

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 171/2014

Далиборка С. Пејовић

Методе заштите металних делова и конструкција од корозије

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Вукић Лазић, ред. проф. - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да опише основне методе заштите металних делова и конструкција од корозије. Како би се одредили начини заштите, првенствено је потребно извршити идентификацију најучесталијих врста корозије, односно дати њихову класификацију. Такође је неопходно приказати понашање карактеристичних конструкционих метала у корозивим срединама. Поред основних метода заштите металних делова и конструкција, треба обрадити тему превентивне заштите металних делова и конструкција конструкционим мерама.

Препоручена литература:

1. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
2. В. Ђорђевић: *Машински материјали - први део*, Машински факултет, Београд, 1999.
3. Р. Лучић: *Машински материјали*, Научно инжењерство, II издање, "Вук Караџић", Параћин, 1995.
4. М. Јовановић, В. Лазић: *Машински материјали - рукописи предавања*, Машински факултет - Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2018-2019.

Крагујевац, 15.09.2019.

Ментор:
Вукић Лазић, редовни професор

Резиме

Губитак материјала, који корозивни процеси изазивају код металних делова и конструкција, на годишњем нивоу мери се десетинама милиона тона. Да би се одредили начини заштите и превенције, односно спречавања корозије, првенствено је потребно извршити идентификацију, и разумети понашање метала у корозивним срединама. Такође је неопходно уочити начине уклањања или спречавања утицајних фактора корозије. У првом поглављу су приказана уводна разматрања. У другом поглављу је приказана класификација корозивних процеса са детаљним објашњењима. У трећем поглављу су дате карактеристике метала у корозивним срединама. Четврто и пето представљају генералне принципе заштите металних делова и конструкција и превентивне заштите металних делова и конструкција респективно. У њима су изнети најпримењивији начини заштите са конкретним примерима везаним претежно за челик, као један од најупотребљивијих метала у свету машинства и машинских конструкција, а тиме и најизложенији корозији.

Кључне речи: заштита конструкција, корозија, класификација корозивних процеса, понашање метала у корозивним срединама, окружење.

Abstract

Loss of materials, corrosion processes cause the metal parts and structures, annually measured by the tens of millions of tons. In order to determine ways of protecting and preventing, ie preventing corrosion, it is primarily necessary to carry out identification, and to understand the behavior of metals in corrosion environments. It is also necessary to note the ways to remove or prevent corrosion factors that have been affected. The first chapter introduces the introductory considerations. The second chapter presents the classification of corrosion processes with detailed explanations. The third chapter presents the characteristics of metals in corrosion environments. The fourth and fifth are the general principles of protection of metal parts and structures and preventive protection of metal parts and structures respectively. They outline the most applicable methods of protection with specific examples, mainly related to steel, as one of the most used metals in the world of mechanical engineering, and thus the most exposed to corrosion.

Key words: Protection of structures, corrosion, classification of corrosion processes, behavior of metals in corrosion environments, environment.

