійкий в середовищі  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ , але кородує в  $SO_2$ ; мідь кородує в  $O_2$ , але стійка в  $SO_2$ ; хром стійкий в усіх вказаних газах.

**Таблиця 4.** Позитивні показники швидкості газової корозії деяких металів в газах при 700 і 900°С

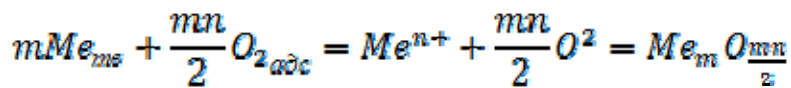
метал	$O_2$		$H_2O$		$CO_2$		$SO_2$	
	700°С	900°С	700°С	900°С	700°С	900°С	700°С	900°С
Fe	500	1240	600	600	590	1130	310	>5000
Ni	20	30	20	30	20	30	970	950
Cu	110	430	50	190	60	180	~0	~0
W	530	3750	20	1800	130	120	720	210
Cr	~0	10	15	20	~0	10	~0	15

#### 5.4. Плівки на металах, їх класифікація та захисні властивості

Плівки з продуктів корозії (оксидні плівки) утворюються в 2 стадії:

**1стадія.** Адсорбція газу на поверхні металу:  $Me + O_2 = Me|2O$

**2стадія.** Хімічна взаємодія – перехід електронів від металу до кисню:



Найчастіше продукт газової корозії утворюється і залишається у вигляді плівки, що призводить до самогальмування корозійного процесу, якщо плівка має захисні властивості, тобто ускладнює контакт металу та кисню (рис.3). Жаростійкість металу залежить від властивостей плівок.

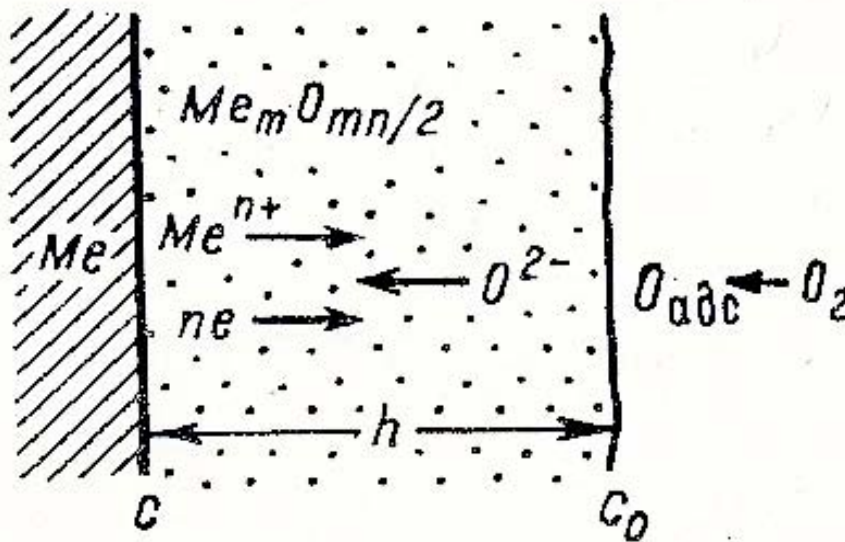


Рис. 3. Схема процесу утворення суцільної окисної плівки на металі

#### Плівки бувають:

1. Тонкі (невидимі) – товщиною до 40 нм;
2. Середні (утворюють кольорові побежалості) – товщиною 40-500 нм;
3. Товсті (видимі) – товщиною більше 500 нм.

Захисні властивості плівки оцінюють по швидкості окиснення металу після утворення плівки та характеру змін цієї швидкості у часі.

#### Умова суцільності плівок:

Молекулярний об'єм оксиду, на поверхні металу, повинен бути більшим, ніж об'єм металу, що пішов на утворення цього оксиду:

$$\frac{V_{(окс)}}{V_{Me}} > 1 \text{ – плівка не суцільна;}$$

$$\frac{V_{(окс)}}{V_{Me}} < 1 \text{ – плівка суцільна;}$$

$$2.5 > \frac{V_{(окс)}}{V_{Me}} > 1 \text{ – якісне покриття суцільною плівкою;}$$

$$\frac{V_{(окс)}}{V_{Me}} \gg 1 \text{ – погане покриття (рихлість, неоднорідність плівки);}$$

Для виводу формули розрахунку відношення молекулярних об'ємів оксиду і металу, застосуємо формули:

$$\rho_{Me} = \frac{m(Me)}{V(Me)}; \quad m(Me) = A * x \quad V(Me) = \frac{A * x}{\rho_{Me}}$$

$$\rho_{(окс)} = \frac{m(окс)}{V_{окс}} \quad m(окс) = M \quad V_{окс} = \frac{M(окс)}{\rho(окс)}$$

$$\frac{V_{окс}}{V_{Me}} = \frac{M(окс) * \rho_{(Me)}}{\rho(окс) * A * x}$$

M – молярна маса оксиду;

A – атомна маса металу;

x – число атомів металу в молекулі оксиду;

$\rho_{Me}$  – густина оксиду;

$\rho_{окс}$  – густина металу.

## 5.5. Закони росту плівок на металах

### 5.5.1. Ріст пористої (незахисної) плівки

$\frac{V_{окс}}{V_{Me}} < 1$  - газ-окисник легко потрапляє через плівку до поверхні металу і

окиснює метал (рис.4); швидкість реакції не залежить від товщини плівки:

$$\frac{dh}{d\tau} = K_C C, \quad h = k_1 \tau,$$

де C – концентрація кисню на поверхні металу, не залежить від часу  $\tau$ ,

h – товщина плівки;

$\tau$  – час окиснення металу;

$k_1$  – стала;  $K_C$  – константа швидкості реакції.

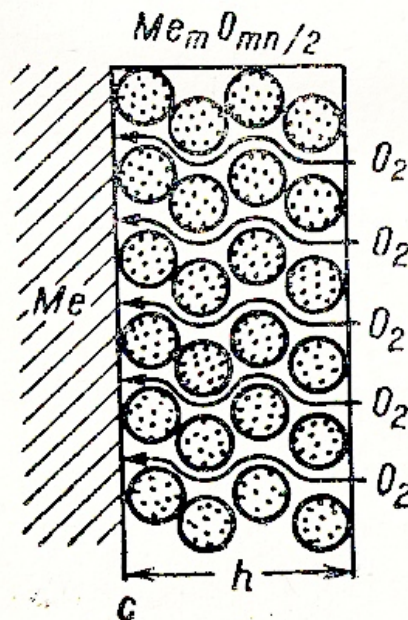
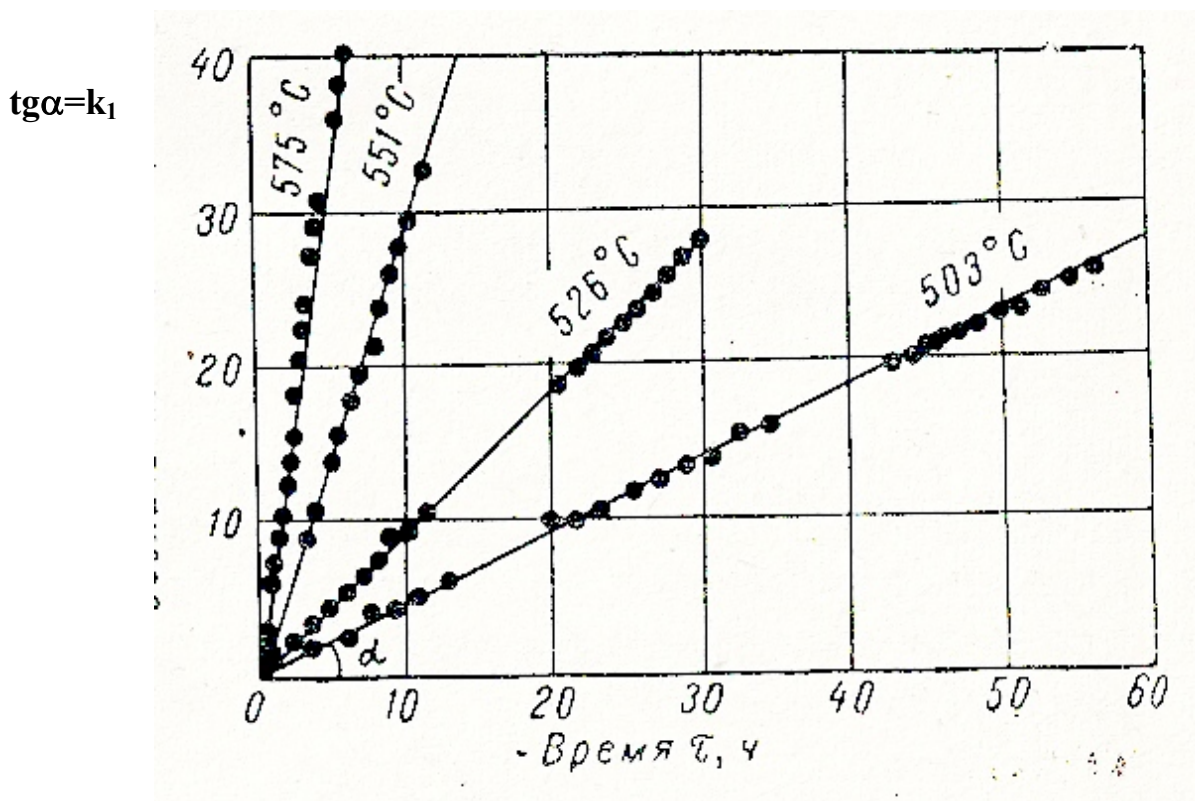


Рис. 4. Схема процесу утворення пористої окисної плівки на металі

При лінійному законі росту плівок має місце *кінетичний контроль* росту плівок, тому що швидкість корозії контролюється хімічною реакцією утворення оксиду на поверхні металу (рис.5).



**Рис.5.** Окиснення магнію в кисні при різних температурах ( лінійний закон росту окисної плівки)

Лінійний закон росту окисної плівки має місце при окисненні на повітрі і в  $O_2$  металів, оксиди яких не задовольняють умови суцільності (лужні, лужно-земельні метали, Mg), або при окисненні летких металів, і тих, що частково возгоняються за високої температури, що робить їх пористими (W, Mo, та їх сплави).

### 5.5.2. Ріст суцільної (захисної) плівки

Суцільні плівки, без механічних дефектів та міцно зв'язані з металом, є захисними, тому що ускладнюють доступ металу і кисню при їх пересуванні в шарі оксиду. Спостерігається самогальмування процесу, зменшення швидкості корозії з потовщенням плівки.

**Стадії:**

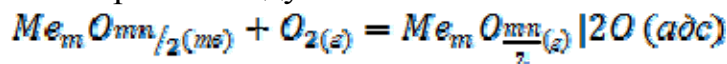
а) перехід Me в іон:



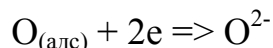
б) пересування  $Me^{n+}$ ; електронів в шарі оксиду;

в) перенос  $O_2$  до поверхні розділу плівка-газ;

г) адсорбція  $O_2$  на поверхні оксиду

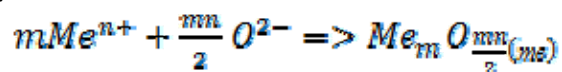


д) іонізація адсорбованих O:



е) пересування  $O^{2-}$  і шарі оксиду  $Me_m O_{mn/2}$

ж) утворення оксиду:



процеси б) і е) протікають паралельно.

### Параболічний закон росту плівки

**Дифузійний контроль** – коли дифузія реагентів є більш уповільненою стадією і супроводжується самогальмуванням при потовщенні плівки (уповільнюється дифузія і швидкість корозії).

$$\frac{dh}{d\tau} = K \frac{c_0 - c}{h};$$

де  $c_0$  – концентрація  $O_2$  на зовнішній поверхні плівки;

$c$  – концентрація  $O_2$  на внутрішній поверхні плівки;

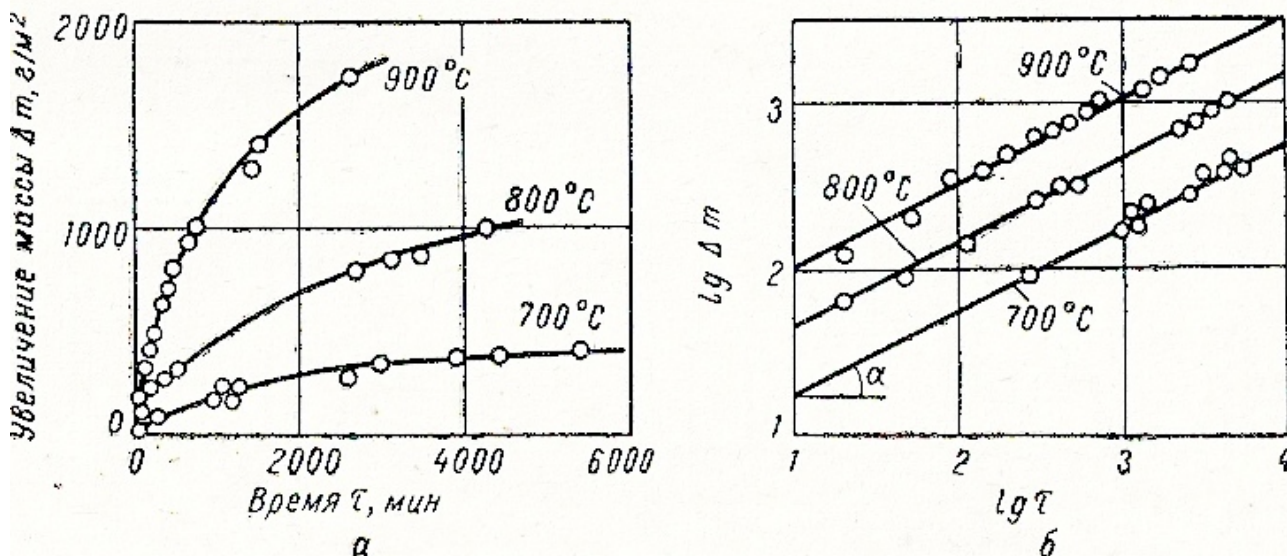
$K$  – коефіцієнт дифузії.

При дифузійному контролі  $C \sim 0$ , тому що кисень встигає прореагувати з металом:

$$\frac{dh}{d\tau} = K \frac{C_0}{h}$$

$$h^n = K_2 \tau; \quad \Delta m^n = K_2 \tau$$

Параболічний закон росту окисних плівок спостерігається при окисненні Fe, Ni, Cr в повітрі при підвищенні температури, Ag в парі  $Br_2$ ,  $I_2$ , та інших металів та сплавів (рис.6).



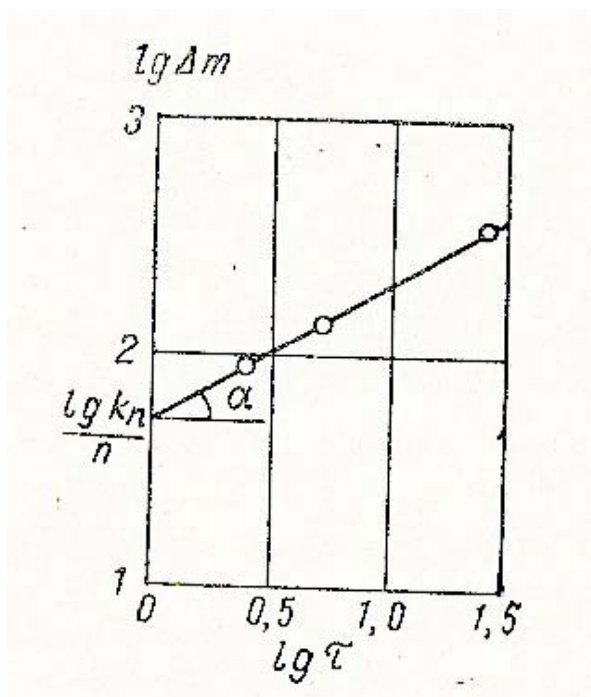
**Рис. 6.** Окислення заліза на повітрі при різних температурах ( параболічний закон росту окисної плівки)



Спряження параболи досягається побудовою графіка в координатах  $\lg \tau - \lg \Delta m$  (рис.7):

$$\operatorname{ctg} \alpha = n$$

$$\lg \Delta m = \frac{\lg k_n}{n} \quad \text{при } \lg \tau = 0$$



**Рис. 7.** Окислення вуглецевої сталі (0,6% С) при  $800^{\circ}\text{C}$  на повітрі, насиченому парами води (степеневий закон росту окисної плівки), в координатах  $\lg \tau - \lg \Delta m$

### Квадратичний закон росту плівки

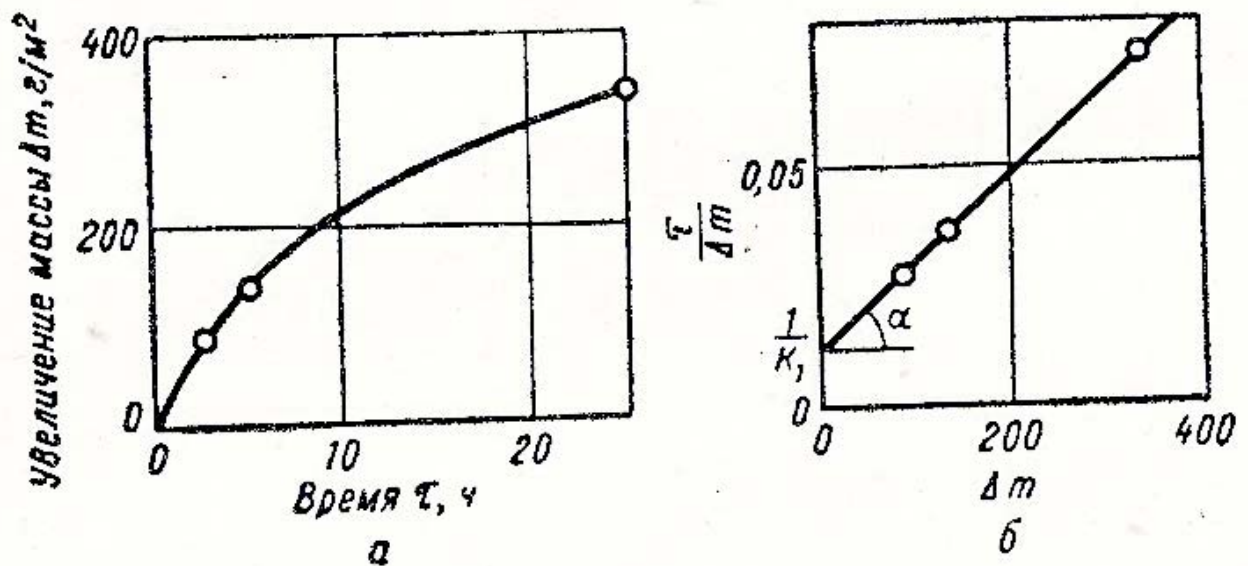
*Дифузійно-кінетичний контроль* процесу окиснення металу має місце, коли швидкість росту плівки контролюється і швидкістю хімічної реакції і швидкістю дифузії, тобто концентрація  $\text{O}_2$  на внутрішній поверхні плівки не дорівнює нулю ( $C \neq 0$ ):

$$\frac{dh}{d\tau} = K \frac{C_0 - C}{h};$$

$$K_1 h^2 + K_2 h = K_1 K_2 \tau; \quad K_1 \Delta m^2 + K_2 \Delta m = K_1 K_2 \tau$$

$$h^n = K_n \tau; \quad \text{де } 1 < n < 2$$

Спряження параболи (рис.8а) досягається побудовою графіка в координатах  $\Delta m - \frac{\tau}{\Delta m}$  (рис.8б);  $\operatorname{ctg} \alpha = K_2$



**Рис. 8.** Окислення вуглецевої сталі (0,6%С) при 800<sup>0</sup>С на повітрі насиченими парами води (ріст окисної плівки за квадратичним законом)

Квадратичний закон спостерігається при близьких гальмуваннях хімічної реакції окиснення металу і дифузійних процесів в плівці: окиснення Fe в парі води та у вуглекислому газі, окиснення Co в кисні, Cu в кисні за низького тиску, а також при окисненні ряду металів за високої температури з частковим руйнуванням плівки.

### Логарифмічний закон росту плівок

**Контроль переносу в тонких плівках** (перенос електронів через тонкі плівки шляхом тунельного ефекту або додаткова перешкода дифузії мікробульбашками, що утворюються в плівці). Швидкість переносу електронів через товщу плівки набагато більша, ніж швидкість переносу іонів, шар оксиду обмежено поверхневими зарядами: створюється електричне поле. Контролююча стадія – найповільніша – це перенос іонів металу в електричному полі. Перенос електронів шляхом тунельного ефекту визначає швидкість утворення тонких плівок, а перенос іонів – швидкість утворення більш товстих плівок.

$$\Delta m = K_3 \lg \tau + K_4; h = K_3 \lg \tau + K_4$$

Спрявлення кривої (рис.9а) досягається побудовою графіка в координатах  $\lg \tau - h$  (рис.9б);  $\operatorname{tg} \alpha = K_3$ ;  $K_4 = h$  при  $\lg \tau = 0$

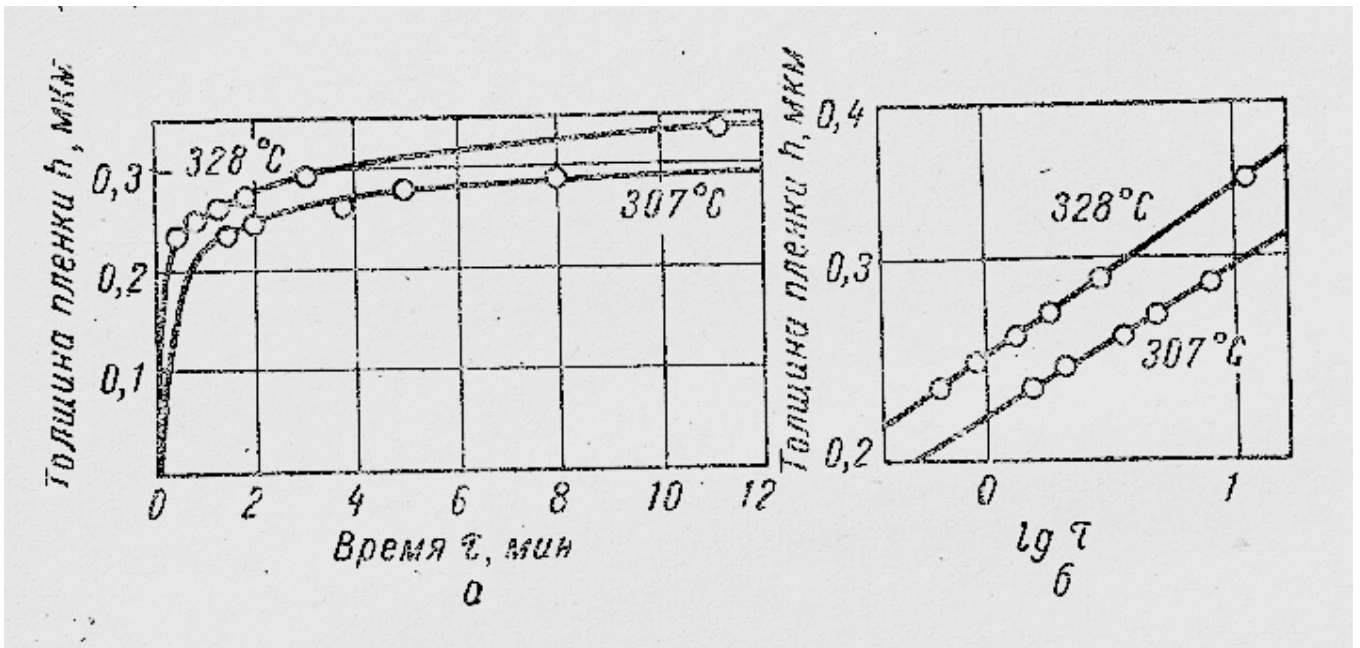


Рис. 9. Окиснення заліза на повітрі при двох температурах (логарифмічний закон росту окисної плівки)

Треба зазначити, що окиснення ряду металів із зміною умов (температури, часу окиснення, складу газів) відбувається за різними законами (рис.10).

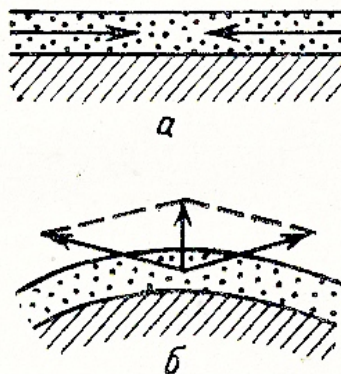
Металл	Температура, °C					
	100	300	500	700	900	1100
Mg	Лог.	Пар.	Паралин.	Лин.		
Ca	(Лог.)	Пар.	Лин.	Лин.		
Se	Лог.	Лог-лин.	Лин-уск.			
Th		Пар.	Лин.	Лин.		
U	Пар.	Паралин.	Лин-уск.			
Ti		Лог.	Куб.	Куб.	Паралин.	Паралин.
Zr		Лог.	Куб.	Куб.		Куб.
Nb		Пар.	Пар.	Паралин.	Лин.	Лин.
Ta	Лог.	Обр-лог.	Пар.	Паралин.	Лин.	Лин.
Mo		Пар.	Паралин.	Паралин.	Лин.	Лин.
W			Пар.	Пар.	Паралин.	Паралин.
Fe	Лог.	Лог.	Пар.	Пар.	Пар.	Пар.
Ni		Лог.	Лог.	Куб.	Пар.	Пар.
Cu	Лог.	Куб.	(Пар.)	Пар.	Пар.	Пар.
Zn		Лог.	Лог.	Пар.	Пар.	
Al	Лог.	Обр-лог.	(Лог.)	Пар.	(Асимп.)	(Лин.)
Ge			Пар.	Паралин.		

Рис. 10. Закони росту окисних плівок на металах (за Кубащевським та Гопкінсом)

### 5.6. Напруги в захисних плівках та їх руйнування

В захисних плівках виникають такі напруги:

- 1) внутрішні стискаючі напруги при рості плівки зі збільшенням об'єму (рис.11а), тому що  $\frac{V_{ок}}{V_{Me}} > 1$
- 2) внутрішні напруги стискання на нерівній поверхні металу утворюють відриваючі сили (рис.11б);
- 3) при зміні температури в плівці виникають внутрішні напруги внаслідок різниці коефіцієнтів лінійного та об'ємного розширення металу і матеріалу плівки;
- 4) механічні напруги, що виникають при роботі деталі, що погіршують стан плівок (удари, тертя).

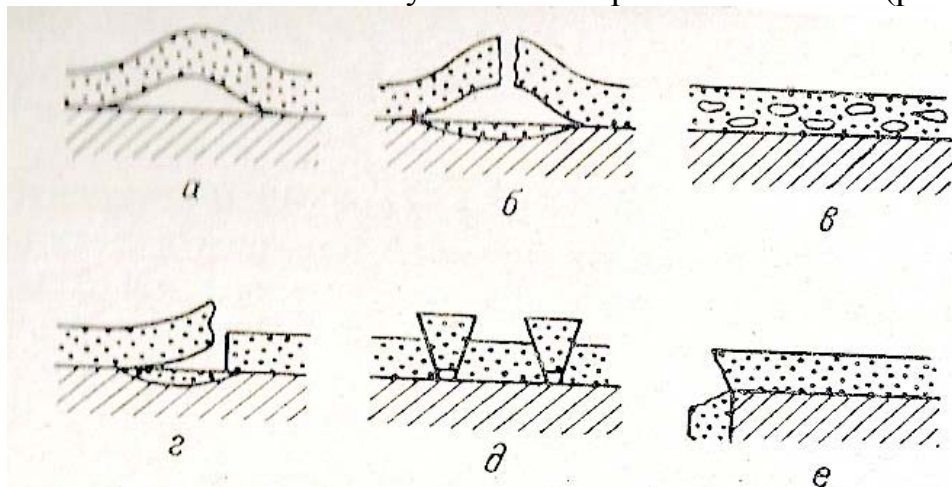


**Рис. 11.** Внутрішні напруги, що виникають при рості захисних плівок:

**Типи руйнування плівок:**

**А) утворення бульбашок з плівки** – коли міцність плівки на розрив велика, а адгезія плівки до поверхні металу мала (рис.12а).

**Б) бульбашка з розривом** – коли плівка не дуже міцна і адгезія до металу мала (рис.12б); зниження захисних властивостей – газопроникність, плівка незахисна; спостерігається перехід від параболічного закону росту плівки до квадратичного або лінійного закону: злами на кривій окиснення (рис.13).



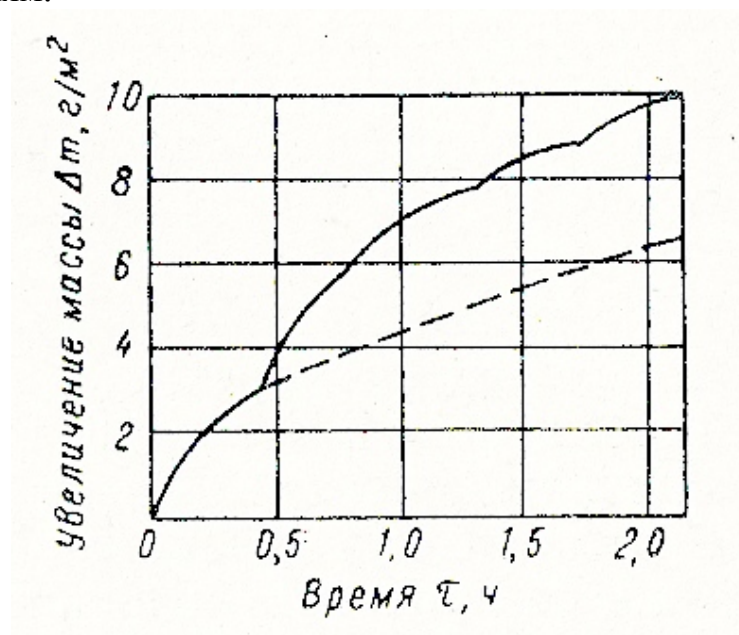
**Рис. 12.** Типи руйнувань окисних плівок при їх рості на металах

В) Газонепроникні мікробульбашки в плівці, які перешкоджають дифузії і корозії (рис.12в), що призводить до переходу від росту плівки за параболічним законом до степеневого з  $n > 2$  або логарифмічного.

Г) руйнування плівки відшаровуванням (на нерівностях металу) (рис.12г);

Д) розтріскування при зсуві – спостерігається при для плівок з високою адгезією до металу та малою міцністю плівки (рис.12д). Не викликає різкого збільшення швидкості корозії, але можливий перехід від параболічного до квадратичного закону росту плівки;

Е) розтріскування плівки на кутах (рис.12е) – призводить до швидкого окиснення кутів металу та часто спричиняє руйнування плівки відшаровуванням.



**Рис. 13.** Окиснення міді на повітрі при  $500^{\circ}\text{C}$  (показано характерні злами параболічної кривої, викликані періодичним руйнуванням крихкої окисної плівки)

Найкраще зберігають метал плівки середньої товщини (достатньо тонкі, щоб не було великих внутрішніх напруг і достатньо товсті, щоб загальмувати дифузію кисню до металу), що виникають на рівній поверхні металу, міцні і пластичні, з високою адгезією до металу та мінімальною різницею в коефіцієнті лінійного розширення в порівнянні з металом.

### Контрольні питання до теми 5

1. Що називають хімічною корозією?
2. Що таке газова корозія? Навести приклади.
3. Яка термодинамічна умова протікання газової корозії?
4. Які вимоги пред'являють до захисних плівок, що утворюються при газовій корозії?
5. В чому полягає умова суцільності плівки?
6. Які метали стійкі в атмосфері кисню за високих температур?

7. В чому полягає механізм зростання плівок?
8. Наведіть закони зростання плівок. Для яких металів і сплавів вони характерні?
9. Як впливає температура на швидкість газової корозії?
10. Які Ви знаєте типи руйнування плівок? За яких умов відбуваються саме ці руйнування плівок?
11. Як залежить швидкість газової корозії сталі від її складу внутрішньої напруги і деформації?

### Тема 6. Захист від газової корозії

Для захисту від газової корозії застосовують такі методи:

- 1) **Жаростійке легування** – введення в склад сплаву компонентів, що підвищують жаростійкість основного металу;
- 2) **Захисні покриття** – нанесення на поверхню металу захисного шару металу чи неметалу (Al, Cr, Si)
- 3) **Захисні або контрольовані атмосфери** – штучно створені атмосфери (часто застосовуються при термообробці металів)
- 4) **Зменшення окиснення металів різними шляхами**

#### 6.1. Жаростійке легування

Жаростійке легування – це одержання сплавів, більш стійких проти газової корозії, ніж нелеговані сплави.

**Теорія жаростійкого легування:** легуючий компонент створює на поверхні сплава захисний оксид, що перешкоджає окисненню більш легко окиснюваного основного металу. Тому основні властивості легуючого компонента такі:

- 1) Оксид легуючого компонента (ЛК) повинен підлягати умові суцільності, тобто відношення  $\frac{V_{окс}}{V_{Me}} > 1$ ;
- 2) Розмір іонів легуючого компонента (ЛК) повинен бути меншим, ніж розмір іонів основного компонента (метала);
- 3) Зміна  $\Delta G$  реакції утворення оксида легуючого компонента повинен бути більш негативним, ніж  $\Delta G$  утворення оксида основного металу. Тобто, оксид ЛК повинен мати більшу спорідненість до кисню, ніж основний метал.
- 4) ЛК повинен мати оксид високого омичного опору;
- 5) оксид ЛК повинен мати високу температуру плавлення, а також відсутність низькоплавких ектетик в суміші з іншими оксидами;
- 6) Необхідність утворення твердих розчинів між ЛК і основним металом.

**Приклад:** Чи може Be захистити Mg від газової корозії згідно теорії жаростійкого легування?

- 1) для BeO  $\frac{V_{окс}}{V_{Me}} = 1,67$ ;
- 2) іон Be в 2,3 рази менше, ніж Mg;

- 3)  $\Delta G(\text{BeO}) < \Delta G(\text{MgO})$  . У Ве більша спорідненість до кисню, ніж у Mg;
- 4) ВеО має омичний опір більший, ніж MgO;
- 5) температура плавлення ВеО висока;
- 6) Тверді розчини утворюються при вмісті Ве 0,01-0,03%, але цього достатньо для захисту. В сплав Mg з 8-10% Al – можна вводити не більш 0,15% Ве.

Відповідь: берилій може захистити магній від газової корозії.

## 6.2. Захисні металічні та неметалічні покриття

### 6.2.1. Металічні покриття

Al, Cr, Ni наносяться гальванічним методом, або напиленням термодифузійним методом – коли відбувається дифузія атомів покриття в основний метал за високих температур.

**Алітування** – створення на поверхні сталюого виробу жаростійкого сплаву з алюмінієм.

1 спосіб: Сталеві вироби завантажуються в залізний ящик і засипаються сумішшю, що містить 49% Al порошка, 49%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і 2%  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Ящик герметично закривають та витримують декілька годин в печі при 900 - 1050 °С.

2 спосіб: застосовується порошок залізоалюмінієвого сплаву. В результаті дифузії Al в Fe при алітуванні на виробі утворюється шар жаростійкого залізоалюмінієвого сплаву.

### 6.2.2. Неметалічні покриття

**Жаростійкі емалі** – склоподібні керамічні покриття, що одержують шляхом сплавлення, і які містять неорганічні оксиди  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , ZnO,  $\text{SiO}_2$ .

Властивості жаростійких емалей:

- 1) Високі захисні властивості проти газової корозії;  
(бажана максимальна кількість  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , ZnO,  $\text{SiO}_2$  – ці оксиди чинять опір дифузії і підвищують жаростійкість; та мінімальна кількість PbO,  $\text{Na}_2\text{O}$ , CaO, бо вони знижують жаростійкість і підвищують дифузію газів)
- 2) Спінання за температури випалювання;
- 3) Твердість за робочих температур;
- 4) Висока адгезія до металу;
- 5) Термостійкість (зумовлюється близькістю коефіцієнтів лінійного розширення металу та покриття);
- 6) Економічність.

ЕЖ-1000 – жаростійка емаль, містить 16 кг  $\text{SiO}_2$ , 4,5 кг  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 22,6 кг  $\text{BaCO}_3$ , 2,8 кг  $\text{CaCO}_3$ , 1,2 кг  $\text{TiO}_2$ , 2 кг ZnO, які сплавають при 1400 °С 2 години; охолоджують, розмелюють, додають на 70 м .ч. 30 м.ч.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  , 5 м.ч. глини, 50 м.ч. води. Суспензію наносять на метал, висушують, випалюють при 1020 – 1040 °С. Покриття захищає залізо при 1000 °С. Інші емалі – до 1450 °С.

Недоліки жаростійких емалей: непластичні, чутливі до теплових ударів, схильні до механічних ушкоджень.

### 6.2.3. Покриття з тугоплавних сполук -

- карбідів, нітритів, боридів, силіцидів - одержують за високих температур як взаємодією з твердими Si, C, B та поверхні металу, так і обробкою металу газоподібними сполуками, що містять B, Si, C. Витримують дуже високі температури до 2000<sup>0</sup>C (силіциди).

### 6.2.4. Металокерамічні покриття

одержують введенням в оксиди металічних добавок. Це введення підсилює адгезію з металом, пластифікує оксиди, підвищує теплопровідність, зближує коефіцієнт лінійного розширення покриття на металах та металу. Одержують шляхом газополуменевого напилення з термообробкою в інертній атмосфері.

### 6.3.1. Захисні або контрольовані атмосфери

**Захисні атмосфери** створюють умови, що виключають термодинамічну можливість протікання корозійного процесу ( $\Delta G > 0$ )

#### Захисні атмосфери, застосовувані для деяких металів та сплавів

В таблиці 5 наведено можливість хімічної взаємодії металів з різними газами за різних температур. Виходячи з її даних, використовуються такі захисні атмосфери для деяких металів і сплавів:

**Мідь:** - продукти горіння палива (ПГП) без O<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub> з малим вмістом (0,5 – 2%) CO;

**Таблиця 5.** Можливість реакції взаємодії металів з різними газами при P=1атм і T=500 та 1000<sup>0</sup>C

Метали	O <sub>2</sub>		CO <sub>2</sub>		CO		H <sub>2</sub> O	
	500	1000	500	1000	500	1000	500	1000
<b>Лужноземельні</b>	+	+	+	+	+	+	+	+
<b>Al,Cr, Ti, Zr, V,Nb,Ta</b>	+	+	+	+	+	+	+	+
<b>Fe</b>	+	+	+	+	+	-	+	+
<b>Co</b>	+	+	-	-	+	-	-	-
<b>Ni</b>	+	+	-	-	-	-	-	-
<b>Cu</b>	+	+	-	-	-	-	-	-
<b>Ag</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Zn</b>	+	Г	+	Г	+	Г	+	Г
<b>Cd</b>	+	Г	-	Г	-	Г	-	Г
<b>Sn</b>	+	+	+	-	+	-	+	-
<b>Pb</b>	+	+	-	-	-	-	-	-

Г- за даної температури метал знаходиться у газоподібному стані

**Латунь:** а) при малому вмісті Zn та низькій температурі - ПГП без SO<sub>2</sub>;

б) при великому вмісті Zn та високій температурі – продукти дисоціації NH<sub>3</sub> або продукти горіння палива (ПГП) без CO<sub>2</sub> та H<sub>2</sub>O;



- Бронзи:** а) кремнієві – ПГП без  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$  або дисоційований  $\text{NH}_3$ ;  
б) олов'яні - ПГП з нестачею повітря;  
в) алюмінієві або берилієві бронзи - дисоційований  $\text{NH}_3$ ;

**Мідно – нікелеві сплави:** без  $\text{Zn}$  – ПГП;

- з  $\text{Zn}$  - продукти дисоціації  $\text{NH}_3$ , або ПГП без  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ ;

**Магній - та магній-алюмінієві сплави:** ПГП з нестачею повітря;

**Титанові та цирконієві сплави** – гелій, аргон або вакуум;

**Нікель та нікелеві сплави** – ПГП без  $\text{O}_2$  і сполук  $\text{S}$ ;

**Ag, Au, Pt** – продукти горіння палива.

#### **Заходи безпеки:**

А) можливе отруєння газами  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ;  $\text{NH}_3$   $\text{H}_2\text{S}$  – необхідна витяжна вентиляція;

Б) можлива самовибуховість газів – необхідний контроль складу атмосфери, температури, вибухонебезпечності.

В) можлива пожежа – гази горючі, тому заходи безпеки такі, як для будь-якого газоподібного палива.

#### **6.3.2. Захисні атмосфери для сталей:**

- 1)  $\text{H}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 2)  $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$  (для сталі треба  $\text{CO}$  не менше 68% для температури  $900^\circ\text{C}$ )
- 3)  $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 4)  $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4$

#### **Одержання захисних атмосфер для сталей**

- 1) крекінгом (дисоціацією газів);
- 2) очищенням технічного  $\text{N}_2$  від  $\text{O}_2$ ;
- 3) генераторним процесом;
- 4) частковим спалюванням газів.

**I.** а) Дисоціацією  $\text{NH}_3$  одержують атмосферу  $\text{H}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (дорого, вибухонебезпечно);

б) Крекінг вуглеводнів в суміші з повітрям або водяним паром. При цьому утворюється атмосфера  $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2$

**II.** Очищення технічного  $\text{N}_2$  від  $\text{O}_2$  (атмосфера містить 90-96%  $\text{N}_2$ ; 10-4%  $\text{H}_2$ ). Для цього змішують дисоційований  $\text{NH}_3$  з технічним  $\text{N}_2\text{O}$  в присутності  $\text{Ni}$ - $\text{Cr}$ -каталізатора при  $400-450^\circ\text{C}$ ; кисень зв'язується з воднем з утворенням води.

**III.** Генераторний процес – з деревного вугілля одержують атмосферу  $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$

**IV.** Частковому спалюванню підлягає дисоційований аміак в суміші з повітрям для зниження вмісту в ньому  $\text{H}_2$  (до 6-10%) в цілях зниження вибуховості.

Установки з захисними атмосферами для термообробки сталей та деталей – це електричні та газові муфельні печі, до яких підводиться захисна атмосфера, з установок для її отримання, з апаратурою для автоматичного контролю складу газу.

Для сталей з 0,8% С при 500<sup>0</sup>С підходить атмосфера, що містить СО і СО<sub>2</sub>, починаючи зі складу 68% СО і 32% СО<sub>2</sub>; до вмісту СО не більше 95%.

### **Контрольні питання до теми 6**

1. Які основні положення теорії жаростійкого легування сталей?
2. Які металічні та неметалічні покриття застосовуються для сталей?
3. Які захисні атмосфери застосовують при термообробці сталі?
4. Як одержують захисні атмосфери для сталей?
5. Які захисні атмосфери застосовують для міді, бронз, мідно-нікелевих сплавів?
6. Які захисні атмосфери застосовують для магнію та магній-алюмінієвих сплавів?
7. Які захисні атмосфери застосовують для титанових і цирконієвих сплавів?
8. Які захисні атмосфери застосовують для срібла, золота, платини?
9. Які метали не реагують з вуглекислим газом за температури 500<sup>0</sup>С?
10. Як можна зменшити утворення окалини на сталі при її термічній обробці?
11. Що таке алітування? Як воно здійснюється?

### **Тема 7. Електрохімічна корозія металів**

Електрохімічна корозія металів – самовільне руйнування металів внаслідок електрохімічної взаємодії з довкіллям - електропровідним середовищем, при якому іонізація атомів металу і відновлення окисника корозійного середовища відбуваються в різних актах, та їх швидкості залежать від величини електродного потенціалу металу. Це гетерогенний процес. Наприклад, взаємодія металів з рідкими електролітами (Н<sub>2</sub>О, розчинами солей, кислот, лугів, з розплавами солей та лугів). Реальні випадки електрохімічної корозії, що часто зустрічаються, такі:

- а) іржавіння металічних конструкцій в атмосфері (верстати, обладнання заводів, мости, каркаси будівель, транспорт);
- б) корозія металічної обшивки суден в морській та річковій воді;
- в) іржавіння металічних конструкцій гідропоруд;
- г) іржавіння трубопроводів у ґрунті;
- д) руйнування металічних баків та апаратів розчинами кислот, солей, лугів на хімічних заводах;
- е) корозійні витрати металу при кислотному травленні іржі (окалини), або при нагріві їх в розплаві солей та лугів.

#### **7.1. Корозійні гальванічні елементи**

В більшості випадків протікання електрохімічної корозії (ЕХК) характеризується локалізацією анодного та катодного процесів, це енергетично більш вигідно; процеси локалізуються на тих ділянках, де легше протікають.

Тому корозійний процес нерівномірний. ЕХК – результат роботи великої кількості корозійних гальванічних елементів на поверхні металу, який стикається з електролітом.

### **Реальні корозійні гальванічні елементи (рис. 14)**

#### **а) неоднорідність металічної фази**

наявність макро- та мікровключень в металі. Катод – метал з більшим потенціалом (рис.14а) ( $E_{Me1} > E_{Me2}$ );

**неоднорідність сплаву** (катоди – метали з більшим потенціалом), (рис.14а);

**б) неоднорідність поверхні металу** – наявність меж блоків та зерен кристалітів, анізотропія металічного кристалу. Межі блоків та ребра монокристалів можуть бути катодами і анодами (рис.14б).

**в) атомарна неоднорідність поверхні металу** - макро- та мікропори в окисній плівці (метал в порах є анодом), (рис.14в);

**г) нерівномірний розподіл по поверхні металу вторинних продуктів корозії** (ділянки під вторинними продуктами є анодами), (рис.14г);

**д) нерівномірність внутрішніх напруг в металі** (більш деформовані ділянки є анодами), (рис.14д);

**є) нерівномірність зовнішніх навантажень** (більш напружені ділянки є анодами), (рис.14е);

#### **ж) неоднорідність рідкої фази:**

1. різниця в концентрації своїх іонів металу (ділянка металу, що стикається з більш розбавленим розчином – анод);

2. різниця концентрації нейтральних солей в розчині – ділянка металу, що стикається з більш концентрованим розчином солі – анод (рис.14ж);

3. різниця в рН; катодні ділянки металу стикаються з розчином з більш низьким значенням рН;

4. різниця в концентрації  $O_2$  та інших окисників - ділянки металу, що стикаються з більшою концентрацією  $O_2$ , є катодами; (рис.14з);

#### **з) нерівномірність фізичних умов:**

1. різні температури (більш нагріті ділянки металу - аноди), (рис.14и);

2. нерівномірне опромінення (більш опромінені ділянки - аноди);

3. нерівномірне накладання зовнішнього електричного поля (ділянки металу, де позитивні іони (катіони) виходять в електроліт – є анодами), (рис.14к).

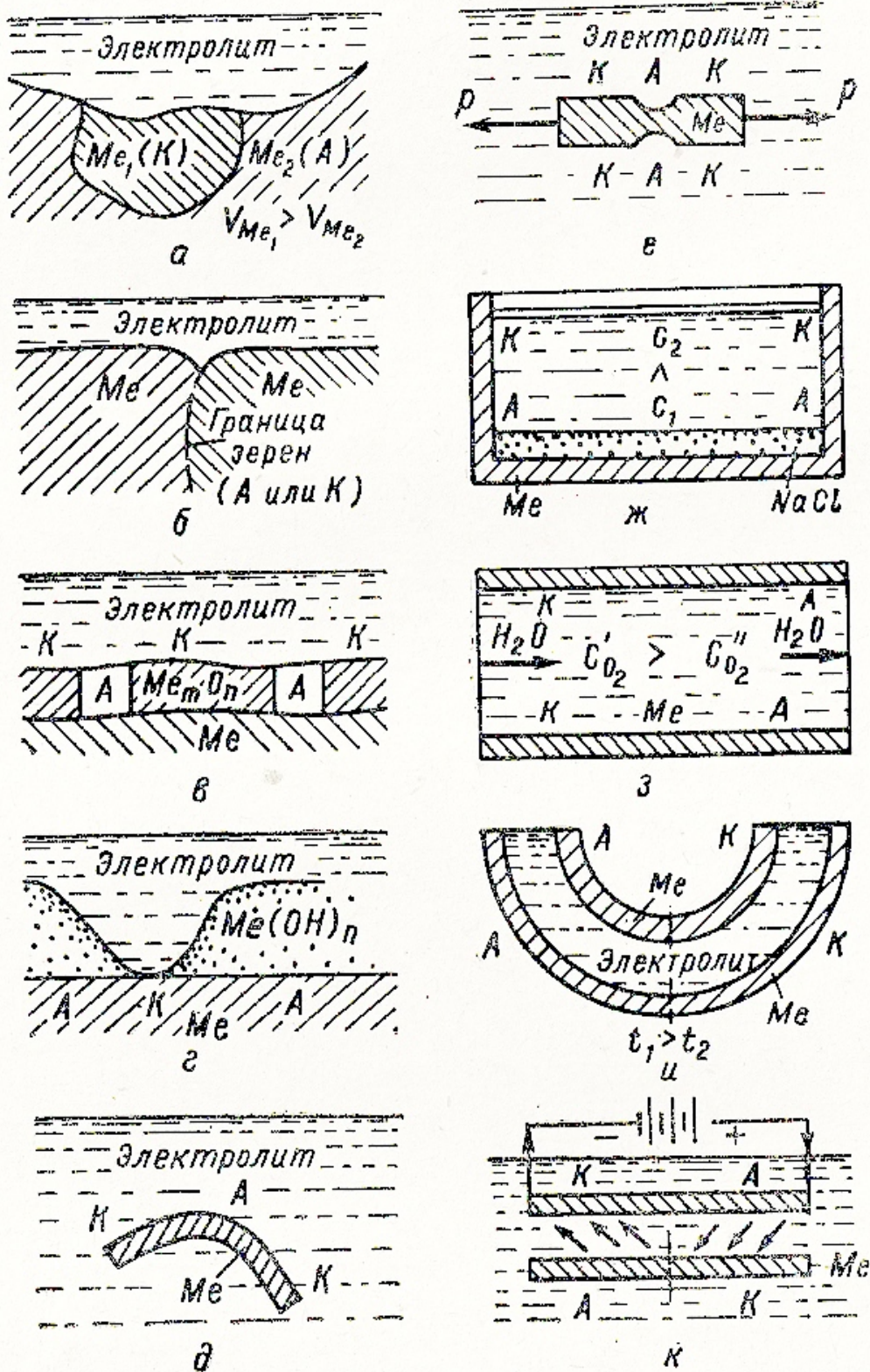


Рис. 14. Типи корозійних гальванічних елементів

### 7.2. Поляризація електродних процесів та її причини

Якщо електроди оборотного гальванічного елемента з потенціалами в розімкнутому стані  $(V_a)_{обр}$  і  $(V_k)_{обр}$  і опором електроліту між ними в

ланцюзі  $R$  замкнути і виміряти стале значення сили генерованого струму  $I'$ , то виявляється, що ця сила значно менше значення, розрахованого за законом Ома, тобто

$$I' \neq \frac{(V_k)_{обр} - (V_a)_{обр}}{R} \quad (1)$$

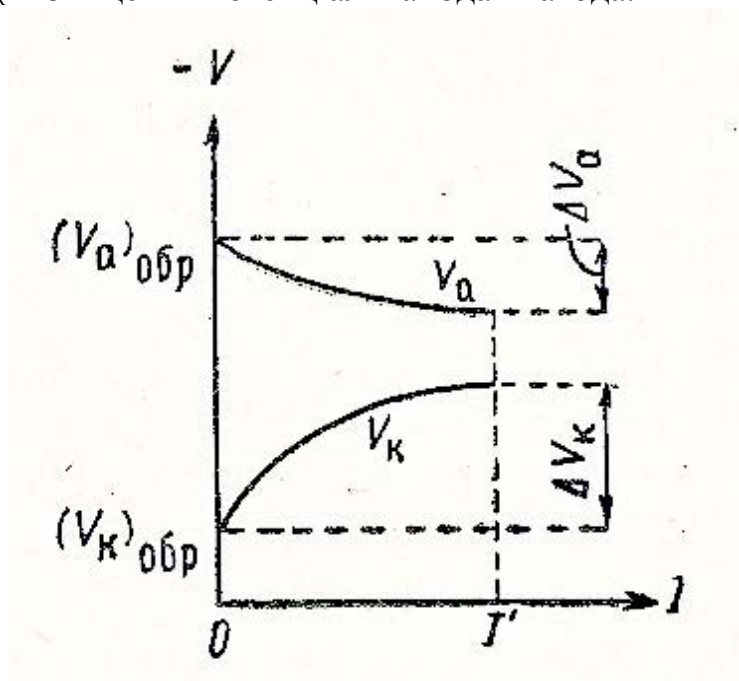
Так як практично  $R = \text{Const}$ , причину нерівності слід шукати в чисельнику дроби. І, дійсно, вимірювання показують (рис 15), Що потенціали електродів, через які проходить при їх роботі електричний струм, відрізняються від потенціалів електродів, що не навантажених струмом: потенціал анода при проходженні через нього струму стає позитивніше, а потенціал катода - від'ємніше:

$$V_a = (V_a)_{звор} + \Delta V_a;$$

$$V_k = (V_k)_{звор} + \Delta V_k;$$

де  $V_a$  і  $V_k$  встановлюються при даному значенні струму електродні потенціали, звані *ефективними*;

$\Delta V_a$  та  $\Delta V_k$  - зміщення потенціалів анода і катода.



**Рис. 15.** Зміни потенціалів аноду та катода гальванічного елемента зі збільшенням сили протікання між ними струму.

Цю зміну потенціалів, а отже, і їх різниці, що приводить до зменшення сили струму, називають *поляризацією*.

Таким чином, в рівнянні (1) повинні фігурувати початкові  $(V_k)_{звор}$  і  $(V_a)_{звор}$  а ефективні значення потенціалів електродів, тобто

$$I = \frac{V_k - V_a}{R} < \frac{(V_k)_{звор} - (V_a)_{звор}}{R}$$

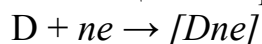
Явища поляризації електродів спостерігаються як в гальванічних елементах, так і в електролізерах, тобто при проходженні через електроди електричного струму незалежно від його походження (генерації струму в результаті роботи гальванічного елемента або його підведення від зовнішнього джерела до електролізерів).

Поняття електрохімічної поляризації було введено Е. Х. Ленцем (1839). Роботи Е. Х. Ленца і А. С. Савельєва, а потім Н. П. Слугінова, Р. А. Коллі та ін. заклали основи теорії поляризації електродних процесів.

Поляризація є наслідком відставання електродних процесів від перетікання електронів в гальванічному елементі. Анодний процес виходу іонів металу в електроліті



відстає від перетікання електронів від анода до катода, що призводить до зменшення негативного заряду на поверхні електрода і робить потенціал анода позитивніше. Катодний процес асиміляції електронів



відстає від надходження на катод електронів, що призводить до збільшення негативного заряду на поверхні електрода і робить потенціал катода від'ємнішим.

Все це справедливо і для електрохімічного корозійного процесу, перебіг якого аналогічний роботі короткозамкнутого гальванічного елемента: виникаючий внаслідок наявності початкової різниці потенціалів катодного і анодного реакцій процес електрохімічної корозії супроводжується перетіканням електричного струму від анодних ділянок до катодних в металі і від катодних ділянок до анодних в електроліті, що викликає явища поляризації на анодних і катодних ділянках. У більшості випадків електрохімічної корозії металів основними гальмівними явищами, які встановлюють певну кінцеву швидкість корозії, є явища поляризації.

Кінетику електродних процесів, у тому числі і електродних процесів електрохімічної корозії металів, прийнято зображати у вигляді поляризаційних *кривих*, що представляють графічне зображення залежності

потенціалів електродів  $V$  від густини струму  $i = \frac{I}{S}$ , тобто  $V = f(i)$ .

На рис. 16 наведені криві анодної і катодної поляризації металу, що характеризують його поведінку в якості анода і катода корозійного елемента.

Ступінь нахилу кривих характеризує велику (крутий хід) або малу (пологий хід) ускладненість протікання електродного процесу. Кількісно це може бути виражено істинної поляризуемістю процесу при даній щільності струму  $i'$  (в даній точці поляризаційної кривої):

$$\frac{dV_a}{di_a} = \operatorname{tg} \alpha$$

$$\frac{dV_x}{di_x} = \operatorname{tg} \beta$$

або середньої поляризуємості процесу для даного інтервалу густини струму (на даній ділянці поляризаційної кривої):

$$\frac{\Delta V_a}{\Delta i_a} = \operatorname{tg} \alpha'$$

$$\frac{\Delta V_k}{\Delta i_k} = \operatorname{tg} \beta'$$

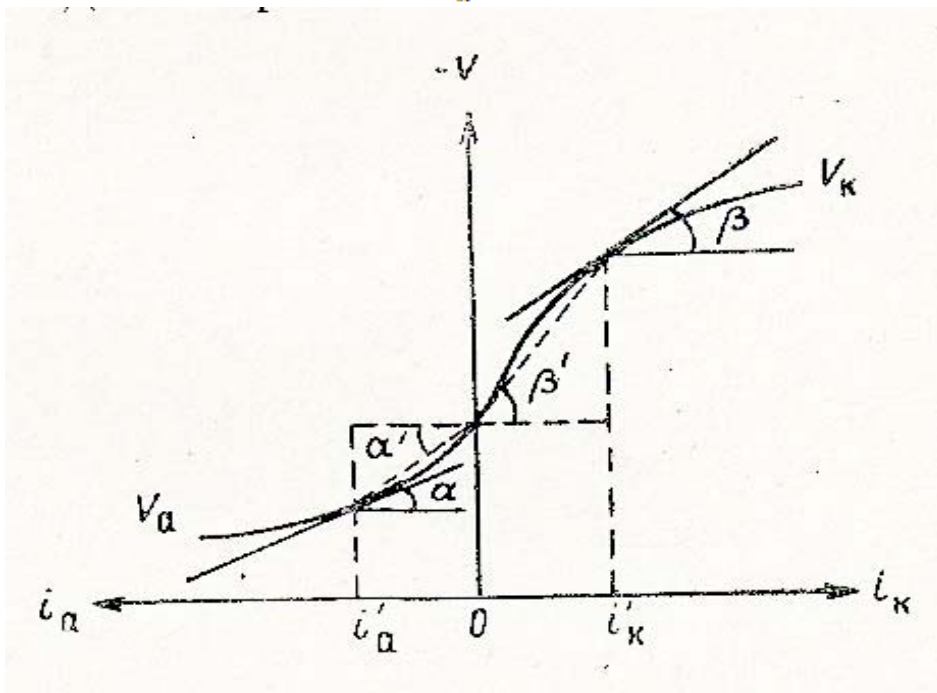
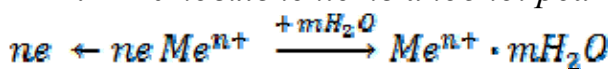


Рис. 16. Криві анодної та катодної поляризації металу

Причини анодної поляризації, тобто відставання процесу виходу іонів в електроліт від перетікання електронів з анодних ділянок на катодні, наступні:

1. Уповільненість анодної реакції корозії металу



яка визначається відповідним значенням енергії активації цієї реакції  $Q$ , призводить до виникненню електрохімічної поляризації  $(V)_{\text{e-x}}$ , що називається перенапругою іонізації металу.

При дуже малих значеннях анодної густини струму (орієнтовно при  $i_a < 10^{-2} \text{ A/m}^2$ ) залежність перенапруги іонізації металів від анодної густини струму може бути виражена лінійним рівнянням [ділянка  $(V_{\text{Me}})_{\text{обр}} - \text{A}$ , рис. 17]:

$$(V_a)_{\text{e-x}} = K_1 i_a$$

де  $K_1$  - стала, що залежить від матеріалу і стану поверхні анода, температури.

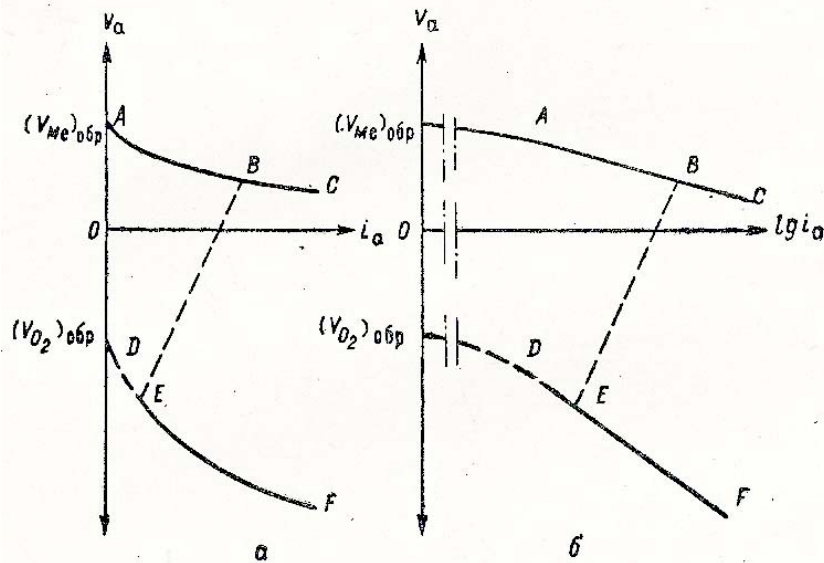
При густинах струму, більших, ніж  $10^{-2} \text{ A/m}^2$ , анодна поляризація виражається логарифмічним рівнянням [ділянка ABC, рис. 17]:

$$(V_a)_{e-x} = a_1 + b_1 \lg i_a,$$

де  $a_1$  – константа, що залежить від матеріалу і стану поверхні анода, температури;  $b_1$  – константа, пов'язана з механізмом утворення перенапруги.

Поляризація, що викликається перенапругою іонізації металів, досягає невеликих величин [полога крива  $(V_{Me})_{обр}$  - ABC, рис. 17], які максимальні у металів підгрупи заліза (Fe, Co, Ni).

А. Н. Фрумкін показав, що чим вище відношення струму обміну  $I_0$  до струму  $I$ , тим важче зрушити рівновагу пропусканням через систему струму; і тим нижче поляризація, що викликається сповільненістю електрохімічної реакції.



**Рис. 17.** Анодні поляризаційні криві: **а** – в координатах  $i_a - V_a$ ; **б** – в координатах  $\lg i_a - V_a$ . [ $(V_{Me})_{обр}$ ABC - перенапряга іонізації металу; BE – пасивування металу;  $(V_{Me})_{обр}$ DEF – перенапряга анодного виділення кисню].

2. Уповільненість дифузії іонів металу від поверхні в об'єм розчину призводить до концентраційної поляризації анода  $(\Delta V)_{конц}$ , яка порівняно невелика [полога крива, аналогічна кривій  $(V_{Me})_{обр}$  - ABC, рис. 17], крім випадків дуже великої активності іонів металу у поверхні. Значення концентраційної поляризації можна представити рівняннями

$$(\Delta V_a)_{конц} = \frac{RT}{nF} 2.301 \lg \frac{a'_{Me^{n+}}}{a_{Me^{n+}}}$$

де -  $a'_{Me^{n+}}$  активність іонів металу у поверхні;

$a_{Me^{n+}}$  - активність іонів металу в об'ємі розчину;

$$(\Delta V_a)_{конц} = \frac{RT}{nF} 2.301 \lg \left( 1 + \frac{i_a}{i_d} \right)$$

де  $i_d$  - гранична катодна густина струму для даного розчину електроліту (за умови, що ефективна товщина дифузійного шару, на аноді така ж, як і на катоді).

Концентраційна поляризація збільшує потенціал анода, тобто



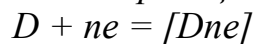
$$\Delta V_a > (\Delta V_a)_{e-x}$$

3. Дуже велика уповільненість анодної реакції іонізації металу має місце при виникненні анодної пасивності. Анодна поляризація металів в певних умовах може полегшувати перехід металів в пасивний стан (утворення первинних фазових або адсорбційних захисних плівок), що супроводжується різким гальмуванням анодного процесу з відповідним падінням густини струму і значним зміщенням потенціалу електрода в позитивний бік (ділянка  $BE$ , рис. 17) до значень, достатніх для протікання нового анодного процесу, зазвичай виділення кисню [ділянка  $EF$  кривої  $(V_{O_2})_{обр} DEF$ , рис. 17]. Значення цього виду анодної поляризації розрахувати не можна і їх беруть зазвичай з дослідних даних.

Процеси, що зменшують анодну поляризацію, називаються **деполяризаційними процесами** (наприклад, перемішування), а речовини, що їх здійснюють, - **анодними деполяризаторами** (наприклад, комплексоутворювачі  $NH_3$ ,  $CN^-$  та інші, сильно знижують активність іонів металів в розчині внаслідок їх зв'язування в важкодисоційовані комплекси; іони  $Cl^-$  ускладнюють наступання анодної пасивності металів).

*Причинами катодної поляризації*, т. е. відставання процесу асиміляції електронів від надходження на катодні ділянки електронів, є:

а) сповільненість катодної деполяризації іншої реакції

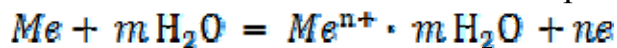


яка визначається відповідним значенням енергії активації цієї реакції  $Q_k$  і призводить до виникнення електрохімічної поляризації  $(V_k)_{e-x}$ , що називається *перенапругою реакції катодної деполяризації*;

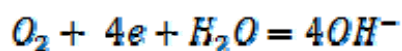
б) сповільненість дифузії деполяризатора з об'єму електроліту до катодної поверхні або продукту катодної деполяризаційної реакції у зворотному напрямку, яка призводить до концентраційної поляризації катода. Більш докладно явища катодної поляризації будуть розглянуті нижче, для найбільш розповсюджених катодних процесів водневої і кисневої деполяризації.

### 7.3. Вторинні процеси і продукти електрохімічної корозії металів

При роботі корозійного гальванічного елемента анодна реакція іонізації металу:



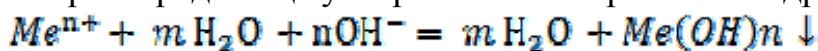
Катодна реакція асиміляції електронів, наприклад, реакція кисневої деполяризації записується так:



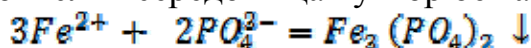
Ці процеси є **первинними процесами** електрохімічної корозії металів, а їх продукти  $(Me^{n+} \cdot m H_2O$  и  $OH^-)$  – є **первинними продуктами корозії**.

При електрохімічній корозії металів поряд з первинними процесами можливе протікання вторинних процесів - взаємодія первинних продуктів корозії один з одним, або з електролітом і розчиненими в ньому газами з утворенням плівок **вторинних важкорозчинних**

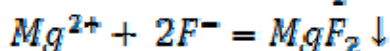
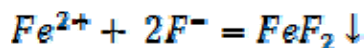
**продуктів корозії.** Так, іони багатьох металів (Fe, Al, Zn, Ni, Mg та ін.) при певних значеннях рН середовища утворюють важкорозчинні гідроксиди:



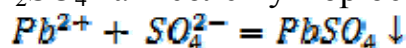
Залізо в фосфорнокислих середовищах утворює важкорозчинний фосфат:



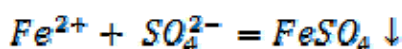
Залізо і магній в концентрованих розчинах HF утворюють нерозчинні в HF фториди:



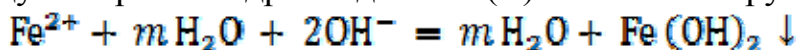
Свинець в розчинах H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> та її солей утворює нерозчинний сульфат:



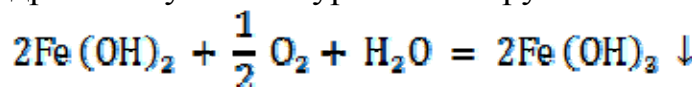
Залізо в концентрованій H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (70%-вій) утворює нерозчинний в ній сульфат:



Вторинні продукти корозії металів можуть зазнавати подальші зміни. Так, залізо при корозії в середовищах з рН > 5,5 утворює важкорозчинний вторинний продукт корозії - гідроксид заліза (II) білого кольору

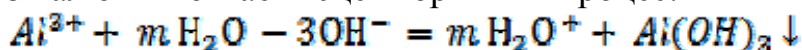


який, взаємодіючи з розчиненим в електроліті з киснем, утворює ще більш важкорозчинний гідрат окису заліза бурого кольору:

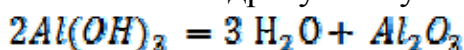


Ці вторинні продукти корозії заліза можуть зазнавати подальші перетворення з утворенням складних гідратованих оксидів  $FeO \cdot Fe_2O_3 \cdot n H_2O$  - іржі.

При корозії алюмінію має місце вторинний процес:



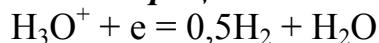
а в деяких випадках - подальша зміна гідрату окису алюмінію:



Плівки вторинних важкорозчинних продуктів корозії металів можуть мати захисні властивості і часто надають металу підвищену корозійну стійкість (Al і Zn в нейтральних розчинах, Fe і Mg в концентрованій HF, Pb в H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> та ін.). *Іржа на сталі також має деякі захисні властивості.*

#### 7.4. Корозійний процес з водневою деполяризацією

Корозійні процеси, в яких катодна деполяризація здійснюється водневими іонами, називаються **корозійними процесами з водневою деполяризацією.**



**Наприклад,** метали, що контактують з розчинами кислот, зокрема:

- 1) сталені цистерни;
- 2) металеві баки та апарати на хімічних заводах;
- 3) металічне обладнання цехів гальванічних покриттів, травильних відділень прокатних цехів (травлення іржі кислотами).

Корозійний процес *можливий*, коли  $(E_{Me})_{ss} < (E_{H_2})_{ss}$ .

$$(E_{H_2})_{ss} = (E_{H_2}^0)_{ss} + \frac{RT}{F} * 2.303 \lg \frac{A_{H^+}}{p_{H_2}}, \text{ де}$$

$(E_{H_2}^0)_{ss} = 0$  В – стандартний потенціал водневого електрода при високих температурах (зворотній потенціал водневого електрода при  $A(H^+) = 1$  і  $p_{H_2} = 101328$  Па = 1 атм).

Корозійний процес здійснюється в електролітах, що контактують з атмосферою, в якій парціальний тиск водню  $p_{H_2} = 5,1 * 10^{-2}$  Па ( $5 * 10^{-7}$  атм) (табл.6).

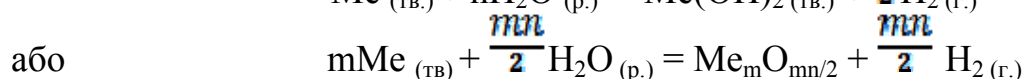
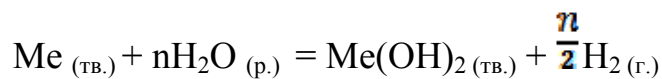
Таблиця 6.  $(E_{H_2}^0)_{ss}$  при 28°C та різних рН і  $p_{H_2}$ .

$p_{H_2}$	рН=0	рН=7	рН=14
$5,1 * 10^{-2}$ Па	+1,186	-0,228	-0,641
1 атм (101328 Па)	0	-0,414	-0,828

Корозійний процес з водневою деполяризацією є менш вірогідним, в порівнянні з катодним процесом з кисневою деполяризацією, тому що потенціал водневого електрода більш негативний.

Корозійний процес водневою деполяризацією має місце у таких випадках (табл.7):

- 1) При високій активності  $H^+$  в розчині (корозія Zn, Fe та інших металів в  $H_2SO_4$  і HCl)
- 2) При дуже негативних  $(E_{Me}^0)_{ss}$  (Mg в  $H_2O$  та NaCl) або при дуже низькій активності  $A_{Me}^{n+}$  (корозія Pb, Sn, в лужних і Fe в сильнолужних розчинах).



#### Схема корозійного процесу з водневою деполяризацією:

1. Дифузія  $H^+ * H_2O$  до катодних ділянок кородуючого металу;
2. Поляризація водневих іонів:  $H_3O^+ + e^- =$
3. Розчинення і дифузії частини атомів H в металі;
4. Молізація атомів H:  $H_{адс} + H_{адс} \rightarrow H_2$ ;
5. Дифузія  $H_2$  в розчині, а потім у повітря;
6. Утворення і відривання бульбашок  $H_2$  від поверхні.

**Катодна поляризація** – відставання асиміляції електронів від надходження їх на катодні ділянки.

При високих концентраціях [ ] концентраційна поляризація внаслідок

малої дифузії до катодних ділянок незначна. В нейтральних розчинах та при високих швидкостях корозійного процесу вона суттєва.

**Таблиця 7.** ЕРС та зміна ізобарно-ізотермічного потенціалів корозійних процесів з водневою деполяризацією ( $p_{H_2}=5 \cdot 10^{-7}$  атм;  $t=25^\circ\text{C}$ ;  $pH=7$ )

метал	Тв. продукти корозії	$(E_{298})_{ss} = (E_{H_2})_{ss} - (E_{Me})_{ss}$	$\Delta G$ , кДж/моль
Mg	$Mg(OH)_2$	+2.071	-200
Al	$Al(OH)_3$	+1.663	-160
Mn	$Mn(OH)_2$	+0.804	-77.6
Cr	$Cr(OH)_3$	+0.663	-64.0
Zn	$Zn(OH)_2$	+1.270	-102.0
Fe	$Fe_2O_3$	+0.270	-26.1
	$Fe(OH)_2$	+0.235	-22.7
	$Fe(OH)_3$	+0.131	-12.6
Co	$Co(OH)_2$	+0.191	-15.5
Ni	$Ni(OH)_2$	+0.161	-1.5
Hg	$Hg_2O$	-0.039	+70.7
Pb	PbO	-0.065	+6.3
Cu	$Cu_2O$	-0.282	+27.2
	CuO	-0.385	+37.3
	$Cu(OH)_2$	-0.418	+40.3
Ag	$Ag_2O$	-0.986	+95.1

**Причини катодної поляризації:**

1. Уповільнення катодної реакції, що призводить до перенапруги  $H_2$ ;
2. Концентраційна поляризація по молекулярному  $H_2$  внаслідок уповільненого відводу  $H_2$  з поверхні металу.

Перенапруга  $H_2$  (електрохімічна поляризація внаслідок уповільненої катодної реакції):  $(\Delta E_k)_{с\text{в}} = \eta$ ,

$\eta$  залежить від густини струму, матеріалу катоду, стану його поверхні.

При малих  $i_k$  ( $i_k < 0,01 \text{ A/m}^2$ )  $\eta = K_3 i_k$

При великих  $i_k$   $\eta = a_3 + b_3 \lg i_k$ ,

де  $K_3$ ,  $a_3$  – константи, що залежать від матеріалу та стану поверхні катоду, температури;  $b_3$  – константа, пов'язана з механізмом виникнення перенапруги водню.

Концентраційна поляризація (внаслідок уповільненої дифузії  $H^+$  до катодної поверхні металу):

$$(\Delta E_k)_{\text{конц.}} = \frac{RT}{F} + 2.303 \lg \frac{A_{H^+}}{A'_{H^+}}$$

де  $A_{H^+}$  - активність  $H^+$  в об'ємі електроліту;  $A'_{H^+}$  - активність у поверхні катодної ділянки.

**Особливості корозійних процесів з водневою деполаризацією:**

1. Менша залежність від перемішування;
2. Залежність від рН: з зменшенням рН  $E^0$  стає більш позитивним; перенапряга водню в кислих розчинах зменшується, а в лужних – росте.
3. Залежність від наявності катодних домішок: чим нижче  $n$  на домішках, тим більша швидкість корозійного процесу.
4. Протікає з прискоренням тоді, коли збільшується кількість мікрокатодних ділянок при розчиненні металу.
5. Поява водневої крихкості металу.

**7.4.1. Методи боротьби з корозійними процесами в розчинах кислот:**

**1. Застосування кислотостійких металів і сплавів:**

А) термодинамічно стійких Pt, Cu в розчинах HCl та  $H_2SO_4$

Б) металів та сплавів, що пасивуються (низьколеговані сталі в  $HNO_3$ , хромисті сталі в  $HNO_3$ );

В) металів та сплавів, що утворюють малорозчинні захисні плівки (залізокремнієвих сплавів в  $HNO_3$ ,  $H_2SO_4$ , HCl,  $H_3PO_4$ , сталі в  $H_2SO_4$ , свинцю в  $H_2SO_4$ , заліза і магнію в HF);

Г) особливо чистих по катодним домішкам металів (чистих Fe, Al, Zn в слабокислих розчинах);

**2. Введення розчинних добавок, що зменшують швидкість корозії за рахунок підвищення перенапруги водню:**

додавання кислотостійких уповільнювачів корозії (травильні присадки ЧМ до  $H_2SO_4$ , і ПБ до HCl);

**3. Нанесення кислотостійких захисних покриттів:**

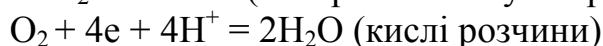
А) металічних (Si для сталей в  $HNO_3$  і  $HCl$ , шарове свинцювання для сталей в  $H_2SO_4$ , плакування низьколегованих сталей нержавіючою хромистою або хром-нікелевою сталлю);

Б) неметалічних органічних (поліетилен, фторопласт-3, епоксидні і каучукові покриття);

В) неорганічних (кислотостійкі емалі).

### 7.5. Корозія металів з кисневою деполяризацією

Корозійні процеси, у яких катодна деполяризація здійснюється розчиненим в електроліті киснем за реакцією:



називаються корозійними процесами з **кисневою деполяризацією** (найбільш розповсюджені).

**Наприклад:** 1. Ржавіння металевого обладнання в атмосфері;

2. Метали, що контактують з водою, нейтральними розчинами солей (охолоджувальні системи; в тому числі, мартенівських печей, металева обшивка річкових і морських суден);

3. Трубопроводи (контакт металу з ґрунтом).

Корозія з кисневою деполяризацією можлива, коли

$$\Delta G < 0, \text{ тобто,}$$

$$\text{коли } (Me)_{зв} < E(O_2)_{зв}.$$

$$E(O_2)_{зв} = E(O_2)_{зв}^0 + \frac{RT}{4F} \times 2,303 \lg \frac{P(O_2)}{a_{OH^-}^4}$$

де  $E(O_2)_{зв}^0$  - стандартний зворотній потенціал кисневого електрода при  $a_{OH^-}=1$ ,

тиску  $P(O_2)=101325 \text{ Па (1атм)}$ ;  $P(O_2)$  – парціальний тиск  $O_2$ ;

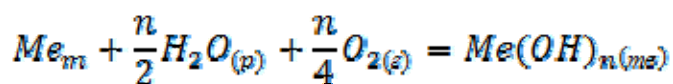
$a_{OH^-}$  - активність гідроксильних іонів;

В таблиці 8 наведено зворотні потенціали кисневого електрода за різних рН при температурі  $25^{\circ}\text{C}$ .

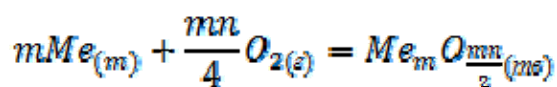
**Таблиця 8.** Зворотній потенціал кисневого електрода  $E(O_2)_{зв}$  при  $25^{\circ}\text{C}$  і різних рН

P(O <sub>2</sub> ), (Па, атм)	рН середовища		
	0	7	14
<b>Повітря</b> 21300 Па (0,21 атм)	+1,218	+0,805	+0,391
<b>Чистий кисень</b> 101325 Па (1 атм)	1,229	+0,815	+0,400

При корозії металів з кисневою деполяризацією мають місце процеси:



або



В таблиці 9 наведено ЕРС та  $\Delta G$  корозійних процесів з кисневою деполяризацією для деяких металів.

### Стадії катодного процесу кисневої деполяризації

1. Розчинення  $O_2$  в електроліті (проходження межі повітря-електроліт);
2. Перенос розчиненого  $O_2$  в об'ємі електроліта (конвекція або переміщення);
3. Перенос  $O_2$  в частині шару Прандтля (у поверхні кородуючого металу);
4. Перенос  $O_2$  в дифузійному шарі електроліта товщиною  $\delta$  (перенос здійснюється молекулярною дифузією) або в плівці продуктів корозії на металі до катодних ділянок металу);
5. Іонізація кисню:  
 $O_2 + 4e + 2H_2O = 4OH^-$  (рН=7, рН>7, нейтральне, лужне середовище)  
 $O_2 + 4e + 4H^+ = 2H_2O$  (кисле середовище, рН<7)
6. Дифузія і конвективний перенос  $OH^-$  від катодних ділянок поверхні металу до об'єму електроліту.

У більшості практичних випадків – найбільш уповільнені стадії катодного процесу – дифузія кисню та іонізація кисню.

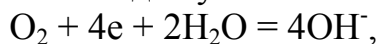
**Таблиця 9.** ЕРС і  $\Delta G$  корозійних процесів з кисневою деполяризацією

$$P_{O_2} = 0,21 \text{ атм, при } t = 25^\circ C, \text{ рН} = 7)$$

Метал	Продукт корозії	$(E_{298}) = E(O_2)_{зв} - E(Me)_{зв}$	$\Delta G$ , кДж/моль
Mg	Mg(OH) <sub>2</sub>	+0,815 – (-2,363) = 3,168	-300
Al	Al(OH) <sub>3</sub>	+2,696	-260
Cr	Cr(OH) <sub>3</sub>	+1,696	-164
Mn	Mn(OH) <sub>2</sub>	1,837	-177
Fe	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	+1,303	-126
Fe	Fe(OH) <sub>2</sub>	+1,268	-122
Fe	Fe(OH) <sub>3</sub>	+1,164	-112
Cd	Cd(OH) <sub>2</sub>	+1,224	-118
Co	Co(OH) <sub>2</sub>	+1,194	-115
Ni	Ni(OH) <sub>2</sub>	1,043	-101
Hq	Hq <sub>2</sub> O	0,994	-96
	HqO	0,300	-29
Pb	PbO	+0,968	-93,4
Cu	Cu <sub>2</sub> O	+0,751	-72,4
	CuO	0,648	-64,4
	Cu(OH) <sub>2</sub>	0,615	-59,3
Ag	Ag <sub>2</sub> O	+0,047	-4,5

## Перенапряга іонізації O<sub>2</sub>

Електрохімічну поляризацію внаслідок уповільнення реакції



яка при відсутності поляризації повинна була протікати при  $E_{\text{к}} = E(\text{O}_2)_{\text{ЗВ}}$ , називається перенапрягою іонізації O<sub>2</sub>. Вона залежить від катодної густини струму, матеріалу катоду, температури.

При дуже малих значеннях катодної густини струму (орієнтовно при  $i_{\text{а}} < 10^{-2} \text{ A/m}^2$ ) залежність перенапряги іонізації кисню від катодної густини струму може бути виражена лінійним рівнянням [ділянка (V<sub>Me</sub>)<sub>обр</sub> – А, рис. 18]:

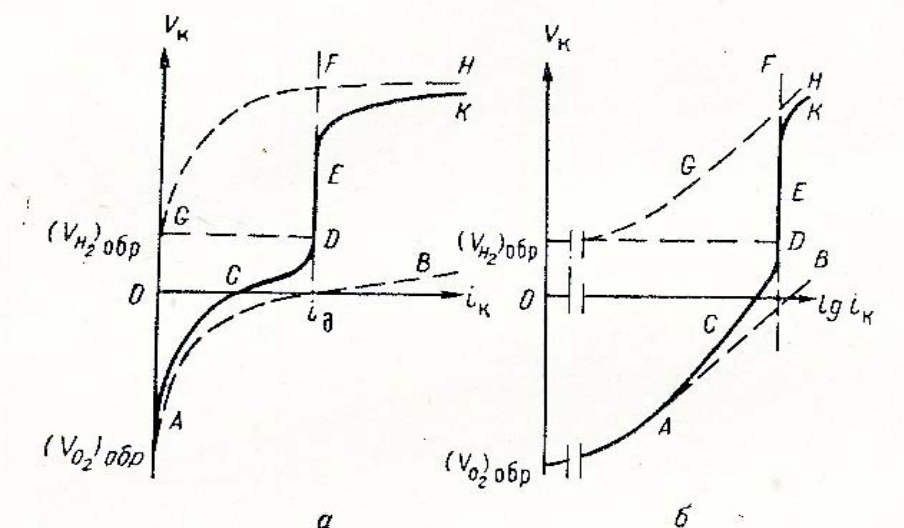
$$\eta = k_2 i_{\text{к}}$$

де  $K_2$  - стала, що залежить від матеріалу і стану поверхні катода, температури.

При густинах струму, більших, ніж  $10^{-2} \text{ A/m}^2$ , катодна поляризація виражається логарифмічним рівнянням [ділянка АВ, рис. 18]:

$$\eta = a_2 + b_2 \lg i_{\text{к}}$$

де  $a_2$  – константа, що залежить від матеріалу і стану поверхні катода, температури;  $b_2$  - константа, пов'язана з механізмом утворення перенапряги іонізації кисню.



**Рис. 18.** Катодні поляризаційні криві: **а** – в координатах  $i_{\text{к}} - V_{\text{к}}$ ; **б** – в координатах  $\lg i_{\text{к}} - V_{\text{к}}$ . [(V<sub>O<sub>2</sub></sub>)<sub>обр</sub>AB - перенапряга іонізації кисню; (V<sub>H<sub>2</sub></sub>)<sub>обр</sub>GH – перенапряга водню; (V<sub>O<sub>2</sub></sub>)<sub>обр</sub>CDEK- загальна крива катодної поляризації].

### Контрольні питання до теми 7

1. Яка термодинамічна умова протікання електрохімічної корозії?
2. В чому полягає сутність електрохімічної корозії та в чому її відмінність від хімічної корозії?
3. Розкрийте поняття "місцевий гальванічний елемент" та вкажіть його відмінність від звичайного гальванічного елементу. В чому причини його появи?
4. Чим викликана електродна поляризація при корозійному процесі?
5. Що виражають поляризаційні криві?
6. Що таке деполяризаційні процеси і деполяризатори?



7. В чому полягає корозійний процес з водневою деполяризацією?
8. Поясніть схему роботи корозійного гальванічного елемента.
9. Вкажіть катодні процеси, наведіть їх хімічні рівняння і умови протікання для корозійного процесу з кисневою деполяризацією.
10. Наведіть приклади електрохімічної корозії з водневою деполяризацією.
11. Наведіть приклади електрохімічної корозії з кисневою деполяризацією.
12. Як впливають домішки в сталі (вуглець, сірка, фосфор) на швидкість електрохімічної корозії?
13. Як впливає рН на швидкість електрохімічної корозії?
14. Що таке пасивний стан сталі? За яких умов метал здатний пасивуватися?

## Тема 8. Захист металів від електрохімічної корозії

Для захисту металів від електрохімічної корозії застосовують:

- 1 Легування;**
- 2 Обробка корозійного середовища;**
- 3 Захисні покриття;**
- 4 Електрохімічний захист;**
- 5 Раціональне конструювання**

### 8.1. Легування

#### ***I. Підвищення корозійної стійкості:***

1) Введення компонентів, що сприяють утворенню екранізуючого захисного шару продуктів корозії:

Приклад: легування міді алюмінієм (алюмінієві бронзи) і цинком (латуні); легування сталей нікелем (для стійкості в лугах) та молібденом (для корозійної стійкості в середовищах з хлорид-іоном  $Cl^-$ ).

2) Зменшення катодної активності сплава введенням компонентів, що підвищують перенапругу катодного процесу:

Приклад: амальгування цинку; легування магнію марганцем (для підвищення стійкості в кислотах).

3) Зменшення анодної активності сплава:

а) підвищення термодинамічної стійкості анодної фази.

Приклад: легування міді золотом; нікеля міддю.

б) введення легко пасивуючих компонентів. Приклад: легування сталі хромом, кремнієм.

в) введення активних катодів. Приклад: введення міді в сталь; малих добавок Ag, Pd, Pt в хромисті сталі).

#### ***II. Зменшення місцевої корозії:***

Усунення перетворень меж зерен в активні аноди.

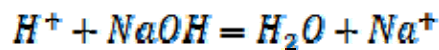
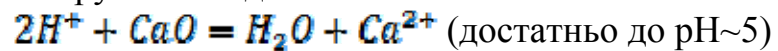
Приклад: легування хромових сталей активними карбідоутворювачами – Ti, Nb, Ta).

### 8.2. Обробка корозійного середовища

#### ***I. Зменшення вмісту деполяризатора:***

### 1) Нейтралізація кислих середовищ:

Кислих шахтних вод і кислих ґрунтів – за допомогою CaO і NaOH:



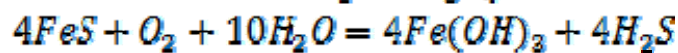
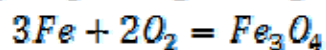
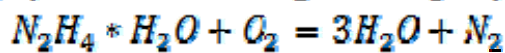
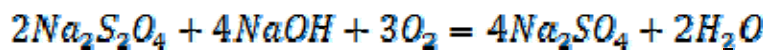
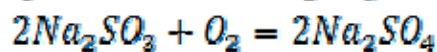
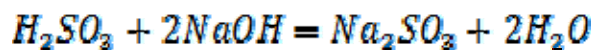
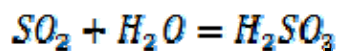
### 2) Деаерація (знекиснювання) води:

а. Нагрівання води (термічна деаерація);

б. Продування води інертним газом (наприклад, азотом) (десорбційна деаерація)

в. Введення в воду відновників (хімічна деаерація):

відновники:  $Na_2SO_3$ ,  $SO_2$ ,  $Na_2S_2O_4$ ,  $N_2H_4 \cdot H_2O$ , FeS.



### III. Введення уповільнювачів корозії:

1. Кислотні уповільнювачі застосовуються при видаленні окалини та іржі в розчині  $H_2SO_4$ .

Приклади: а) присадка ЧМ («чорні метали») містить уповільнювач корозії – основу хінолінового ряду + піноутворювач + сульфїтцелюлозу;

б) введення  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $I^-$  в  $H_2SO_4$  – знижує корозію заліза;

в) катапін (парадодецилбензилпіридинхлорид) додається в  $H_2SO_4$ ;

г) ПБ-5 (полімер бутіліміна 0,8-1%) - в HCl.

### 2. Уповільнювачі корозії у воді:

$NaNO_2$  – для чавуну і сталі у воді;

0.005%  $NaNO_2$ , 0.03%  $NaNO_2$  є 0.05%  $NaCl$  (при  $pH \geq 6$ )

$NaNO_2$  застосовують охолоджувально-змащувальних рідинах, в пароводних котлах, в бензо- і нафтопроводах.

$K_2CrO_4$  і  $K_2Cr_2O_7$  - для захисту сталей (водяне охолодження двигунів):

0,2-0,5%  $K_2CrO_4$ ; 2-5%  $K_2CrO_4$  для застосування в розчині з 0,1-1 г/л  $Cl^-$ ;

$K_2Cr_2O_7$  - при  $pH=8-9$  (в розчині  $NaOH$ ).

Фосфати та поліфосфати – в проточних та циркуляційних системах:

$(NaPO_3)_6$  – 0,025-0,2 г/л;

Аміни – плівкоутворювачі застосовуються як уповільнювачі корозії в тепломережах:

$(C_{18}H_{37}NH_2, C_{16}H_{33}NH_2)$

### 3. Уповільнювачі атмосферної корозії:

а) контактні уповільнювачі – змочування поверхні металу розчином  $\text{NaNO}_2$ , утворення пасивної плівки з захисними властивостями.  
(наприклад, змочування сталей 5-15 днів в розчині, що містить 10-15%  $\text{NaNO}_2$  і 0,3-0,5%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

б) леткі уповільнювачі – мають високу пружність пари, адсорбуючись на поверхні металу, захищають від атмосферної корозії. Це такі речовини, як нітрити заміщених амінів; естери карбонатних кислот; карбонати заміщених амінів.

### **8.3. Інгібітори корозії. Кількісна характеристика ефективності дії інгібіторів**

Інгібітори корозії - хімічні речовини, які при додаванні їх у невеликих кількостях у корозійне середовище гальмують процес корозії.

Ефективність інгібітора зумовлюється його природою та властивостями металу, який корозує.

#### ***Інгібітори бувають:***

- органічні (ПАР – адсорбуються на поверхні металу і екранують поверхню металів від агресивного агента, або завдяки ПАР змінюється кінетика реакцій, які лежать у основі корозійного процесу)

- неорганічні (хромати, молібдати, фосфати) – застосовуються у нейтральних середовищах, вони або пасивують метал, або формують на його поверхні захисні плівки.

Розрізняють інгібітори катодні, анодні та змішаного типу.

Якщо інгібітор підвищує перенапругу катодної реакції (катодний інгібітор), то корозійний стаціонарний потенціал металу зміщується у негативний бік.

Якщо в корозійне середовище ввести анодний інгібітор, то стаціонарний потенціал металу зміщується у позитивний бік.

У випадку застосування змішаних інгібіторів корозійний потенціал може не змінюватись, але корозія уповільнюється.

#### **Кількісна характеристика ефективності дії інгібіторів:**

1. **коефіцієнт гальмування корозії** показує, у скільки разів зменшується швидкість корозії металу за наявності інгібітора в порівнянні зі швидкістю корозії без інгібітора:

$$\gamma = \frac{i_c}{i'_c}$$

2. **ступінь захисту** показує відносне зменшення швидкості корозії за наявності інгібітора в порівнянні зі швидкістю корозії без інгібітора:

$$Z = \frac{i_c - i'_c}{i_c} \cdot 100\%$$

$i'_c$  та  $i_c$  – швидкість корозії металу (у струмових або інших одиницях) при наявності та за відсутності інгібітора, відповідно.

Механізм гальмування корозії інгібіторами залежить від:

- заряду поверхні металу;
- природи корозійного процесу;
- кінетики катодних і анодних реакцій.

#### 8.4. Захисні покриття

В таблиці 10 наведено класифікацію захисних покриттів (металічних, неметалічних, хімічних сполук металів).

**Таблиця 10. Захисні покриття**

Металічні	Хімічні полуки металів	Неметалічні	
		органічні	неорганічні
Cd, Cu, Pb, Zn, Al, Cr, Ni, Sn, сплави	оксидні, оксидно-хроматні, інші	смазки, лаки, фарби, смоли, гуми	цементи, бетони, емалі, керамічні плити

**Металічні захисні покриття наносять:**

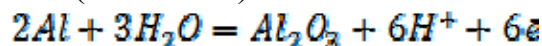
- а) зануренням в розплав металів;
- б) термодифузійним методом;
- в) напиленням (металізацією);
- г) механотермічним методом (плакуванням);
- д) гальванічним методом.

**Застосування хімічних сполук металів:**

а) оксидування сталі, алюмінію, магнієвих сплавів для захисту від атмосферної корозії.

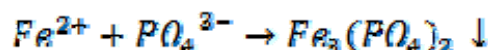
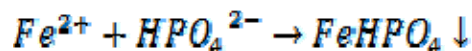
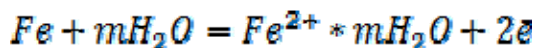
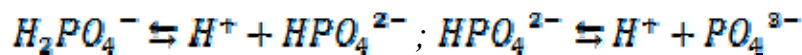
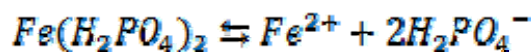
Сталі: утворення  $Fe_3O_4$  термічним, хімічним і паротермічним способами.

Алюміній: анодування (5-200мкм):



(катод – свинцеві пластини, електроліт  $H_2CrO_4, H_2SO_4$ )

б) фосфатування – утворення на поверхні заліза фосфатної плівки (98°C, 3% розчином  $Fe(H_2PO_4)_2$  і  $Mn(H_2PO_4)_2$ )



#### 8.5. Електрохімічний захист

Електрохімічний захист металів від корозії заснований на залежності швидкості корозії від електродного потенціалу металу. У загальному випадку ця залежність має складний характер. В принципі, метал або сплав повинен

експлуатуватися в тій області потенціалів, де швидкість його анодного розчинення менше деякої конструктивно допустимої межі, яку визначають, виходячи з терміну служби обладнання або припустимого рівня забруднення технологічного середовища продуктами корозії. Крім того, повинна бути мала ймовірність локальних корозійних пошкоджень. Це так званий **потенціостатичний захист**.

До власне електрохімічного захисту відносять **катодний захист**, при якому потенціал металу спеціально зміщують з області активного розчинення в більш негативну область відносно потенціалу корозії, і **анодний захист**, при якому електродний потенціал зміщують в позитивну область до таких значень, коли на поверхні металу утворюються пасивуючі шари.

### 8.5.1. Катодний захист

Зсув потенціалу металу може бути здійснений за допомогою зовнішнього джерела постійного струму (станції катодного захисту) або з'єднання з іншим металом, більш електронегативним за своїм електродним потенціалом (так званий протекторний анод). При цьому поверхня зразка (деталі конструкції) стає екіпотенційною і на всіх її ділянках протікають тільки катодні процеси, а анодні, що обумовлюють корозію, перенесені на допоміжні електроди. Якщо зсув потенціалу в негативний бік перевищить певне значення, можливий так званий *перезахист*, пов'язаний з виділенням водню, зміною складу приелектродних шарів та іншими явищами, що може призвести до прискорення корозії. Катодний захист, як правило, поєднують з нанесенням захисних покриттів; необхідно враховувати можливість відшарування покриття.

Катодний захист широко застосовують для захисту від морської корозії. Цивільні судна захищають використанням **Al-, Mg- або Zn- протекторних анодів**, які розміщують уздовж корпусу та поблизу гвинтів і рулів.

**Станції катодного захисту** використовують в тих випадках, коли потрібно відключення захисту для усунення електричного поля судна, при цьому потенціал зазвичай контролюють по хлорсрібному електроду порівняння. Критерієм достатності захисту є значення потенціалу  $-0,75$  В за хлорсрібним електродом, або зсув потенціалу корозії, що становить  $0,3$  В (на практиці зазвичай  $0,05-0,2$  В). Існують автоматичні станції катодного захисту, розташовані на судні або на березі (при стоянці або ремонті). Аноди зазвичай виготовлені з платинованого титану, лінійної або круглої форми, з прианодними непровідними екранами для поліпшення розподілу потенціалу та густини струму вздовж корпусу судна. Конструкція анодів забезпечує їх захист від механічних пошкоджень (наприклад, в льодових умовах).

Особливо важливе використання катодного захисту для стаціонарних нафтогазопромислових споруд, трубопроводів і сховищ до них на континентальному шельфі. Подібні споруди не можуть бути введені в сухий док для відновлення захисного покриття, тому електрохімічний захист є основним методом запобігання корозії. Морська нафтопромислова вишка, як

правило, має у своїй підводній частині протекторні аноди (на одну вишку припадає до 10-ти і більше протекторних анодів).

Широко поширений катодний захист підземних споруд. Практично всі магістральні та міські трубопроводи, кабелі, підземні сховища і свердловини, особливо в засолених ґрунтах, забезпечені пристроями для катодного захисту в поєднанні із захисними покриттями. Як правило, електрохімічний захист здійснюється від станцій катодного захисту, протекторні аноди застосовують лише при відсутності джерел струму. Потенціал споруди контролюють за сульфатно-мідними електродами порівняння. Струм катодного захисту періодично регулюють, виходячи з потенціалу захисту в різних точках споруди. По мірі руйнування захисного покриття струм захисту збільшують. Протекторні аноди можуть бути виготовлені з залізокремнієвих сплавів або графітопластів, забезпечуються прианодним засипанням (кокс, вугілля) для зниження загального опору розтіканню струму з анода в землю. По мірі віддалення від анода захищеної споруди збільшують необхідну напругу захисту (зазвичай до 48 В, для сильно віддалених анодів до 200 В), при цьому поліпшується розподіл захисного струму. Для захисту розгалужених міських мереж або для спільного захисту кількох споруд застосовують глибинні аноди, розташовані під землею на глибині 50-150 м.

Важливе значення має електрохімічний захист підземних споруд в *поле блукаючих струмів*, основна причина виникнення таких струмів - робота електротранспорту, рідше - заземлення електрообладнання. Боротьба з корозією в цих умовах зводиться до контролю потенціалу та встановлення дренажних пристроїв, що забезпечують електричне з'єднання джерел струмів витоків із захисною спорудою. Використовують автоматичні дренажні пристрої з включенням і вимиканням у відповідності зі значенням захисного потенціалу. Такі дренажні пристрої забезпечують надійний захист незалежно від зміни знака потенціалу на споруді, що захищається.

Катодний захист сталевих арматур в залізобетоні застосовують для паль, фундаментів, дорожніх споруд (у тому числі, горизонтальних покриттів) і будівель. Арматура, зварена, як правило, в єдину електричну систему, кородує при проникненні в бетон вологи і хлоридів. Останні можуть потрапляти в результаті впливу морської води або використання солей-антиобліднювачів дорожніх споруд, застосування хлоридів для прискорення твердіння бетону. Вельми ефективна санація бетону старих будівель з установкою катодного захисту. При цьому встановлюють первинні аноди з крем'янистого чавуну, платинованих титану або ніобію, графіту, титану з металооксидним покриттям, які забезпечують підведення струму до вторинних (розподільчих) анодів (титанової сітки з металооксидним покриттям або електропровідним неметалевим покриттям, титанового стрижня з покриттям), розташованими вздовж всієї поверхні споруди та закритими зверху тонким шаром бетону. Потенціал арматури регулюють, змінюючи зовнішній струм.

Розробляються способи катодного захисту кузовів транспортної техніки (автомобілів). Протекторні аноди використовують для захисту декоративних

елементів кузова, при цьому електронні пристрої забезпечують постійний або імпульсний струм, аноди, що наклеюються на кузов, виготовляють з електропровідного полімеру (наприклад, графітопласту, вуглепластику) або нержавіючої сталі. Для збільшення зони дії захисту необхідно розміщувати аноди в найбільш корозійнонебезпечних точках або використовувати електропровідну фарбу.

### 8.5.1.1. Катодний протекторний захист

До металічного катоду приєднується протектор – інший метал або сплав, що має більш негативний потенціал (частіше це Al-Zn сплави, або чистий цинк, сплави на основі магнію). Протектор поступово розчиняється (рис.19). Застосовується в морській воді, ґрунті та інших нейтральних корозійних середовищах.

Ефективність катодного захисту розраховується за формулою:

$$Z = \frac{K_{m_0} - K_{m_2}}{K_{m_0}} * 100 = \frac{I_2 - I_{a_2}}{I_2} * 100$$

$K_{m_0}$  – показник швидкості корозійного процесу в електроліті без катодного захисту;

$K_{m_2}$  – показник швидкості корозійного процесу металу з протекторним захистом;

$I_2$  – корозійний струм без катодного захисту;

$I_{a_2}$  – корозійний струм металу при приєднанні протектора катодного захисту;

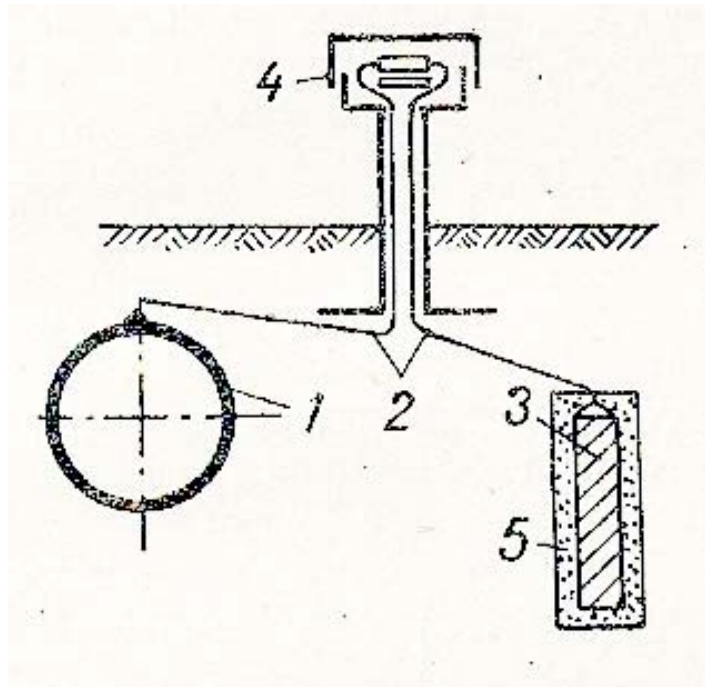
$Z$  – захисний ефект, %.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) протектора розраховується за формулою:

$$\eta = \frac{\Delta m_{теор.}}{\Delta m_{прак.}} * 100\%$$

$\Delta m_{теор.}$  – теоретична витрата маси протектора;

$\Delta m_{прак.}$  – практична витрата маси протектора.



**Рис. 19.** Схема протекторного захисту трубопровода від підземної корозії:  
1 – труба , 2 – кабель, 3 – протектор, 4 – контрольна коробка, 5 – наповнювач.

#### 8.5.1.2. Катодний захист зовнішнім струмом

Це захист металу від корозії за допомогою постійного струму від зовнішнього джерела. Метал, який захищають, приєднують до негативного полюсу зовнішнього джерела (це катод), а до позитивного полюсу приєднують додатковий електрод. Поляризуючись анодно, він руйнується (рис.20).

Цей вид захисту застосовують як додаткове до ізолюючого покриття до трубопроводів, підземних резервуарів, заводської апаратури, т.д.

$$K_3 = \frac{\Delta m_0 - \Delta m_2}{i_k};$$

де  $K_3$  – коефіцієнт захисної дії;

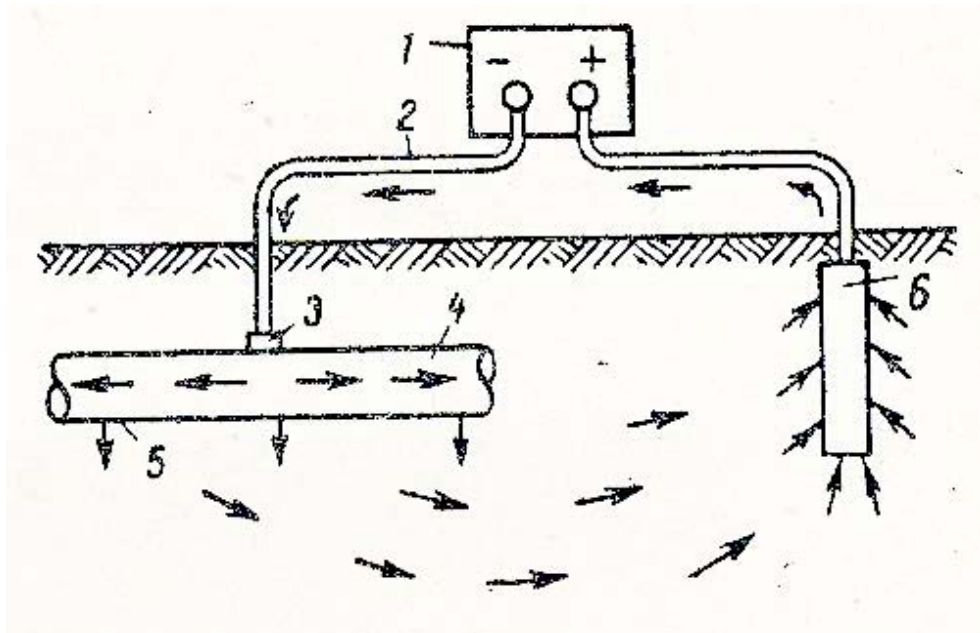
$\Delta m_0$  – витрата маси металу без захисту;

$\Delta m_2$  – витрата маси металу при катодному захисті;

$i_k$  – катодна густина струму.

Для сталі катодна густина струму складає 0,2-0,3 А/дм<sup>2</sup>.





**Рис. 20.** Схема катодного захисту трубопровода зовнішнім струмом: 1 – джерело постійного струму, 2 – з’єднувальний ізольований дріт, 3 – пункт дренажу, 4 – захисний трубопровід, 5 – ізолююче захисне покриття, 6 – анодне заземлення.

### 8.5.2. Анодний захист

При анодному захисті електродний потенціал металу зміщують в позитивну область до таких значень, коли на поверхні металу утворюються пасивуючі шари.

Анодний захист застосовується в хімічній і суміжних з нею галузях промисловості. Металоконструкції або споруди повинні мати область пасивності з досить низькою швидкістю розчинення, яка лімітується не тільки руйнуванням металу, але і можливим забрудненням середовища. Широко застосовують анодний захист для обладнання, що працює в сірчаній кислоті, середовищах на її основі, водних розчинах аміаку та мінеральних добрив, фосфорної кислоти, в целюлозно-паперовій промисловості та ряді окремих виробництв (наприклад, одержання роданіду натрію). Особливо важливий анодний захист теплообмінного устаткування з легованих сталей у виробництві сірчаної кислоти; захист холодильників від кислоти дозволяє підвищити робочу температуру, інтенсифікувати теплообмін, підвищити експлуатаційну надійність. Регулювання потенціалу металу здійснюють автоматичними станціями анодного захисту (регуляторами потенціалу), що працюють з контролем потенціалу та керуючим сигналом від електрода порівняння.

Допоміжні електроди виготовляють з високолегованих сталей, кременистого чавуну, платинованої латуні (бронзи) або міді. Електроди порівняння - виносні та заглибні, близькі за складом до аніонного складу агресивного середовища (сульфатно-ртутні, сульфатно-мідні тощо). Можуть бути використані будь-які електроди, що мають у даному середовищі стійкий потенціал, наприклад, потенціал корозії (електроди з чистого цинку), або потенціал електрохімічної реакції (осадження покриття, виділення хлору або

кисню). Зона дії захисних потенціалів залежить від області оптимальної запасованості металу і змінюється від декількох (титанові сплави) до декількох десятків мВ (нержавіючі сталі при підвищених температурах).

Анодний захист ванн для хімічного осадження покриттів забезпечує захист ванни від корозії і випадкових осаджень покриття на стінки ванни. Можливе виникнення вторинної пасивної області потенціалів, розташованої позитивніше області пітінгоутворення, що забезпечує анодний захист від пітінгової корозії. Для стабілізації систем захисту застосовують протекторні катоди з високим позитивним потенціалом (графітопластові електроди), поляризація створюється з допомогою оксидних електродів або кисневих електродів, що використовуються в паливних елементах.

В електрохімічних виробництвах для захисту обладнання від струмів витоку по електроліту, встановлюють додаткові електроди, що усувають протікання струму через поверхню, що захищається.

### 8.6. Раціональне конструювання

Конструкції повинні відповідати вимогам, які зменшують вплив корозії (рис. 21-23):

1. Послаблювати механічні впливи;
2. Усувати напружені ділянки;
3. Труднодоступні та застоїні зони;
4. Створювати умови дренажу;
5. Мінімізувати число зазорів та щілин;
6. Зменшити неоднорідність корозійних процесів;
7. Усувати локальне потрапляння корозійного середовища.

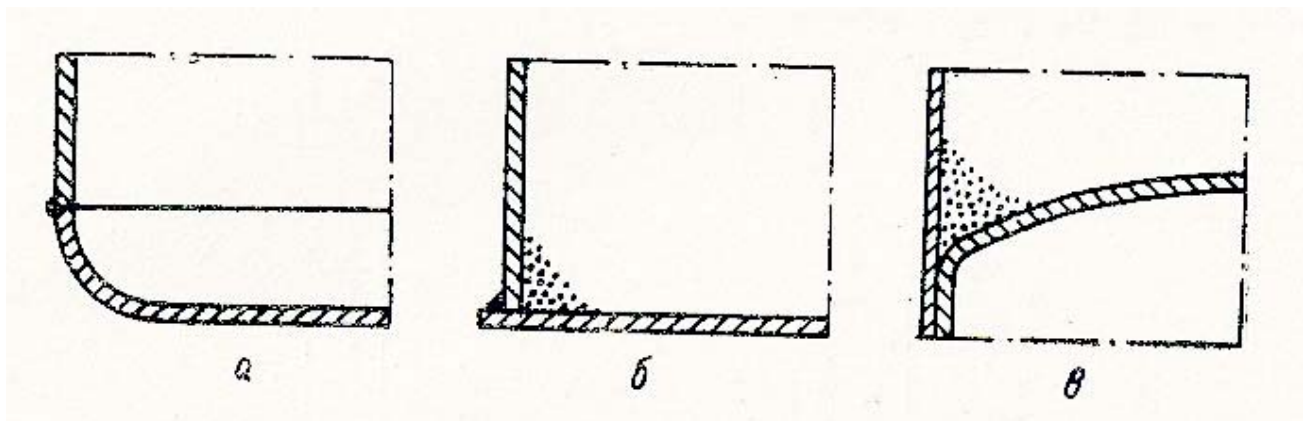
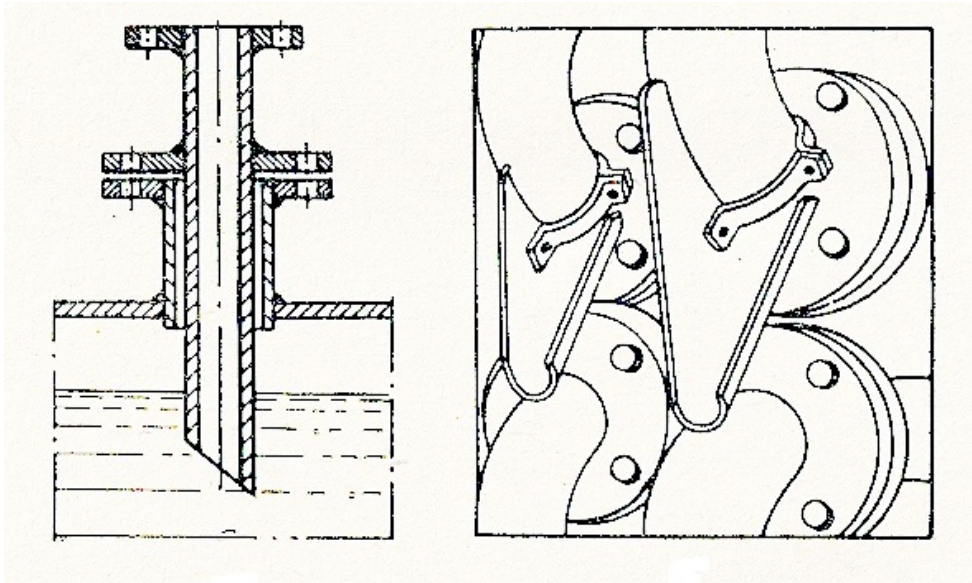
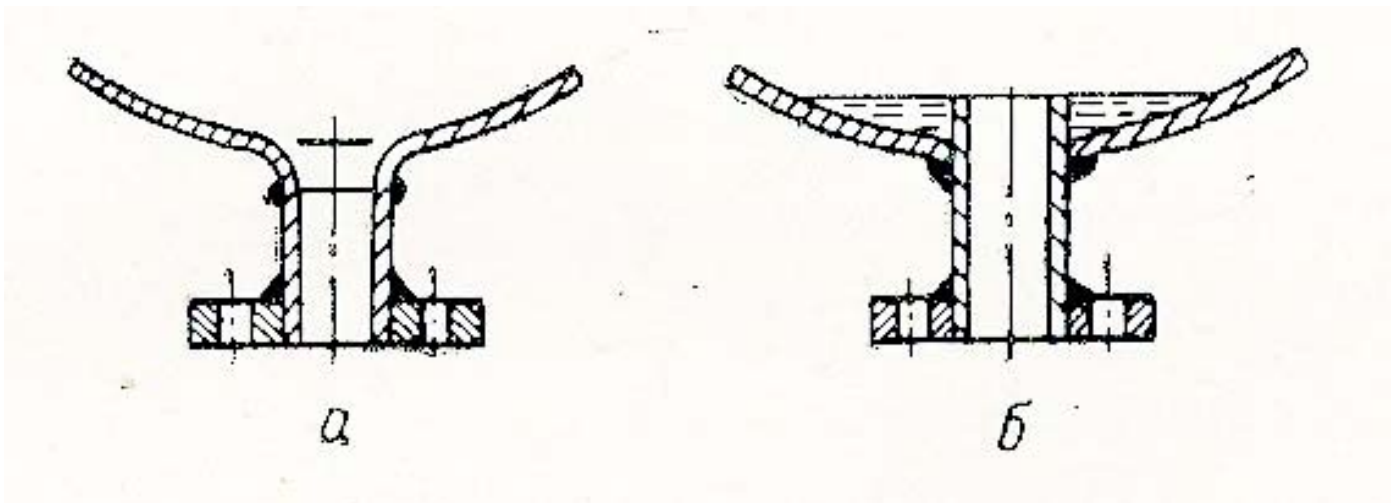


Рис. 21. Спряження обечайки з днищем: а – вдале, б, в – невдале.



**Рис. 22.** Пристрої, що захищають від корозії: а – патрубок, що захищає від стікання агресивної рідини по стінкам; б – щітки, що запобігають потраплянню води на фланці.



**Рис. 23.** Приварювання зливного патрубку: а- правильне; б – неправильне.

### 8.7. Атмосферна корозія та захист від неї

До атмосферної корозії схильні всі металоконструкції, що експлуатуються на відкритому повітрі (близько 50 % від усього наявного металофонду), а *саме*: трубопроводи і ємнісне обладнання надземного розташування, металеві частини будівель, опор, мостів, транспортні та вантажно-розвантажувальні засоби. Поверхні конструкцій при експлуатації неминуче піддаються зволоженню і забрудненню, що є першопрчиною виникнення і розвитку корозійних процесів.

За механізмом протікання даний вид корозії в більшості випадків є електрохімічним процесом, за винятком «сухої» корозії, що протікає за хімічним механізмом. Електрохімічний процес передбачає наявність на кородуючій поверхні катодних і анодних ділянок, а також електроліту, роль

якого виконує плівка вологи (товщиною від декількох молекулярних шарів до одного міліметра), постійно присутня на поверхні металу. Виникнення гальванічних елементів «катод - анод» на основних конструкційних матеріалах - вуглецевих сталях відбувається через диференціацію їх поверхні на ділянки з різними електродними потенціалами (теорія локальних корозійних елементів).

Причини диференціації можуть бути різними:

- неоднорідність структури металу (у вуглецевих сталях присутні фази - ферит і цементит, структурні складові - перліт, цементит і ферит, вони мають різні електродні потенціали);
- наявність на поверхні сталей оксидних плівок, забруднень, неметалічних включень і т. п.;
- нерівномірний розподіл окислювача на межі «метал-електроліт», наприклад, різні вологість, аерація на різних ділянках поверхні металу
- нерівномірність розподілу температури;
- контакт різнорідних металів.

В даний час відомо більше тридцяти п'яти факторів, що впливають на швидкість атмосферної корозії, основними з яких є: ступінь зволоження металу, стан поверхні конструкції (пористість, забрудненість), хімічний склад атмосфери (наявність гігроскопічних і агресивних продуктів).

**За ступенем зволоження кородуючої поверхні розрізняють:**

- **мокру атмосферну корозію** - при відносній вологості повітря близько 100 % і наявності на поверхні металу видимої плівки вологи;
- **вологу атмосферну корозію** - при відносній вологості повітря нижче 100 % і наявності на поверхні металу плівки вологи, що утворюється в результаті капілярної, адсорбційної або хімічної конденсації;
- **суху атмосферну корозію** - корозію при відносній вологості повітря менше 50 % і товщині плівки вологи до 10 нм.

Відмінність це досить умовна, оскільки в практичних умовах можливий взаємний перехід одного типу корозії в іншу.

Забруднення повітряних середовищ і, як наслідок, поверхні конструкцій агресивними домішками відбувається в результаті функціонування об'єктів промисловості, через недосконалість вузлів хімічного та іншого обладнання, негерметичності роз'ємних з'єднань, випадкових витоків технічних рідин, розгерметизації комунікацій, наявності мікродефектів в металі і т. п.

**Забруднення поділяють на дві групи: органічного та неорганічного походження.** Перші потрапляють на поверхню ззовні, другі можуть потрапляти ззовні і виникати в результаті взаємодії газів, що забруднюють атмосферу (оксиди сірки і азоту, хлор, хлористий водень тощо), з поверхнею металу. Домішки, здатні розчинятися у воді, активують електрохімічну реакцію внаслідок утворення розбавлених кислот і збільшення електропровідності плівок вологи, а малорозчинні, пухкі, несучільні продукти корозії створюють умови для виникнення і роботи макрогальванічних пар. Крім агресивних газів, в атмосфері можуть утримуватися частки твердих речовин і аерозолі солей. Їх

джерелами можуть служити гірські породи, що руйнуються, солончакові ґрунти, приморські зони, що мають підвищений вміст хлоридно-сульфатних натрієвих солей. Також тверді частинки виділяються при згорянні різного палива, виробництві цементу і добрив. Частинки переносяться повітряними масами на відстані до однієї тисячі кілометрів і, осідаючи на поверхні металу, стають центрами конденсації вологи з повітря. Практично встановлено, що швидкість атмосферної корозії в забрудненій різними газами та твердими домішками атмосфері більша.

Продовження термінів експлуатації різних металоконструкцій до їх морального зносу - основна мета рішення багатовікової проблеми корозії металів. Згідно з визначенням термін «корозія» означає процес. Цей процес полягає в фізико-хімічній реакції між металом і навколишнім середовищем, що призводить до змін у властивостях матеріалу і навколишнього середовища. Результатом процесу є «корозійний ефект», що скорочує термін служби металоконструкцій, погіршує функціональні характеристики включають їх технічних систем і приводить до збільшення витрат, складниками яких є не тільки витрати на вартість ремонту і заміну пошкоджених корозією частин обладнання, але і витрати на відшкодування збитків від різних неполадок в результаті корозії (зупинок виробництва або аварій, що призводять до руйнувань чи нещасних випадків). Частина цих витрат неминуча, однак їх безперечно можна значно скоротити за рахунок кращого використання і постійного вдосконалення на практиці методів захисту, якими ми сьогодні маємо, в десятки разів вище, ніж у чистої.

Захист від корозії в цілому являє комплекс заходів, спрямованих на запобігання та інгібування корозійних процесів, збереження і підтримка працездатності вузлів і агрегатів машин, обладнання та споруд в необхідний період експлуатації. Методи захисту металоконструкцій від атмосферної корозії ґрунтуються на цілеспрямованому впливі, що приводить до повного або часткового зниження активності факторів, що сприяють розвитку корозійних процесів, і умовно поділяються на методи впливу на метал, навколишнє середовище, а також комбіновані методи. Серед перших найбільше поширення отримали методи нанесення покриттів постійної дії, консерваційних покриттів, легування, серед других - методи повної або часткової герметизації з використанням поглиначів вологи (статична осушення повітря, очищення навколишнього атмосфери від забруднень, підтримання певних температурних режимів). При відсутності бажаного ефекту від роздільного застосування методів впливу на метал і середу вдаються до комбінованих методів, заснованих на комплексному впливі на метал з допомогою захисних покриттів і навколишнє середовище.

Із найбільш застосовуваних на практиці методів захисту від атмосферної корозії є досить ефективний метод нанесення захисних лакофарбових покриттів (далі - ЛКП).

В структурі світових витрат на протикорозійний захист на лакофарбові покриття припадає близько 39 % коштів, що в два рази перевищує витрати на

розробку і виробництво корозійно-стійких матеріалів. Всі різновиди ЛКП відносяться до групи органічних покриттів і являють собою тверду плівку органічних речовин з пігментами і наповнювачами, одержувану при висиханні лакофарбового складу, нанесеного на поверхню, що захищається. Захисні властивості ЛКП залежать від суцільності і щільності плівки, що ізолює поверхню металу від навколишнього середовища, а також характеру взаємодії покриття з поверхнею металу. Товщина покриттів може змінюватися від десятків до сотень мікрметрів в залежності від їх призначення.

**До основних переваг ЛКП слід віднести:**

- можливість застосування для захисту будь-яких конструкцій, незалежно від їх розміру, безпосередньо на монтажних і будівельних майданчиках;
- простоту і можливість механізації технологічного процесу нанесення покриттів;
- покриття на більшості металоконструкцій, трубопроводах та обладнанні можуть ремонтуватися і відновлюватися безпосередньо в процесі експлуатації;
- мала витрата матеріалу на одиницю площі і низька вартість у порівнянні з іншими видами захисних покриттів.

Одним з основних показників, що визначають ефективність застосування того або іншого виду покриття, є його довговічність, а саме: здатність покриття зберігати захисні властивості до граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. Довговічність покриття визначається багатьма факторами, в тому числі його фізико-механічними і хімічними властивостями, ступенем підготовки поверхні металу перед фарбуванням, правильним вибором покриття або системи покриттів для конкретних умов експлуатації.

## **8.8. Корозія при нерівномірній аерації та захист від неї**

Корозія внаслідок нерівномірної аерації виникає на тих ділянках металу, які *менш доступні дії кисню*, ніж інша поверхня. Нерівномірна аерація сприяє зниженню корозійної стійкості більшості металів.

Нерівномірна аерація виникає вздовж трубопроводу при наявності ґрунтів з різною проникністю повітря. У зонах сильної аерації утворюються катодні ділянки, які можуть охоплювати великі поверхні, а анодні ділянки - малі поверхні. В цьому випадку створюється велика небезпека ґрунтової корозії на ділянках, які стали анодними.

При нерівномірній аерації корозію може викликати не тільки спокійна, але й рухлива рідина. У рухливій воді внаслідок постійного перемішування кисень розчиняється більш рівномірно, ніж в спокійній. Якщо рух рідини не скрізь однаковий, то можуть з'явитися небажані відмінності в концентрації розчиненого кисню. Більше того, різниця в швидкості течії рідини сама по собі, незалежно від концентрації кисню може привести до появи на поверхні металу локальних елементів, що викликають корозію.

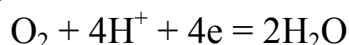
Виникнення локальних мікроелементів внаслідок нерівномірного аерації електроліту, є однією з причин сильної корозії морських суден і портових споруд. Часто це викликає точкову корозію, тобто появу численних розміром з шпилькову голівку дірочок на відносно товстих металевих листах.

Також інтенсивна корозія помічається в місцях перехлестки заклепочних швів і в так званих водяних мішках, в яких накопичилася вода і весь кисень витратився в корозійному процесі. Таким чином, ці менш аеровані ділянки по відношенню до всієї конструкції стають анодами і руйнуються.

Руйнівну дію локальних струмів, виникаючих внаслідок нерівномірної аерації, можна спостерігати, якщо прокласти труби в просоченому маслом ґрунті. При цьому нерідко трапляється, що частина труби, що лежить в забрудненому маслом ґрунті, сильніше кородує, а та, що знаходиться в чистому ґрунті, не піддається корозії в помітній мірі, хоча масло, що не пропускає повітря, повинно було б захищати від корозії. Якщо суцільна масляна плівка покриває всю поверхню, то захисна дія масла проти корозії дійсно спостерігається.

Ті частини металу, доступ кисню до яких мінімальний, кородують значно сильніше тих частин, доступ кисню до яких більше. Такий нерівномірний розподіл корозії пояснюється наступним чином.

При відновленні кисню



використовуються іони  $\text{H}^+$  і розчин дещо підлужується. Метали, і зокрема, залізо при підлужуванні легше переходять в пасивний стан, і швидкість корозії зменшується саме на більш аерованих ділянках. На менш аерованих ділянках металу він не пасивується і легко окиснюється, тобто, кородує.

Теорія корозії при нерівномірній аерації пояснює той факт, що залізо іржавіє переважно на ділянках, покритих вологою іржею; до цих ділянок доступ повітря сильно утруднений, і, отже, їх анодний потенціал стає менше, ніж анодний потенціал інших ділянок поверхні, і вони продовжують розчинятися весь час, поки в систему надходить кисень. Цей же вид деполаризації має місце у випадку металів, частково покритих захисною плівкою, або ж металів, дотичних деякими ділянками своєї поверхні з неметалами. Корозія на дні поглиблень на поверхні металу також пояснюється нерівномірною аерацією.

Неоднорідність окисної плівки, нерівномірна аерація та інші чинники викликають локальну корозію. Утворюються виразки, які можуть розвиватися як у глибину, так і в ширину. Цей вид корозії спостерігається в нейтральних розчинах.

Нерівномірною аерацією Еванс пояснив цілий ряд випадків руйнування металу, причина яких доти була незрозуміла. Так, наприклад, відома низька корозійна стійкість пористого лиття і погано проварених, нещільних зварних швів, в яких є наявні щілини. Це пояснюється тим, що метал в порах і тріщинах має більш електронегативний потенціал, так як менше аерується, ніж прилеглі ділянки поверхні виробу.

Роботою гальванічних елементів нерівномірної аерації пояснюються випадки підземної корозії нефарбованих трубопроводів, паль та інших конструкцій. Так, якщо труба на якійсь ділянці проходить через легкопроникний для повітря ґрунт (наприклад, пісок), а на іншій ділянці через шар, крізь який повітря проникає ускладнено (наприклад, глина), то друга ділянка буде кородувати сильніше, тому що вона є анодом.

Причина утворення корозійного елемента нерівномірної аерації полягає в тому, що потенціал кисневого електрода залежить від концентрації кисню в розчині. З підвищенням концентрації кисню потенціал кисневого електрода стає більш позитивним.

Таким чином, при нерівномірній аерації металу здійснюється просторове розділення окисно-відновної реакції: відновлення кисню протікає на більш аерованих ділянках, а окислення металу - на менш аерованих ділянках поверхні. Локалізація процесу окиснення призводить до місцевої корозії - інтенсивному руйнуванню металу на окремих ділянках. Місцева корозія призводить до появи на поверхні металу заглиблень (виразок), які згодом можуть перетворюватися в наскрізні отвори. Іноді розвиток виразок важко виявити, наприклад, під залишками окалини на поверхні металу. Цей вид корозії особливо небезпечний для обшивки судів, для промислової хімічної апаратури і в ряді інших випадків.

За зменшенням ефективної роботи пари нерівномірної аерації метали розташовуються в ряд:

**цинк, хром, вуглецева сталь, сірий чавун, кадмій, алюміній, мідь, свинець, нержавіюча високохромиста сталь, вісмут, цирконій, тантал, титан.**

З наведеного переліку випливає, що досить перспективний конструкційний матеріал для підземних споруд - це *титан*, який, крім високих механічних властивостей, малої густини, має також хороші корозійні характеристики: високу загальну корозійну стійкість і високу стійкість до іону хлору, а також низьку чутливість до утворення пар диференційної аерації.

Для зменшення корозії обладнання між періодами експлуатації апарати та арматура повинні бути заповнені розчином без доступу повітря або повністю звільнені від розчину і ретельно висушені.

## 8.9. Морська корозія та захист від неї

**Морська корозія** - один з видів електрохімічної корозії. Морська вода - відмінний електроліт. Морська вода добре аерована (близько 8 мг/л кисню), має досить високу електропровідність (може досягати  $3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ ), яка виключає появу омичного гальмування. Середя - нейтральна (рН = 7,2 - 8,6). У морській воді присутні солі кальцію, калію, магнію, сульфати натрію, хлориди. Саме за наявності в морській воді розчинених хлоридів (іонів-активаторів Cl<sup>-</sup>) вода має *депасивуючу дію* по відношенню до металеві поверхні (знищує і запобігає появі пасивних плівок на поверхні металу).

Морській корозії піддаються: металева обшивка днищ суден, підводні трубопроводи, морська авіація, різні металоконструкції, що перебувають у воді,



металеві конструкції в портах, прокатні валки на блюмінгу, які охолоджуються морською водою і т. п.

Найбільш часто вибирають для експлуатації в умовах морської корозії сталь. Для швидкохідних морських суден і морської авіації використовують більш легкі сплави.

### **Особливості процесу морської корозії:**

- висока агресивність середовища (як самої води, так і навколишньої атмосфери);
- великий вплив контактної корозії металів;
- додатковий вплив механічного фактора (ерозія, кавітація);
- протікання біологічної корозії і великий вплив біологічного фактора (обростання днища морського судна мікроорганізмами).

Морська корозія протікає з **кисневою деполаризацією**. Процес проходить за змішаним **дифузійно-кінетичним катодним контролем**. При інтенсивній аерації, швидкому русі морського судна або самої води (течії) може переважати кінетичний контроль. В умовах нерухомої морської води або при наявності на металевій поверхні товстого шару вторинних продуктів корозії переважає **дифузійний катодний контроль**.

В умовах морської корозії захисна плівка (оксидна або шар продуктів корозії) є катодом, а метал в порах, тріщинах та інших дефектах - анодом. При протіканні морської корозії крім рівномірного руйнування додатково утворюються глибокі виразки.

Морська атмосфера менш агресивна, ніж промислова. При протіканні морської атмосферної корозії руйнування носять більш рівномірний характер, ніж корозія в морській воді.

### **Фактори морської корозії металів**

**Солоність води.** Впливає на швидкість протікання морської корозії незначно. Солоність води коливається від 10‰ (Азовське море) до 35,6‰ (Тихий океан). Величина солоності води показує кількість твердих речовин в грамах, розчинених в 1000 г морської води.

**Склад морської води** іноді може відігравати досить значну роль. Наприклад, присутність у воді сірководню полегшує перебіг як катодного, так і анодного процесів корозії. На поверхні металу утворюються важкорозчинні сульфідні, крім того, відбувається підкислення середовища. Іони бромиду, йодиду навіть при дуже малому їх вмісті прискорюють процес морської корозії металів. Деякі сполуки можуть надавати сприятливу дію (вуглекислий кальцій, силікати). Вони утворюють на поверхні металу або сплаву оксидну плівку, що має захисний ефект в морській воді.

**Рух водних мас** впливає на швидкість дифузії кисню. При інтенсивному перемішуванні води (швидкий рух морського судна) процес проходить переважно з кінетичним контролем, а при нерухомих воді - дифузійним.

**Ватерлінія** - зона періодичного змочування водою. Морська корозія поблизу ватерлінії завжди носить посилений характер. Це пов'язано з

полегшеним доступом кисню до поверхні (посиленою аерацією поверхні металу); агресивним впливом бризок (на місці висохлих бризок залишаються кристалики солі, які перешкоджають утворенню захисних плівок), поверхневий шар морської води більше прогрітий сонячними променями і в умовах посиленої аерації йде підсилення корозії металу.

**Зазори і щілини.** Наявність зазорів і щілин в металоконструкції дуже негативно впливає на морську корозію металу. Метал в щілині погано аерирований і грає роль анода, відбувається його посилене розчинення.

**Прокатна окалина на поверхні металу.** Наявність на поверхні металоконструкції ділянок, неочищених від прокатної окалини, в десятки разів може прискорити протікання морської корозії. На поверхні металу виникає гальванопара. У цьому випадку окалина є катодом, а чистий метал - анодом. Проходить анодне розчинення металу. Такий же ефект спостерігається при наявності пофарбованих ділянок (по відношенню до непофарбованих) або при порушенні суцільності лакофарбового покриття.

**Біологічна морська корозія.** Присутність в морській воді різних мікроорганізмів (бактерії, молюски, корали і т. д.) обумовлює проходження біокорозії металу. Внаслідок їх наростання і скупчення на обшивці днищ судів та на інших його частинах, до поверхні металу погано надходить кисень, що підсилює корозію, виникають також різні нерівності, відбувається руйнування поверхні продуктами життєдіяльності мікроорганізмів, посилене корозійне руйнування в щілинах і зазорах.

Іноді обростання металоконструкції мікроорганізмами має і позитивний характер. Утворений шар може гальмувати корозійний процес. Так, наприклад, обростання поверхні сталі мідіями значно гальмує корозію сплаву. Це явище пояснюється значним споживанням мідіями кисню. Крім значного впливу мікроорганізмів на корозійний процес, їх значне скупчення на днищі морського судна може дещо гальмувати його швидкість, при цьому необхідно збільшувати потужність двигунів.

Морський біокорозії найбільш часто піддаються сталі, сплави на нікелевій, алюмінієвій основі, свинець, олово та сплави на їх основі. Магній і цинк морський біокорозії можуть не піддаватися. Найкращим матеріалом для застосування в умовах біокорозії можна вважати мідь. Її іони токсичні і поверхня міді не обростає мікроорганізмами.

**Контактна корозія.** Дуже часто в умовах морської атмосфери спостерігається контактна корозія металів. Частково це обумовлено високою електропровідністю морської води. Переважна більшість металів, перебуваючи в морській воді, стають катодами по відношенню до сталі.

**Електрокорозія.** Електрокорозія виникає у морському середовищі з двох причин: по-перше, під дією блукаючих струмів (особливо в районі порту тощо), по-друге - в результаті неправильних схем електроживлення на судні або інших об'єктах.

**Механічний фактор.** В результаті дії механічного фактору можлива корозійна втома, корозійна ерозія і кавітація.

## Захист від морської корозії

Найбільш поширений метод захисту металевих виробів від морської корозії – **нанесення лакофарбових матеріалів** (ЛФМ). У цих цілях використовуються лакофарбові матеріали на основі бітумів, фенолформальдегідної смоли (фарби АШ), вінілів (етинолеві лакофарбові матеріали), епоксидної смоли, кам'яновугільній основі. Вміст розчинників повинен зводиться до мінімуму або до нуля.

Лакофарбові матеріали мають переваги в тому, що їх досить просто наносити і при введенні до їх складу деяких добавок можна домогтися додаткових захисних ефектів. Введення у фарбу оксиду міді, оксиду ртуті або оловоорганічних сполук робить фарбу **необростаючою**. Оксид міді при вимиванні з покриття утворює важкорозчинні комплекси. Ці речовини токсичні для мікроорганізмів. Необростаючу фарбу наносять тільки на частину металоконструкції, що знаходиться в безпосередньому контакті з водою. При захисті металу від морської корозії поверхню спочатку піддають холодному фосфатуванню, а лише потім наносять товстошарове захисне лакофарбове покриття. Лакофарбові матеріали на вініловій основі самі по собі мають необростаючий ефект.

**Сплави на основі алюмінію** захищають від морської корозії за допомогою оксидування.

Для захисту від морської корозії дуже часто використовують **металеві захисні покриття**. Найпоширеніше - цинкове. Товщина цинкового покриття повинна складати близько 150 - 200 мкм. Його можна використовувати як самостійне захисне покриття, так і в якості основи під фарбування.

Для обшивки днища морського судна може використовуватися **легований лантаном або цинком алюміній**. Алюмінієве покриття має високу стійкість до корозії, його можна застосовувати в комплексі з лакофарбовим покриттям. Крім того, алюмінієві покриття мають підвищену стійкість до ерозії.

Для захисту сталі від морської корозії насамперед її поверхню ретельно очищають від прокатної окалини. Для цього використовують піскоструминне очищення, або полум'я, або хімічне травлення. На оброблену і задалегідь підготовану поверхню наносять лакофарбове або металеве покриття.

Низьке легування сталі незначно збільшує її стійкість у морській воді. Високолеговані хромонікелеві і хромисті сталі в морській воді піддаються місцевої виразкової та щілинної корозії.

Високою стійкістю до морської корозії відрізняється **мідь та її сплави**, особливо **монель-метал**, що складається з 25 - 30% міді, а решта - нікель.

Широке застосування в практиці захисту від морської корозії знайшов **електрохімічний захист** (протекторний або від зовнішнього джерела струму). Такий захист від морської корозії може застосовуватися самостійно або в комплексі з захисними покриттями.

Особливе місце при захисті конструкції від морської корозії займає **раціональне конструювання**. Правильний підбір матеріалів, щоб уникнути контактної корозії, захисних покриттів, рівномірний розподіл по всій

конструкції напруг і т.п. можуть значно продовжити термін служби металоконструкції.

Електрокорозію можна попередити, використовуючи дренавання або застосовуючи спеціальні електросхеми.

Для захисту металоконструкцій від морської біологічної корозії застосовують *лакофарбові матеріали з біоцидними добавками*. Також є дані про використання методу *ультразвукового захисту*. Недоліком методу є велике споживання енергії і поступове руйнування захищеного матеріалу. Суть методу полягає у впливі на поверхню, що захищається, ультразвукових коливань, що мають частоту 23 - 27 кГц.

Для комплексного захисту сталі від морської корозії можна застосовувати ультразвуковий і катодний захист одночасно.

### 8.10. Корозія під дією мандрівних струмів та захист від неї

На відміну від ґрунтової корозії (гальванокорозії) електрохімічна корозія металів під впливом струму від зовнішнього (по відношенню до споруди) джерела називається *електрокорозією*. Для підземних споруд зовнішніми джерелами струму, що викликають їх корозію, є мандрівні струми. *Мандрівними* називаються електричні струми в землі, що виникають за рахунок витоків з рейок електрифікованих залізниць, трамваїв та метро, що працюють на постійному струмі і використовують рейки в якості зворотного дроту. Джерелами мандрівних струмів можуть бути також різні установки постійного струму (телеграф, електрозварювальні апарати, системи катодного захисту тощо), які використовують в якості зворотного дроту землю. Відомо, що електрична провідність металів в сотні мільйонів разів більше провідності ґрунтів. Тому будь-яка підземна металева магістраль, перебуваючи в зоні поширення мандрівних струмів, повертає до себе ці струми, передає їх як провідник більш низького омичного опору і повертає їх через землю до джерела постійного струму.

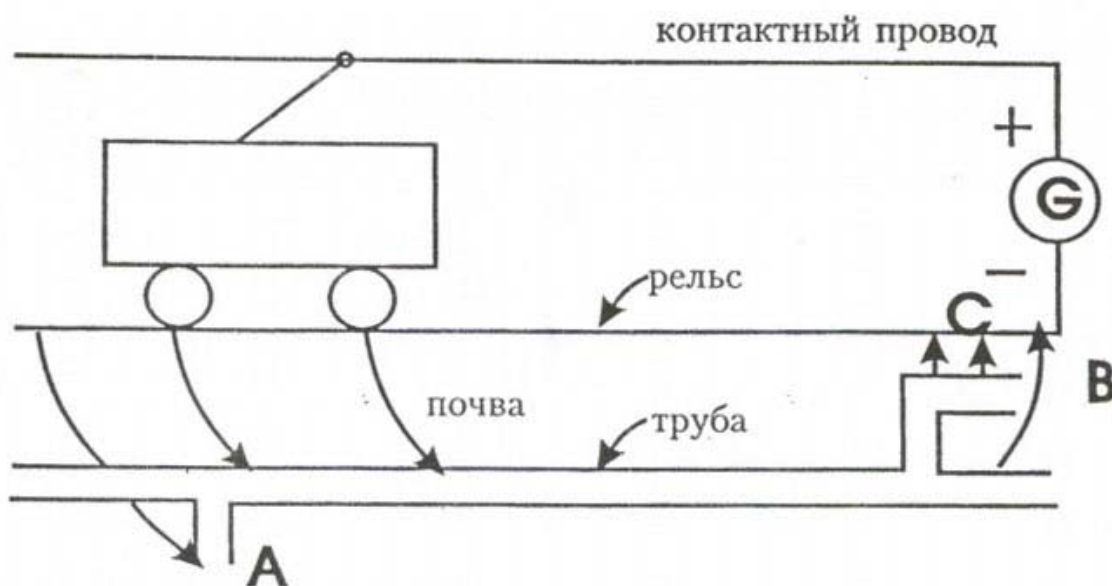
При цьому *та частина металевої споруди, з якої струм виходить в землю, є анодом, а та частина споруди, де постійний струм входить у нього, є катодом* (рис. 24). В анодних зонах за умови контакту споруди з вологим ґрунтом мандрівні струми викликають електроліз і завдають споруді надзвичайно великі корозійні руйнування. Мандрівний струм до 1 А за один рік роз'їдає в анодній зоні металічної споруди близько 36 кг свинцю або, відповідно, близько 9 кг заліза, або близько 4 кг алюмінію (кожні 96500 кулонів кількості електрики розчиняють 1 г/екв металу).

Неважко уявити результати корозійної дії мандрівних струмів, якщо останні в деяких спорудах, розташованих поблизу джерел мандрівного струму, досягають 40 і навіть більше ампер. Найбільший збиток корозія мандрівними струмами приносить підземним спорудам в системі міського господарства. При цьому сильній корозії піддаються незахищені ізолюючими покриттями споруди: трубопроводи, голі освинцьовані та броньовані кабелі. Особливо

небезпечним джерелом мандрівних струмів є електрифіковані залізниці, а також трамвай та метро, де споживаються великі струми.

Електрохімічна корозія підземних споруд мандрівними струмами у багато разів небезпечніше звичайної ґрунтової корозії. В окремих випадках великі мандрівні струми здатні вивести споруди з ладу протягом найкоротшого терміну - в 2-3 місяці.

Швидкість та інтенсивність корозії мандрівними струмами спільно з ґрунтової корозією особливо сильно зростає за наявності частих і різких перепадів значень електричного опору ґрунтів вздовж лінійної споруди. Пояснюється це тим, що в цих умовах мандрівні і гальванічні струми то входять у споруду і проходять по ній, то виходять із споруди і проходять у ґрунті, створюючи тим самим безліч анодних і катодних зон. Встановлено, що в ґрунтах з високим опором мандрівні струми більш або менш повно збираються металевою спорудою і протікають по ньому. На ділянках, де ґрунт має низький опір, ці струми залишають споруду і частково переходять у ґрунт. Місця найбільш сильних витоків струму з споруди, що збігаються з ділянками низького опору ґрунту, характеризуються найбільш інтенсивними явищами корозії. Шкідливе явище корозії мандрівними струмами не обмежується тільки утворенням анодних ділянок. Під впливом катодного потенціалу захисна ізоляція на катодній ділянці з часом набуває здатність вбирати ґрунтову вологу. У зв'язку з цим спочатку відбувається зниження омичного опору захисного покриття, а потім і його повне руйнування з оголенням поверхні металу.



**Рис. 24.** Корозія під дією мандрівних струмів. Ділянка А – анодна ділянка труби, ділянка В – катодна ділянка труби.

### Захист від корозії мандрівними струмами

Для зменшення струмів витоку з рейкової мережі в землю необхідні хороша поздовжня провідність рейкової мережі (утримання в зразковому стані стикових межрельсових і обхідних з'єднувачів) і високий перехідний опір між рейковим шляхом і землею (наявність щебеневого, гравійного або іншого

баласту, зазору між баластом і подошвою рейки). Щоб зменшити вплив блукаючих струмів, прагнуть видалити траси для прокладання підземної споруди від джерел мандрівних струмів, скоротити число перетинів з рейковими шляхами електрифікованого транспорту, збільшити перехідний опір між спорудою і землею і опір самої споруди. Підземні споруди прагнуть прокласти по трасах з мінімальною корозійною активністю, використовують прокладку в неметалічних трубах, блоках, каналах, тунелях, колекторах і т. п. Однак відповідальним і ефективним елементом всієї системи протикорозійного захисту є нанесення ізолюючих покриттів. Широке поширення отримали кам'яновугільні смоли і бітумні покриття, покриття на основі поліетилену, полівінілхлориду, поліпропілену, епоксидної смоли та інших полімерів.

Суцільність покриття часто порушується в період будівництва підземних металевих споруд і в умовах їх експлуатації. Утворені місця оголень металу захищають катодною поляризацією - створенням на металі захисного потенціалу по відношенню до навколишнього. При захисті від ґрунтової корозії створюваний мінімальний захисний потенціал повинен бути не менше: для сталі та алюмінію 0,85 В у будь-якому середовищі, для свинцю 0,5 В у кислому середовищі, 0,72 В у лужному середовищі (по відношенню до мідно-сульфатного електрода порівняння). Такі ж середні значення поляризаційних потенціалів повинні бути витримані при захисті від корозії мандрівними струмами.

При захисті від корозії мандрівними струмами використовують електричні дренажі (прямі, поляризовані і посилені). При прямому дренажі з'єднують рейки із спорудою, що захищається, через деякий обмежувач опір. При цьому рейки мають стабільний негативний потенціал по відношенню до споруди. Струм зі споруди стікає безпосередньо на рейки. Поляризовані дренажі мають односторонню провідність (від споруди до рейок), яка забезпечується включенням в ланцюг вентилів (вентильний дренаж) або поляризованого реле (електромагнітний дренаж). Посилений дренаж являє собою установку катодного захисту, в якій замість заземлювача використовують рейковий ланцюг електрифікованої дороги.

### **Контрольні питання до теми 8**

1. Як можна захистити металеві вироби при їх зберіганні і транспортуванні?
2. Чому необхідно захищати від корозії вироби з низьковуглецевої сталі?
3. Який спосіб захисту оптимальний при захисті сталі від атмосферної корозії, ґрунтової або морської?
4. Які переваги і недоліки легування металів як методу захисту металу від корозії?
5. Як класифікують захисні покриття?
6. Перерахуйте переваги і недоліки способів нанесення металевих покриттів.
7. Наведіть характеристику неметалічних покриттів.
8. Які основні прийоми обробки корозійного середовища?
9. Які заходи застосовуються для боротьби з корозією в кислотах?

10. Які Ви знаєте уповільнювачі атмосферної корозії?
11. В чому полягає катодний протекторний захист від корозії?
12. В чому полягає катодний захист зовнішнім струмом?
13. Які вимоги висуваються до раціонального конструювання деталей для запобігання корозійним процесам?
14. Як можна захистити підземну конструкцію від корозії блукаючими струмами?
15. Опишіть метод захисту металів зміною середовища. У яких випадках це можливо?
16. Що таке протекторний захист? Коли доцільно його застосовувати?
17. Які переваги катодного захисту?

### **Підсумкові тестові питання**

**1. Яка властивість сплавів відноситься до структурно-чутливих властивостей?**

густина	температура плавлення
міцність	модуль пружності

**2. Яка властивість сплавів відноситься до структурно-нечутливих властивостей?**

модуль пружності	пластичність
корозійна стійкість	міцність

**3. Багатокомпонентні конденсовані системи з різних металів або металів з неметалами, що мають характерні для металів властивості, це:**

сплави	механічні суміші
індивідуальні сполуки	прості речовини

**4. Яка властивість не характерна для сплавів:**

металічний блиск  
 низька теплопровідність  
 висока електропровідність  
 висока міцність

**5. Що не відноситься до сплавів:**

мішметал	амальгама
сталь	пірит

**6. Що не відноситься до корозійного процесу:**

руйнування металів в гальванічних елементах  
 руйнування металічних деталей хімічного обладнання розчинами електролітів  
 окислення металів при нагріванні  
 руйнування трубопроводів під землею

**7. Дифузійне насичення одного компонента сплаву іншим – це:**

метод одержання сплавів	метод захисту від корозії
метод розчинення сплавів	метод очистки сплавів

**8. До якої групи сплавів належать бабіти:**

жароміцні	легкі
антифрикційні	надлегкі

**9. Які головні компоненти входять в латуні:**

цинк та нікель                                  мідь та цинк  
мідь та нікель                                  мідь та алюміній

**10. Які сплави не належать до легких:**

магнієві сплави                                  дуралюміні  
танталові сплави                                  титанові сплави

**11. Які сплави не застосовують в літакобудуванні:**

ніобієві сплави                                  силуміни  
нікелеві сплави                                  дуралюміні

**12. Який сплав має ефект пам'яті після пластичного деформування:**

віталіум    сплав Вуда  
нітінол    латунь

**13. Який сплав не належить до мідних:**

мельхіор    константан  
кремнієва бронза                                  фехраль

**14. Що не притаманне ніобієвим сплавам:**

жароміцність                                      пластичність  
висока вартість                                    стійкість до атмосферної корозії при нагріванні

**15. Який сплав характеризується малим температурним коефіцієнтом електричного опору:**

константан    хромель  
силуміни    амальгами

**16. Що не характерне для кобальтових сплавів:**

висока жароміцність                                  висока жаростійкість  
магнітні властивості                                  низька вартість

**17. Що не характерне для вольфрамів:**

висока жароміцність на повітрі  
крихкість на повітрі вище 600<sup>0</sup>С  
поглинають іонізуюче випромінювання  
висока вартість

**18. Які бронзи застосовують для виготовлення мембран і пружин в приладобудуванні:**

алюмінієві    олов'яні  
берилієві    кремнієві

**19. Які бронзи застосовують для виготовлення монет:**

алюмінієві    олов'яні  
берилієві    кремнієві

**20. Які бронзи стійкі до газової корозії:**

алюмінієві    олов'яні  
берилієві    кремнієві

**21. Які бронзи стійкі до корозії в морській воді:**

алюмінієві    олов'яні  
берилієві    кремнієві

**22. Який метал є компонентом сплаву нельзерберу, застосовуваному для виготовлення медичних інструментів:**



нікель титан  
залізо кобальт

**23. Який метал не застосовується для нанесення як захисного покриття від атмосферної корозії:**

цинк магній  
нікель хром

**24. Яка властивість не характерна для магнієвих сплавів:**

легкість  
висока питома міцність  
низька жароміцність  
нестійкість до удару і вібрації

**25. Що не характерне для адміралтейської латуні:**

стійкість в морській воді  
стійкість в кислотах-неокисниках  
основні компоненти сплаву – мідь, цинк, олово  
основні компоненти сплаву – мідь, цинк, нікель

**26. Що не характерне для дуралюмінів:**

схильні до міжкристалітної корозії  
найменша корозійна стійкість з усіх алюмінієвих сплавів  
погано зварюються  
схильні до корозійного розтріскування

**27. Здатність металів чинити опір агресивним газам за високих температур – це:**

жаростійкість жароміцність  
стійкість до електрохімічної корозії стійкість до корозії в  
неелектролітах

**28. Здатність металів зберігати за високих температур високі механічні властивості – це:**

жаростійкість жароміцність  
твердість стійкість до електрохімічної корозії

**29. Що визначає наповнювач в композиційному матеріалі:**

монолітність матеріалу  
стійкість до корозії  
передачу напруги в наповнювачі  
міцність матеріалу

**30. Що визначає матриця в композиційному матеріалі:**

міцність матеріалу жорсткість матеріалу  
стійкість до корозії деформованість матеріалу

**31. Сплави і традиційні матеріали в порівнянні з композиційними матеріалами мають:**

меншу масу вищу корозійну стійкість  
кращі механічні характеристики нижчу корозійну стійкість

**32. Композити, зміцнені частинками, характеризуються:**

розмірами частинок більше 1мкм, їх вміст складає 20-25 %

розмірами частинок 0,01-0,1 мкм, їх вміст складає 1-15 %  
розмірами частинок 10-100 нм  
розмірами частинок 1-2 мм

**33. Дисперснопідсилені композити характеризуються:**

розмірами частинок більше 1 мкм, їх вміст складає 20-25 %  
розмірами частинок 0,01-0,1 мкм, їх вміст складає 1-15 %  
розмірами частинок 10-100 нм  
розмірами частинок 1-2 мм

**34. Нанокompозити характеризуються:**

розмірами частинок більше 1 мкм, їх вміст складає 20-25 %  
розмірами частинок 0,01-0,1 мкм, їх вміст складає 1-15 %  
розмірами частинок 10-100 нм  
розмірами частинок 1-2 мм

**35. Анізотропію властивостей мають композити:**

волокнисті	нанокompозити
зміцнені частинками	дисперснопідсилені

**36. Полімерні композиційні матеріали у якості матриці мають:**

скло	полімери
вуглецеві волокна	органічні синтетичні волокна

**37. Боропластики застосовуються:**

в космічній та авіаційній техніці  
в будівництві  
радіоелектроніці  
для виробництва побутових предметів

**38. Які полімерні композити мають високу вартість, що обмежує їх широке застосування:**

склопластики	боропластики
вуглепластики	органопластики

**39. Які полімери не відносяться до полімерних композитів:**

кермети	вуглеграфітові матеріали
текстоліти	органопластики

**40. Які полімери відносяться до композитів на основі кераміки:**

кермети	вуглеграфітові матеріали
текстоліти	органопластики

**41. Які полімери відносяться до композитів з металевою матрицею:**

вуглеграфітові матеріали	кермети
текстоліти	матеріали, армовані ниткоподібними монокристаллами

**42. Кермети – це композиційні матеріали, що містять:**

матрицю – кераміку, наповнювач – дисперсні металеві частинки  
матрицю – полімер, наповнювач – дисперсні металеві частинки  
матрицю – метал, наповнювач – металеві волокна  
матрицю – кераміку, наповнювач – штучні та природні волокна

**43. Органопластики – це композиційні матеріали, що містять:**

матрицю – кераміку, наповнювач – дисперсні металеві частинки  
матрицю – полімер, наповнювач – дисперсні металеві частинки  
матрицю – кераміку, наповнювач – дисперсні металеві частинки  
матрицю – полімер, наповнювач – синтетичні органічні та природні волокна

**44.Текстоліти –це композиційні матеріали, що містять:**

матрицю – кераміку, наповнювач – дисперсні металеві частинки  
матрицю – полімер, наповнювач – дисперсні металеві частинки  
матрицю – полімер, наповнювач – тканини з різних волокон  
матрицю – полімер, наповнювач – вуглецеві волокна

**45.Корозія - є процесом:**

гомогенним	несамовільним
гетерогенним	одностадійним

**46.Поділ корозійних процесів на хімічну корозію та електрохімічну корозію здійснюється:**

за механізмом корозійного процесу  
за умовами протікання корозії  
за характером корозійного руйнування  
за іншою ознакою

**47.Які типи корозії розрізняють за характером корозійного руйнування:**

пітінг, міжкристалітна, виразкова  
хімічна, електрохімічна  
газова, атмосферна, ґрунтова  
корозія в неелектролітах, корозія під зовнішнім струмом

**48.Які типи корозії розрізняють за умовами протікання корозійного процесу:**

пітінг, міжкристалітна, виразкова  
хімічна, електрохімічна  
газова, атмосферна, ґрунтова  
селективна, місцева, підповерхнева

**49.Який процес не відноситься до хімічної корозії металів:**

дія на метали сухих газів  
дія на метали бензину  
дія на метали кислот  
дія на метали нафти

**50.Яка ознака не притаманна газовій корозії:**

окислення металу і відновлення корозійного середовища – одноактний процес  
газова корозія – гетерогенний процес  
газова корозія – гомогенний процес  
швидкість процесу залежить від парціального тиску агресивного газу

**51.Який випадок не відноситься до газової корозії:**

корозія металічної арматури печей  
корозія двигунів внутрішнього згорання  
корозія газових турбін

корозія металічних деталей мостів на повітрі

**52. Газова корозія можлива, коли:**

парціальний тиск кисню, що відповідає вихідному стану системи, більше тиску дисоціації оксиду металу

парціальний тиск кисню, що відповідає вихідному стану системи, менше тиску дисоціації оксиду металу

парціальний тиск кисню, що відповідає вихідному стану системи, дорівнює тиску дисоціації оксиду металу

термодинамічна можливість газової корозії залежить від інших факторів

**53. Що не належить до способів захисту металів від газової корозії:**

жаростійке легування

електрохімічний захист

захисні покриття

застосування захисних або контрольованих

атмосфер

**54. Яка вимога до жаростійких емалей записана невірно:**

максимальна кількість оксидів Хрому, Алюмінію, Титану, Силіцію

мінімальна кількість оксидів Плюмбуму, Кальцію, Натрію

твердість за робочих температур

низька адгезія до металу

**55. Яке твердження в теорії жаростійкого легування записане невірно:**

розмір іонів легуючого компонента менше розміру іонів основного компонента  
оксид легуючого компонента підлягає умові суцільності плівки

легуючий компонент має оксид високого омичного опору

легуючий компонент має більшу спорідненість до кисню, ніж основний компонент

**56. Який закон росту плівок на металах виражає формула**

$$k_1 \Delta m^2 + k_2 \Delta m = k_1 k_2 \tau:$$

лінійний

параболічний

квадратичний

логіфічний

**57. Який закон росту плівок на металах виражає формула  $\Delta m^n = k_2 \tau$  :**

лінійний

параболічний

квадратичний

логіфічний

**58. Ріст пористої (незахисної) плівки описується законом:**

лінійним

параболічним

квадратичним

логіфічним

**59. Найкраще захищає від корозії плівка, яка росте за законом:**

лінійним

параболічним

квадратичним

логіфічним

**60. При параболічному законі росту плівок має місце контроль швидкості корозії:**

дифузійний

кінетичний

дифузійно-кінетичний

контроль переносу в тонких плівках

**61. При квадратичному законі росту плівок має місце контроль швидкості корозії:**

дифузійний

кінетичний

дифузійно-кінетичний

контроль переносу в тонких плівках

**62. Товщина видимих плівок складає:**

до 40 нм

40-500 нм

більше 500 нм

більше 200 нм

**63. Плівка несучільна, якщо:**

$$V_{\text{окси́ду}}/V_{\text{металу}} < 1$$

$$V_{\text{окси́ду}}/V_{\text{металу}} > 1$$

$$V_{\text{окси́ду}}/V_{\text{металу}} = 1$$

$$1 < V_{\text{окси́ду}}/V_{\text{металу}} < 2,5$$

**64. Який фактор не впливає на утворення напруг в оксидних плівках та їх руйнування?**

зміна температури

механічні напруги при роботі деталі (удари)

збільшення об'єму плівки при її рості

рівна гладка поверхня металу

**65. Утворення бульбашок з плівки при її руйнації є наслідком:**

висока міцність на розрив плівки, низька адгезія плівки до металу

низька міцність на розрив плівки, низька адгезія плівки до металу

низька міцність на розрив плівки, висока адгезія плівки до металу

висока міцність на розрив плівки, висока адгезія плівки до металу

**66. Тип руйнації плівки - розтріскування плівки при зсуві є наслідком:**

висока міцність на розрив плівки, низька адгезія плівки до металу

низька міцність на розрив плівки, низька адгезія плівки до металу

низька міцність на розрив плівки, висока адгезія плівки до металу

висока міцність на розрив плівки, висока адгезія плівки до металу

**67. Як впливає температура на швидкість корозії?**

при підвищенні  $t$  швидкість корозії збільшується, а її термодинамічна можливість зменшується

при зниженні  $t$  швидкість корозії збільшується, а її термодинамічна можливість зменшується

при підвищенні  $t$  швидкість корозії збільшується, і її термодинамічна можливість збільшується

при підвищенні  $t$  швидкість корозії збільшується, а її термодинамічна можливість не змінюється

**68. Яка ознака не притаманна електрохімічній корозії?**

це – самовільний процес

це – одноактний процес

це – гетерогенний процес

корозійне середовище - електроліт

**69. Який випадок корозії не належить до електрохімічної?**

іржавіння металів в атмосфері

іржавіння металічних труб в ґрунті

корозія металів в розплавах солей

корозія двигунів внутрішнього згорання

**70. Який процес не супроводжується утворенням подвійного електричного шару?**

перехід катіонів з однієї фази в іншу

вибіркова адсорбція на поверхні металу іонів та полярних молекул з рідкої фази

одночасний перехід катіонів і вибіркова адсорбція іонів та молекул

адгезія оксидної плівки до металу

**71. Зворотній електродний потенціал металу встановлюється, коли:**

метал знаходиться в рівновазі зі своїми іонами

метал не знаходиться в рівновазі зі своїми іонами

в процесі обміну приймають участь інші іони і атоми

анодний процес здійснюється іонами металу, а катодний – іншими іонами

**72. Стаціонарний потенціал металу це:**

стійке в часі значення незворотнього потенціалу

зворотній потенціал

потенціал, розрахований за рівнянням Нернста

потенціал, визначений експериментально

**73. Самовільне протікання електрохімічної корозії можливо, коли:**

$(E_{\text{анодний}})_{\text{зворотн.}} > (E_{\text{катодний}})_{\text{зворотн.}}$

$(E_{\text{анодний}})_{\text{зворотн.}} < (E_{\text{катодний}})_{\text{зворотн.}}$

$(E_{\text{анодний}})_{\text{зворотн.}} = (E_{\text{катодний}})_{\text{зворотн.}}$

$(E_{\text{анодний}})_{\text{зворотн.}} \neq (E_{\text{катодний}})_{\text{зворотн.}}$

**74. В корозійному гальванічному елементі, утвореному внаслідок неоднорідності металічної фази, метал з меншим потенціалом виступає:**

анодом

катодом

анодом або катодом в залежності від складу корозійного середовища

розподіл на анод і катод не залежить від потенціалів металів

**75. В корозійному гальванічному елементі, утвореному внаслідок нерівномірного розподілу по металу вторинних продуктів корозії, ділянки під вторинними продуктами виступають:**

анодом

катодом

анодом або катодом в залежності від складу корозійного середовища

розподіл на анод і катод не залежить від наявності вторинних продуктів

**76. В корозійному гальванічному елементі, утвореному внаслідок нерівномірності внутрішніх напруг в металі, менш деформовані ділянки виступають:**

анодом

катодом

анодом або катодом в залежності від складу корозійного середовища

розподіл на анод і катод не залежить від деформацій

**77. В корозійному гальванічному елементі, утвореному внаслідок різниці в рН електроліту, ділянки металу, що стикаються з з більш низькими рН, виступають:**

анодом

катодом

анодом або катодом в залежності від складу корозійного середовища

розподіл на анод і катод не залежить від рН

**78. В корозійному гальванічному елементі, утвореному внаслідок різних температур корозійного середовища, більш нагріті ділянки металу виступають:**

анодом

катодом

анодом або катодом в залежності від складу корозійного середовища

розподіл на анод і катод не залежить від температури корозійного середовища

**79. В корозійному гальванічному елементі, утвореному внаслідок нерівномірного опромінення металу, більш опромінені ділянки металу виступають:**

анодом

катодом

анодом або катодом в залежності від складу корозійного середовища

розподіл на анод і катод не залежить від інтенсивності опромінення

**80. Який показник швидкості корозії розраховують за формулою**

$$X = (g_0 - g_1) / (S\tau)?$$

глибинний

об'ємний

струмовий

негативний ваговий

**81. Який показник швидкості корозії розраховують за формулою**

$$X = (g_2 - g_0) / (S\tau)?$$

негативний ваговий

об'ємний

позитивний ваговий

глибинний

**82. Який показник швидкості корозії розраховують за формулою**

$$X = V_0 / (S\tau)?$$

глибинний

негативний ваговий

об'ємний

струмовий

**83. Який показник швидкості корозії розраховують за формулою**

$$X = (8,760(g_0 - g_1)) / (S\tau\rho)$$

глибинний

об'ємний

струмовий

негативний ваговий

**84. Який показник швидкості корозії розраховують за формулою:**

$$X = (\omega^- nF) / (10000A)$$

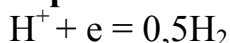
глибинний

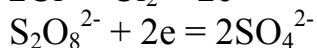
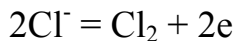
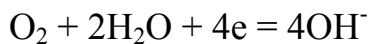
об'ємний

струмовий

негативний ваговий

**85. Який процес не належить до катодного при електрохімічній корозії?**





**86. При поляризації електродних процесів:**

потенціал катоду стає негативнішим  
потенціал аноду стає негативнішим  
потенціали катоду і аноду не змінюються  
потенціал катоду стає позитивнішим

**87. При поляризації електродних процесів:**

потенціал аноду стає негативнішим  
потенціал катоду стає позитивнішим  
потенціали катоду і аноду не змінюються  
потенціал аноду стає позитивнішим

**88. Вторинні продукти корозії утворюються внаслідок:**

взаємодії первинних продуктів між собою  
анодного розчинення металу  
катодної асиміляції електронів  
утворення оксидної плівки

**89. Що не є причиною анодної поляризації:**

уповільненість анодної реакції корозії металу  
уповільненість дифузії іонів металу з поверхні в об'єм  
утворення захисних оксидних плівок з часом  
анодна активність з часом

**90. Який процес не належить до корозійного процесу з кисневою деполяризацією?**

корозія обшивки річкових суден	корозія трубопроводів
ржавіння металів в атмосфері	корозія металів в кислотах

**91. При електрохімічній корозії сильна аерація металу:**

прискорює корозію  
уповільнює корозію  
не впливає на швидкість корозії  
практично не впливає на швидкість корозії

**92. В якому випадку не має місце дифузійний контроль (уповільненість дифузії кисню) корозійного процесу з кисневою деполяризацією?**

в спокійних електролітах  
за наявності плівки вторинних продуктів корозії  
при підземній корозії  
при сильному перемішуванні електроліта

**93. Який процес не належить до корозійного з водневою деполяризацією?**

корозія свинцю та олова в лужних розчинах



корозія магнію в воді та натрій хлориді  
корозія цинку, заліза в розчинах хлоридної та сульфатної кислот  
корозія заліза у вологому повітрі

**94.Що не є особливістю корозійного процесу з водневою деполяризацією?**

залежність від рН  
залежність від катодних домішок  
протікання з уповільненням  
протікання з прискоренням

**95.Який захід не призводить до захисту металу від електрохімічної корозії?**

зменшення анодної активності сплава  
зменшення катодної активності сплава  
ввод в метал компонентів, що легко пасивуються  
зниження термодинамічної стійкості анодної фази

**96.Який захід по обробці корозійного середовища не застосовується для захисту металу від електрохімічної корозії?**

зменшення вмісту деполяризатора  
деаерація води  
введення уповільнювачів корозії  
застосування захисних атмосфер

**97.Яка речовина не є уповільнювачем корозії у воді?**

натрій нітрит  
калій хромат і біхромат  
естери карбонових кислот  
фосфати і поліфосфати

**98.Який процес призводить до утворення захисної хімічної сполуки з металом?**

хромування                      алітування  
лудження                        фосфатування

**99.За формулою  $X = 100(I_2 - I_{a2})/I_2$  розраховується:**

ефективність катодного захисту  
коефіцієнт корисної дії матеріалу протектора  
коефіцієнт гальвування корозії інгібітором  
ступінь захисту від корозії інгібітором

**100.За формулою  $X = 100\Delta m_{\text{теор.}} / \Delta m_{\text{практ.}}$  розраховується:**

ефективність катодного захисту  
коефіцієнт корисної дії матеріалу протектора  
коефіцієнт гальвування корозії інгібітором  
ступінь захисту від корозії інгібітором

## ДОДАТКИ

**Таблиця 1. Хімічна стійкість та застосовуваність еластомерів в різних середовищах**

Таблиця оцінює та порівнює сумісність еластомерів з конкретними середовищами. Може бути використана тільки в якості загального керівництва. Еластомер, вказаний в таблиці як сумісний з середовищем, може руйнуватися в певній частині загального температурного діапазона застосовуваності даного еластомера.

- A+ - найкращий вибір;
- A - можна застосовувати;
- B - частково застосовувано, застосовувати з обережністю;
- C - не рекомендується;
- – - нема даних

СЕРЕДОВИЩА	ЕЛАСТОМЕРЫ											
	АСМ, ANM, поліакрил	AU, EU, поліуретан	CO, ECO, епіхлоргідин	CR, хлоропрен, Neoprene	EPDM, етиленпропиленовый каучук	FKM, фторкаучук, Viton	FFK M, перфторкаучук	IR бутил	VMQ силікон	NBR, нітрил, Buna N	NR, натур. гума	PTFE, ПТФЕ політетрафторетилен, Ф-4
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ацетатна к-та	C	C	C	C	A+	C	A+	A	A	B	B	C
Ацетон	C	C	C	C	A	C	A	A	C	C	C	C
Повітря, н.у.	A	A	-	A	A	A	A	A	A	A	B	A
Повітря гаряче (93 °C)	B	B	-	C	A	A	A	A	A	A	B	A
Повітря гаряче (204 °C)	C	C	-	C	C	A	A	C	A	C	C	A
Етанол	C	C	-	A	A	C	A	A	A	A	A	A
Метанол	C	C	B	A+	A	C	A	A	A	A	A	A
Аміак рідкий	C	C	-	A+	A	C	A	A	B	B	C	A
Аміак (г) гаряч	C	C	-	B	B	C	A	B	A	C	C	A+
Пиво	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Бензол	C	C	C	C	C	A	A	C	C	C	C	C
Димові	C	C	-	C	C	A+	A	C	A	C	C	A

гази												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Хлорид кальцію	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Бута-диєн газ	C	C	C	C	C	A+	A	C	C	C	C	-
Бутан газ	A	C	A	A	C	A	A	C	C	A+	C	B
Бутан рідкий	A	C	A	B	C	A	A	C	C	A	C	C
Тетра-хлорид карбону	C	C	B	C	C	A+	A	C	C	C	C	C
Хлор сухий	C	C	B	C	C	A+	A	C	C	C	C	C
Хлор вологий	C	C	B	C	C	A+	A	C	C	C	C	B
Коксовий газ	C	C	-	C	C	A+	A	C	B	C	C	A
Етил-ацетат	C	C	C	C	B	C	A	B	B	C	C	C
Етилен-глицоль	C	B	A	A	A+	A	A	A	A	A	A	A
Фреон 11	A	C	-	C	C	B	B	C	C	B	C	C
Фреон 12	B	A	A	A+	B	B	B	B	C	A	B	C
Фреон 22	B	C	A	A+	A	C	A	A	C	C	A	C
Фреон 114	-	A	A	A	A	A	B	A	C	A	A	C
Бензин	C	B	A	C	C	A	A	C	C	A+	C	C
Водень, газ	B	A	-	A	A	A	A	A	C	A	B	A
Сірково день сухий	C	B	B	A	A+	C	A	A	C	A	A	A
Сірково день вологий	C	C	B	A	A+	C	A	A	C	C	C	A
Керосин авіаційн.	B	B	A	C	C	A	A	C	C	A	C	B

Метилен хлорид	C	C	-	C	C	B	A+	C	C	C	C	B
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
Молоко	C	C	-	A	A	A	A	A	A	A+	A	A
Нафта-лін	-	B	-	C	C	A+	A	C	C	C	C	B
Природ-ний газ	B	B	A	A	C	A	A	C	C	A+	B	A
Природ. газ +H <sub>2</sub> S	C	B	A	A+	C	C	A	C	C	B	C	A
Природн ый газ + H <sub>2</sub> S + аміак	C	C	-	B	C	C	A	C	C	B	C	A+
Азотна к-та (10%)	C	C	C	C	B	A+	A	A	C	C	C	A
Азотная к-та (50-100%)	C	C	C	C	C	A+	A	A	C	C	C	B
Пари азотної к-ти	C	C	C	B	B	A	A	B	C	C	C	A
Азот	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Нафта	B	C	A	B	C	A	A	C	C	A+	C	A
Озон	B	A	A	B	A	A	A	B	A	C	C	A
Паперов пульпа	-	C	-	B	B	A	A	B	C	B	C	-
Пропан	A	B	A	A	C	A	A	C	C	A+	C	A
Вода морська	C	B	-	B	A	A	A	A	A	A	B	A
Вода морська + H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	C	B	-	B	B	A	A	B	C	C	C	A
Миль-ний розчин	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A
Водяна пара	C	C	C	C	B	C	A	B	C	C	C	A+
SO <sub>2</sub> сухий	C	-	-	C	A+	-	-	B	B	C	B	-
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (до 50%)	B	C	B	C	B	A+	A	C	C	C	C	A

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 50-100%	C	C	C	C	C	A+	A	C	C	C	C	A
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
Вода, н.у.	C	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Вода, 93 °C	C	C	B	C	A+	B	A	B	A	C	A	-
Вода, 149 °C	C	C	-	C	B	C	A	B	C	C	C	-
Вода де- іонізов.	C	A	-	A	A	A	A	A	A	A	A	A

**Таблиця 2. рН побутових речовин, матеріалів та продуктів**

<b>Вещество</b>	<b>рН</b>
Електроліт в свинцевих акумуляторах	<1,0
Шлунковий сік	1,0—2,0
Лимонний сік	2,5±0,5
Лимонад Кола	2,5
Оцет	2,9
Яблучний сік	3,5±1,0
Пиво	4,5
Кава	5,0
Модний шампунь	5,5
Чай	5,5
Кислотний дощ	< 5,6
Шкіра здорової людини	~6,5
Слина	6,35—6,85
Молоко	6,6-6,9
Чиста вода	7,0
Кров	7,36—7,44
Морська вода	8,0
Мило (жирове) для рук	9,0—10,0
Нашатирний спирт	11,5
Відбілювач (хлорний)	12,5

## Електрохімічний ряд напруг металів

Li, Rb, K, Ba, Sr, Ca, Mg, Al, Mn, Zn, Cr, Fe, Cd, Co, Ni, Sn, Pb,  
H, Sb, Bi, Cu, Hg, Ag, Pd, Pt, Au

←  
посилення відновних властивостей

Таблиця 3 Стандартні електродні потенціали деяких окисно-відновних систем

Окиснена форма	Відновлена форма	Схема реакції	$E^0$ , В
$V^{2+}$	$V_{(тв.)}$	$V^{2+} + 2\bar{e} = V$	- 1,17
$WO_4^{2-}$	$W_{(тв.)}$	$WO_4^{2-} + 6\bar{e} + 4H_2O = W + 8OH^-$	- 1,10
$SO_4^{2-}$	$SO_3^{2-}$	$SO_4^{2-} + 2\bar{e} + H_2O = SO_3^{2-} + 2OH^-$	- 0,93
$SO_3^{2-}$	$S_{(тв.)}$	$SO_3^{2-} + 4\bar{e} + 3H_2O = S + 6OH^-$	- 0,90
$NO_3^-$	$NO_2_{(газ)}$	$NO_3^- + \bar{e} + H_2O = NO_2 + 2OH^-$	- 0,85
$N_2$	$NH_4OH$	$N_2 + 6\bar{e} + 8H_2O = NH_4OH + 6OH^-$	- 0,74
$AsO_4^{3-}$	$AsO_2^-$	$AsO_4^{3-} + 2\bar{e} + 2H_2O = AsO_2^- + 4OH^-$	- 0,67
$2SO_3^{2-}$	$S_2O_3^{2-}$	$2SO_3^{2-} + 4\bar{e} + 3H_2O = S_2O_3^{2-} + 6OH^-$	- 0,58
$Fe(OH)_3$	$Fe(OH)_2$	$Fe(OH)_3 + \bar{e} = Fe(OH)_2 + OH^-$	- 0,56
$H_3PO_4$	$P_{(тв.)}$	$H_3PO_4 + 5\bar{e} + 3H^+ = P + 4H_2O$	- 0,41
$V^{3+}$	$V^{2+}$	$V^{3+} + \bar{e} = V^{2+}$	- 0,26
$NO_2^-$	$NH_4OH$	$NO_2^- + 6\bar{e} + 6H_2O = NH_4OH + 7OH^-$	- 0,15
$NO_3^-$	$NO_{(газ)}$	$NO_3^- + 3\bar{e} + 2H_2O = NO + 4OH^-$	- 0,14
$NO_3^-$	$NO_2^-$	$NO_3^- + 2\bar{e} + H_2O = NO_2^- + 2OH^-$	+ 0,01
$WO_4^{2-}$	$W_{(тв.)}$	$WO_4^{2-} + 6\bar{e} + 8H^+ = W + 4H_2O$	+ 0,05
$N_2_{(газ)}$	$NH_3_{(газ)}$	$N_2 + 6\bar{e} + 6H^+ = 2NH_3$	+ 0,06
$Sn^{4+}$	$Sn^{2+}$	$Sn^{4+} + 2\bar{e} = Sn^{2+}$	+ 0,15
$[SnCl_6]^{2-}$	$[SnCl_6]^{4-}$	$[SnCl_6]^{2-} + 2\bar{e} = [SnCl_6]^{4-} + 2Cl^-$	+ 0,15
$S_{(тв.)}$	$H_2S_{(газ)}$	$S + 2\bar{e} + 2H^+ = H_2S$	+ 0,17
$Co(OH)_3$	$Co(OH)_2$	$Co(OH)_3 + \bar{e} = Co(OH)_2 + OH^-$	+ 0,17
$SO_4^{2-}$	$SO_2 \cdot H_2O$	$SO_4^{2-} + 2\bar{e} + H^+ = SO_2 \cdot H_2O + H_2O$	+ 0,17
$AgCl_{(тв.)}$	$Ag_{(тв.)}$	$AgCl + \bar{e} = Ag + Cl^-$	+ 0,22
$IO_3^-$	$I^-$	$IO_3^- + 6\bar{e} + 3H_2O = I^- + 6OH^-$	+ 0,25
$Hg_2Cl_2$	$Hg_{(рід.)}$	$Hg_2Cl_2 + 2\bar{e} = Hg + 2Cl^-$	+ 0,27
$N_2_{(газ)}$	$NH_4^+$	$N_2 + 6\bar{e} + 8H^+ = 2NH_4^+$	+ 0,27
$SO_4^{2-}$	$H_2S_{(газ)}$	$SO_4^{2-} + 8\bar{e} + 10H^+ = H_2S + 4H_2O$	+ 0,31
$Co^{3+}$	$Co_{(тв.)}$	$Co^{3+} + 3\bar{e} = Co$	+ 0,36
$SO_4^{2-}$	$S_{(тв.)}$	$SO_4^{2-} + 6\bar{e} + 8H^+ = S + 4H_2O$	+ 0,33

$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$	$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} + \bar{e} = [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$	+ 0,36
$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$	$\text{Ag}_{(\text{тв.})}$	$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+ + \bar{e} = \text{Ag} + 2\text{NH}_3$	+ 0,37
$\text{O}_2_{(\text{газ})}$	$2\text{OH}^-$	$\text{O}_2 + 4\bar{e} + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{OH}^-$	+ 0,40

продовження табл. 8

Окиснена форма	Відновлена форма	Схема реакції	$E^0$ , В
$\text{SO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{S}_{(\text{тв.})}$	$\text{SO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + 4\bar{e} + 4\text{H}^+ = \text{S} + 3\text{H}_2\text{O}$	+ 0,45
$\text{Ni}(\text{OH})_3$	$\text{Ni}(\text{OH})_2$	$\text{Ni}(\text{OH})_3 + \bar{e} = \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$	+ 0,49
$\text{BrO}_3^-$	$\text{Br}_2_{(\text{рід.})}$	$\text{BrO}_3^- + 10\bar{e} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Br}_2 + 12\text{OH}^-$	+ 0,50
$\text{MnO}_4^{2-}$	$\text{MnO}_2_{(\text{тв.})}$	$\text{MnO}_4^{2-} + 2\bar{e} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$	+ 0,51
$\text{I}_2$	$2\text{I}^-$	$\text{I}_2 + 2\bar{e} = 2\text{I}^-$	+ 0,54
$\text{ClO}_4^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{ClO}_4^- + 8\bar{e} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Cl}^- + 8\text{OH}^-$	+ 0,56
$\text{MnO}_4^-$	$\text{MnO}_4^{2-}$	$\text{MnO}_4^- + \bar{e} = \text{MnO}_4^{2-}$	+ 0,56
$\text{MnO}_4^-$	$\text{MnO}_2_{(\text{тв.})}$	$\text{MnO}_4^- + 3\bar{e} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$	+ 0,60
$\text{BrO}_3^-$	$\text{Br}^-$	$\text{BrO}_3^- + 6\bar{e} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Br}^- + 6\text{OH}^-$	+ 0,61
$\text{AsO}_4^{3-}$	$\text{As}_{(\text{тв.})}$	$\text{AsO}_4^{3-} + 5\bar{e} + 8\text{H}^+ = \text{As} + 4\text{H}_2\text{O}$	+ 0,65
$\text{O}_2_{(\text{газ})}$	$\text{H}_2\text{O}_2$	$\text{O}_2 + 2\bar{e} + 2\text{H}^+ = \text{H}_2\text{O}_2$	+ 0,68
$\text{Fe}^{3+}$	$\text{Fe}^{2+}$	$\text{Fe}^{3+} + \bar{e} = \text{Fe}^{2+}$	+ 0,77
$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2_{(\text{газ})}$	$\text{NO}_3^- + \bar{e} + 2\text{H}^+ = \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+ 0,78
$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^- + 8\bar{e} + 10\text{H}^+ = \text{NH}_4^+ + 3\text{H}_2\text{O}$	+ 0,87
$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_{(\text{газ})}$	$\text{NO}_3^- + 3\bar{e} + 4\text{H}^+ = \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	+ 0,96
$\text{HNO}_2$	$\text{NO}_{(\text{газ})}$	$\text{HNO}_2 + \bar{e} + \text{H}^+ = \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	+ 1,00
$\text{Br}_2_{(\text{рід.})}$	$2\text{Br}^-$	$\text{Br}_2 + 2\bar{e} = 2\text{Br}^-$	+ 1,07
$\text{IO}_3^-$	$\text{I}^-$	$\text{IO}_3^- + 6\bar{e} + 6\text{H}^+ = \text{I}^- + 3\text{H}_2\text{O}$	+ 1,09
$2\text{IO}_3^-$	$\text{I}_2$	$2\text{IO}_3^- + 10\bar{e} + 12\text{H}^+ = \text{I}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	+ 1,19
$\text{O}_2_{(\text{газ})}$	$2\text{H}_2\text{O}$	$\text{O}_2 + 4\bar{e} + 4\text{H}^+ = 2\text{H}_2\text{O}$	+ 1,23
$\text{MnO}_2_{(\text{тв.})}$	$\text{Mn}^{2+}$	$\text{MnO}_2 + 2\bar{e} + 4\text{H}^+ = \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+ 1,23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	$2\text{Cr}^{3+}$	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 6\bar{e} + 14\text{H}^+ = 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	+ 1,33
$\text{HBrO}$	$\text{Br}^-$	$\text{HBrO} + 2\bar{e} + \text{H}^+ = \text{Br}^- + \text{H}_2\text{O}$	+ 1,34
$\text{Cl}_2_{(\text{газ})}$	$2\text{Cl}^-$	$\text{Cl}_2 + 2\bar{e} = 2\text{Cl}^-$	+ 1,36
$\text{ClO}_4^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{ClO}_4^- + 8\bar{e} + 8\text{H}^+ = \text{Cl}^- + 4\text{H}_2\text{O}$	+ 1,38
$\text{BrO}_3^-$	$\text{Br}^-$	$\text{BrO}_3^- + 6\bar{e} + 6\text{H}^+ = \text{Br}^- + 3\text{H}_2\text{O}$	+ 1,44
$\text{ClO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{ClO}_3^- + 6\bar{e} + 3\text{H}^+ = \text{Cl}^- + 3\text{H}_2\text{O}$	+ 1,45
$\text{PbO}_2_{(\text{тв.})}$	$\text{Pb}^{2+}$	$\text{PbO}_2 + 2\bar{e} + 4\text{H}^+ = \text{Pb}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	+ 1,45
$\text{HClO}$	$\text{Cl}^-$	$\text{HClO} + 2\bar{e} + \text{H}^+ = \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$	+ 1,50
$\text{MnO}_4^-$	$\text{Mn}^{2+}$	$\text{MnO}_4^- + 5\bar{e} + 8\text{H}^+ = \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	+ 1,52
$\text{BrO}_3^-$	$\text{Br}_2_{(\text{рід.})}$	$\text{BrO}_3^- + 10\bar{e} + 12\text{H}^+ = \text{Br}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	+ 1,52
$\text{MnO}_4^-$	$\text{MnO}_2_{(\text{тв.})}$	$\text{MnO}_4^- + 3\bar{e} + 4\text{H}^+ = \text{MnO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+ 1,69
$\text{H}_2\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\bar{e} + 2\text{H}^+ = \text{H}_2\text{O}$	+ 1,78
$\text{BiO}_3^-$	$\text{Bi}^{3+}$	$\text{BiO}_3^- + 2\bar{e} + 6\text{H}^+ = \text{Bi}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$	+ 1,80
$\text{Co}^{3+}$	$\text{Co}^{2+}$	$\text{Co}^{3+} + \bar{e} = \text{Co}^{2+}$	+ 1,81
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$	$2\text{SO}_4^{2-}$	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\bar{e} = 2\text{SO}_4^{2-}$	

F <sub>2</sub> (газ)	2F <sup>-</sup>	F <sub>2</sub> + 2ē = 2F <sup>-</sup>	+ 2,01 + 2,87
----------------------	-----------------	---------------------------------------	------------------

**Таблица 4. Стандартні електродні потенціали**

Електрод	Рівняння процесу	E <sup>0</sup> , В	Електрод	Рівняння процесу	E <sup>0</sup> , В
Li <sup>+</sup> /Li	Li <sup>+</sup> + ē = Li	- 3,02	Al <sup>3+</sup> /Al	Al <sup>3+</sup> + 3ē = Al	- 2,34
Rb <sup>+</sup> /Rb	Rb <sup>+</sup> + ē = Rb	- 2,99	Mn <sup>2+</sup> /Mn	Mn <sup>2+</sup> + 2ē = Mn	- 1,05
K <sup>+</sup> /K	K <sup>+</sup> + ē = K	- 2,92	Zn <sup>2+</sup> /Zn	Zn <sup>2+</sup> + 2ē = Zn	- 0,76
Ba <sup>2+</sup> /Ba	Ba <sup>2+</sup> + 2ē = Ba	- 2,90	Cr <sup>3+</sup> /Cr	Cr <sup>3+</sup> + 3ē = Cr	- 0,71
Sr <sup>2+</sup> /Sr	Sr <sup>2+</sup> + 2ē = Sr	- 2,89	Fe <sup>2+</sup> /Fe	Fe <sup>2+</sup> + 2ē = Fe	- 0,44
Ca <sup>2+</sup> /Ca	Ca <sup>2+</sup> + 2ē = Ca	- 2,87	Cd <sup>2+</sup> /Cd	Cd <sup>2+</sup> + 2ē = Cd	- 0,40
Mg <sup>2+</sup> /Mg	Mg <sup>2+</sup> + 2ē = Mg	- 2,71	Co <sup>2+</sup> /Co	Co <sup>2+</sup> + 2ē = Co	- 0,29
Ni <sup>2+</sup> /Ni	Ni <sup>2+</sup> + 2ē = Ni	- 0,25	Cu <sup>+</sup> /Cu	Cu <sup>+</sup> + ē = Cu	+ 0,52
Sn <sup>2+</sup> /Sn	Sn <sup>2+</sup> + 2ē = Sn	- 0,14	Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> /2Hg	Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> + 2ē = 2Hg	+ 0,79
Pb <sup>2+</sup> /Pb	Pb <sup>2+</sup> + 2ē = Pb	- 0,13	Ag <sup>+</sup> /Ag	Ag <sup>+</sup> + ē = Ag	+ 0,80
H <sup>+</sup> / 1/2H <sub>2</sub>	H <sup>+</sup> + ē = 1/2H <sub>2</sub>	± 0,00	Pd <sup>2+</sup> /Pd	Pd <sup>2+</sup> + 2ē = Pd	+ 0,83
Sb <sup>3+</sup> /Sb	Sb <sup>3+</sup> + 3ē = Sb	+ 0,20	Hg <sup>2+</sup> /Hg	Hg <sup>2+</sup> + 2ē = Hg	+ 0,86
Bi <sup>3+</sup> /Bi	Bi <sup>3+</sup> + 3ē = Bi	+ 0,23	Pt <sup>2+</sup> /Pt	Pt <sup>2+</sup> + 2ē = Pt	+ 1,20
Cu <sup>2+</sup> /Cu	Cu <sup>2+</sup> + 2ē = Cu	+ 0,34	Au <sup>3+</sup> /Au	Au <sup>3+</sup> + 3ē = Au	+ 1,42

**Таблица 5. Розчинність кисню в прісній воді**

Тиск абс.	мм рт.ст.	760			1520			3040		
	<i>psi</i>	14.7			29.3			58.7		
	бари	1			2			4		
	кПа	101.1			202.2			404.3		
Температура		Розчинність кисню								
°C	°F	μ Моль	мг/л	мл/л	μ Моль	мг/л	мг/л	μ Моль	мг/л	мл/л
0	32	457	14.6	10.2	913	29.2	20.5	1823	58.4	40.9
5	41	399	12.8	9.1	798	25.5	18.2	1595	51.1	36.4
10	50	353	11.3	8.2	705	22.6	16.4	1411	45.1	32.8
15	59	315	10.1	7.5	630	20.2	14.9	1260	40.3	29.8
20	68	284	9.1	6.8	568	18.2	13.7	1137	36.4	27.3
25	77	258	8.3	6.3	517	16.5	12.6	1034	33.1	25.3
30	86	236	7.6	5.9	473	15.2	11.8	947	30.3	23.6
35	95	218	7	5.5	436	14	11	872	27.9	22.1



40	104	202	6.5	5.2	404	12.9	10.4	808	25.9	20.8
45	113	189	6	4.9	375	12	9.8	751	24	16.9
50	122	177	5.6	4.6	355	11.3	9.3	710	22.7	18.7

**Таблиця 6. Розчинність кисню в солоній (морській) воді  
(солоність ~ 35 г/кг води)**

Тиск абс.	<i>мм рт.ст.</i>	760			1520			3040		
	<i>psi</i>	14.7			29.3			58.7		
	<i>бары</i>	1			2			4		
	<i>кПа</i>	101.1			202.2			404.3		
Температура		Растворимость								
<i>°C</i>	<i>°F</i>	<i>μ Моль</i>	<i>мг/л</i>	<i>мл/л</i>	<i>μ Моль</i>	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	<i>μ Моль</i>	<i>мг/л</i>	<i>мл/л</i>
0	32	349	11.2	7.8	699	22.4	15.7	1399	44.8	31.3
5	41	308	9.9	7	616	19.7	14.1	1233	39	28
10	50	275	8.8	6.4	550	17.6	12.8	1099	35.2	25.6
15	59	248	7.9	5.9	495	15.9	11.7	991	31.7	23.4
20	68	225	7.2	5.4	450	14.4	10.8	901	28.8	21.7
25	77	206	6.6	5	413	13.2	10.1	826	26.4	20.2
30	86	190	6.1	4.7	381	12.2	9.5	761	24.4	18.9
35	95	176	5.6	4.5	353	11.3	8.9	706	22.6	17.9
40	104	165	5.3	4.2	329	10.5	8.5	658	21.1	16.9
45	113	154	4.9	4	308	9.9	8	616	19.7	16.1
50	122	146	4.6	3.8	292	9.4	7.7	585	18.7	15.4

**Таблиця 7. Десятибальна шкала корозійної стійкості металів**

Група стійкості	Швидкість корозії, мм/рік	Бал
I Дуже стійкі	<0,001	1
II Вельми стійкі	0,001 – 0,005	2
	0,005 – 0,01	3
III Стійкі	0,01 – 0,05	4
	0,05 – 0,1	5
IV Зниженостійкі	0,1 – 0,5	6
	0,5 – 1,0	7
V Малостійкі	1,0 – 5,0	8

	5,0 – 10,0	9
VI Нестійкі	>10,0	10

**Таблиця 8. Сумісність металів та сплавів  
(оцінка ризику гальванічної корозії)**

- "Сум" — сумісні;
- "Не сум"— несумісні;
- "Пайка" — сумісні при ретельній пайці, але несумісні при безпосередньому стиканні, тому що утворюють гальванічну пару;
- ПОС – припій, олов'яно-свинцевий сплав;
- - нема даних

Матеріал	Al	Бронза	Дюраль	Латунь	Cu	Ni	Sn	ПОС	Сталь нелег / чавун	Cr	Zn
Al	Сум	Не сум	Сум	Не сум	Не сум	Не сум	Не сум	Не сум	Сум	Не сум	Сум
Бронза	Не сум	Сум	Не сум	Сум	Сум	Сум	Пайка	Пайка	Не сум	Сум	Не сум
Дюралюміній	Сум	Не сум	Сум	Не сум	Не сум	Не сум	Не сум	Не сум	Сум	Не сум	Сум
Латунь	Не сум	Сум	Не сум	Сум	Сум	Сум	Пайка	Пайка	Не сум	Сум	Не сум
Cu	Не сум	Сум	Не сум	Сум	Сум	Сум	Пайка	Пайка	Не сум	Сум	Не сум
Ni	Не сум	Сум	Не сум	Сум	Сум	Сум	Пайка	Пайка	Сум	-	Сум
Sn	Не сум	Пайка	Не сум	Пайка	Пайка	Пайка	Сум	Сум	Сум	-	Сум
ПОС	Не сум	Пайка	Не сум	Пайка	Пайка	Пайка	Сум	Сум	Сум	-	Сум
сталь нелег / чавун	Сум	Не сум	Сум	Не сум	Не сум	Сум	Сум	Сум	Сум	Сум	Сум
Cr	Не сум	Сум	Не сум	Сум	Сум	-	-	-	Сум	Сум	Сум
Zn	Сум	Не сум	Сум	Не сум	Не сум	Сум	Сум	Сум	Сум	Сум	Сум

**Таблиця 9. Корозійна стійкість металів і сплавів за нормальних умов**

Таблиця корозійної стійкості призначена для формування загального уявлення про те, як різні метали та сплави реагують з певними середовищами. Рекомендації не є абсолютними, тому що концентрація середовища, його температура, тиск та інші параметри можуть впливати на застосування конкретного металу та сплаву. На вибір металу або сплаву також можуть впливати економічні фактори.

- А - звичайно не кородує;
- В - корозія від мінімальної до незначної;
- С - кородує

№	Середовище	Al	Ла ту нь	Ча- вун і вугл. ста ль	Нержавіюча сталь					Ti	Zr
					416 та 440 С	17-4	304, відп. 08Х18Н10	316, відп. 03Х17Н142	Дуплексна		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Ацетат-альдегід	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A
2	Ацетатна к-та, без повітря	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A
3	Ацетатна к-та, нас. повітрям	C	C	C	C	B	B	A	A	A	A
4	Ацетон	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
5	Ацетилен	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
6	Спирти	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
7	Сульфат алюмінію	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A
8	Аміак	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A
9	Нашатир	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A
10	Аміак їдкий	A	C	A	A	A	A	A	A	A	B
11	Аміачна селітра	B	C	B	B	A	A	A	A	C	A
12	Фосфат амонію	B	B	C	B	B	A	A	A	A	A
13	Сульфат амонію	C	C	C	C	B	B	A	A	A	A
14	Сульфат амонію	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	Анілін	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A
16	Асфальт, бітум	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
17	Пиво	A	A	B	B	A	A	A	A	A	A
18	Бензол	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
19	Бензойна к-та	A	A	C	C	A	A	A	A	A	A
20	Борна к-та	C	B	C	C	A	A	A	A	A	A
21	Бром сухий	C	C	C	C	B	B	B	A	C	C
22	Бром вологий	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
23	Бутан	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
24	Хлорид кальцію	C	C	B	C	C	B	B	A	A	A
25	Гіпохлорит кальцію	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A
26	Діоксид кар- бону сухий	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
27	Діоксид кар- бону вологий	A	B	C	C	A	A	A	A	A	A
28	Дисульфід карбону	C	C	A	B	B	A	A	A	A	A
29	Карбонатна кислота	A	B	C	C	A	A	A	A	A	A
30	Тетрахлорид карбону	A	A	B	B	A	A	A	A	A	A
31	Хлор сухий	C	C	A	C	B	B	B	A	C	A
32	Хлор вологий	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A
33	Хромова к-та	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A
34	Лимонна к-та	B	C	C	C	B	B	A	A	A	A
35	Кокосов. масл	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A
36	Сульфат міді	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A
37	Хлопкове масло	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
38	Креозот	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A
39	Даутерм	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
40	Етан	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
41	Ефір	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
42	Етилхлорид	C	B	C	C	B	B	B	A	A	A
43	Етилен	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
44	Етилен-гліколь	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
45	Ферум хлорид	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A
46	Фтор сухий	B	B	A	C	B	B	B	A	C	C
47	Фтор вологий	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
48	Формальдегід	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
49	Форміатна к-та	B	C	C	C	C	C	B	A	C	A
50	Фреон вологий	C	C	B	C	B	B	A	A	A	A
51	Фреон сухий	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
52	Фурфурол	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A
53	Бензин	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
54	Глюкоза	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A
55	Хлоридна к-та, насичена повітрям	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
56	Хлоридна к-та, без повітря	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
57	Плавікова к-та, насичена повітрям	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
58	Плавікова к-та, без повітря	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
59	Водень	A	A	A	C	B	A	A	A	C	A
60	Гідроген пероксид	A	C	C	C	B	A	A	A	A	A
61	Сірководень	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A
62	Йод	C	C	C	C	C	A	A	A	C	B
63	Гідроксид магнію	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A
64	Ртуть	C	C	A	A	A	A	A	A	C	A

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
65	Метанол	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
66	Метилетил-гліколь	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
67	Молоко	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A
68	Природний газ	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
69	Нітратна к-та	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A
70	Олеїнова к-та	C	C	C	B	B	B	A	A	A	A
71	Щавлева к-та	C	C	C	C	B	B	B	A	C	A
72	Кисень	C	A	C	C	B	B	B	B	C	C
73	Мінеральне масло	A	A	A	A	A	A	A	A		A
74	Фосфатна к-та, насичена повітрям	C	C	C	C	B	A	A	A	C	A
75	Фосфатна к-та, без повітря	C	C	C	C	B	B	B	A	C	A
76	Пікрінова к-та	C	C	C	C	B	B	A	A	A	A
77	Карбонат калію	C	C	B	B	A	A	A	A	A	A
78	Хлорид калію	C	C	B	C	C	B	B	A	A	A
79	Гідроксид калію	C	C	B	B	A	A	A	A	A	A
80	Пропан	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
81	Каніфоль, смола	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
82	Нітрат срібла	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A
83	Ацетат натрію	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
84	Карбонат натрію	C	C	A	B	A	A	A	A	A	A
85	Хлорид натрію	C	A	C	C	B	B	B	A	A	A
86	Декагідрат хромату Na	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
87	Гідроксид натрію	C	C	A	B	B	B	A	A	A	A

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
88	Гіпохлорит натрію	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A
89	Тіосульфат натрію	C	C	C	C	B	B	A	A	A	A
90	Хлорид олова	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A
91	Водяний пар	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
92	Стеаринова к-та	C	B	B	B	B	A	A	A	A	A
93	Сірка	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A
94	Діоксид сірки сухий	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A
95	Триоксид сірки сухий	C	C	C	C	C	C	B	A	A	A
96	Сульфатна к-та, насичена повітрям	C	C	C	C	C	C	C	A	C	A
97	Сульфатна к-та, без повітря	C	C	C	C	C	C	C	A	C	A
98	Сульфідна к-та	C	C	C	C	C	B	B	A	A	A
99	Дьоготь	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
100	Трихлоретилен	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A
101	Скипидар	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A
102	Оцет	B	B	C	C	A	A	A	A	A	A
103	Вода хімічно очищена	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
104	Вода дистильована	A	A	C	C	A	A	A	A	A	A
105	Вода морська	C	A	C	C	C	C	B	A	A	A
106	Віскі, горілка, вино	A	A	C	C	A	A	A	A	A	A
107	Хлорид цинку	C	C	C	C	C	C	C	B	A	A
108	Сульфат цинку	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A



**Таблиця 10. Захисні суміші при фарбуванні, нанесенні металічного покриття, лакуванні, травленні**

Захисні суміші	Пропорція	Примітка	Робоча темп. затверділої суміші
<b>Суміш 1:</b>			
Віск, або стеарин, або парафін, або церезин	2 масові частини	перед змішуванням розмягчити віск	до 50°C
Скипидар	9 масових частин		
Небагато спирторозчинної фарби або гуталіна (для кольору)	трохи		
<b>Суміш 2:</b>			
Віск, або стеарин, або парафін, або церезин	70% мас.	Все змішують, розтоплюють на малому вогні та ретельно перемішують. Наносити горячим.	до 60°C
Бджолиний віск	10% мас.		
Каніфоль	10% мас.		
Пековий лак (кам'яновугільний лак)	10% мас.		
<b>Суміш 3:</b>			
Пековий лак (кам'яновугільний лак)	1 масова частина	Холодним наносять на поверхню. Час висихання 12-16 годин. Можлива висока адгезія.	до 85°C
Скипидар	1 масова частина		
<b>Суміш 4 (кислотостійка):</b>			
Клей 88Н або клей «Момент»	1 масова частина	Необхідну консистенцію одержують додаванням до суміші розчинника, що містить 2 об'ємні частини бензину 1 частину етилацетату (або бутилацетату).	до 150 °C
Порцелянове борошно, або тальк, або каолін, або оксид хрому (III)	1 масова частина		
<b>Розповсюджені захисні покриття:</b>			
Перхлорвінілові фарби, лаки та емалі		Можлива висока адгезія	до 95°C
Масляно-бітумні лаки та емалі, асфальтово-масляні та бакелітові лаки			до 120°C
Епоксидний лак або шпаклівка			до 160°C

*Навчальне видання*

*Борисенко Юлія Володимирівна*

**МАТЕРІАЛИ СУЧАСНОЇ ТЕХНІКИ ТА ЗАХИСТ ВІД  
РУЙНУВАННЯ**

Навчальний посібник

Редактор  
Відповідальний за поліграфічне видання  
Коректор