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	6
2. КЛАСИФИКАЦИЈА КОРОЗИВНИХ ПРОЦЕСА	8
2.1 КЛАСИФИКАЦИЈА ПРЕМА ВРСТИ МЕХАНИЗМА	9
2.1.1 ХЕМИЈСКА КОРОЗИЈА	9
2.1.2 ЕЛЕКТРОХЕМИЈСКА КОРОЗИЈА	10
2.2 ГЕОМЕТРИЈСКА КЛАСИФИКАЦИЈА КОРОЗИЈЕ.....	15
2.2.1 ОПШТА КОРОЗИЈА.....	15
2.2.2 ЛОКАЛНА КОРОЗИЈА	16
2.2.3. СЕЛЕКТИВНА КОРОЗИЈА	23
2.3 ПОСЕБНИ ВИДОВИ КОРОЗИЈЕ.....	24
2.3.1 НАПОНСКА КОРОЗИЈА	24
2.3.2 ЕРОЗИОНА КОРОЗИЈА.....	28
2.3.3 МИРКОБИОЛОШКА КОРОЗИЈА	29
2.3.4 КОРОЗИЈА У БЕТОНУ	30
3. ПОНАШАЊЕ МЕТАЛА У КОРОЗИВНИМ СРЕДИНАМА	32
3.1 ЛЕГУРЕ ГВОЖЂА И УГЉЕНИКА - ЧЕЛИЦИ.....	32
3.2 АЛУМИНИЈУМ И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ	34
3.3 НИКЛ И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ.....	36
3.4 БАКАР И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ.....	38
3.5 ЦИНК И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ	41
3.6 ОЛОВО И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ.....	42
3.7 КАЛАЈ И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ	42
3.8 МАГНЕЗИЈУМ И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ	43
3.9 СРЕБРО	43
4. ЗАШТИТЕ МЕТАЛНИХ ДЕЛОВА И КОНСТРУКЦИЈА	44
4.1 ЕЛЕКТРОХЕМИЈСКЕ МЕТОДЕ ЗАШТИТЕ	45
4.1.1 КАТОДНА ЗАШТИТА	45
4.1.2 АНОДНА ЗАШТИТА	48
4.2 ЗАШТИТА ПРЕВЛАКАМА	49
4.2.1 ЗАШТИТА МЕТАЛНИМ ПРЕВЛАКАМА	50
4.2.2 ЗАШТИТА НЕМЕТАЛНИМ ПРЕВЛАКАМА.....	53
4.2.3 ЗАШТИТА ХЕМИЈСКИМ ПУТЕМ.....	55
4.3 ЗАШТИТА ОД КОРОЗИЈЕ ОБРАДОМ КОРОЗИВНЕ СРЕДИНЕ.....	56
5. ПРЕВЕНТИВНА ЗАШТИТА МЕТАЛНИХ ДЕЛОВА И КОНСТРУКЦИЈА ОБЛИКОВАЊЕМ И КОНСТРУКЦИОНИМ МЕРАМА.....	59
6. ЗАКЉУЧАК.....	64
ЛИТЕРАТУРА.....	66

1. УВОД

Са почетком употребе метала, како за потребе машинских конструкција тако и метала уопштено, корозивни процеси као неповољан феномен су почели задњих деценија да заузимају велики део инжењерске доктрине. Разједање, распадање, нагризање, кородирање - сви наведени термини су само синоними за потпуно природан процес преласка метала у термодинамички стабилније стање посредством деловања околине.

Реч корозија потиче од латинске речи *corrodere*, што значи нагризати. Дефиниција корозије према ISO 8044 стандарду гласи: „Корозија је физичко-хемијско међуделовање метала и његовог окружења које узрокује промену употребних **својстава метала** што може довести до оштећења функције метала, окружења или техничког састава који они чине.

Корозивна реакција се најједноставније може приказати на следећи начин:

МАТЕРИЈАЛ + ОКРУЖЕЊЕ = КОРОЗИВНИ ПРОДУКТ

Корозији су подложни сви неплеменити метали и њихове легуре, али и такође неметали. Од неметала као конструкциони материјали највише се користе следећи: бетон, дрво, камен, стакло, полимери и композитни материјали (на бази неметалних структурних компонената).

У структури одговорних конструкција добара највише су заступљени елементи израђени од металних материјала, али и од бетона и армираног бетона. Ови материјали се користе за израду веома одговорних конструкција и делова конструкција, у погледу њихове функционалности и безбедности. Неметали такође имају широко подручје употребе, па у специфичним условима експлоатације поједини неметали и композити, могу имати значајну улогу и бити чак незаменљиви.

При проучавању корозије материјала (метал, бетон, дрво, камен, стакло, полимери, композитни материјали) проучавају се углавном следеће области: постојаност материјала; механизми корозије; методе и мерни инструменти за утврђивање стања материјала, методе заштите и контроле заштите од корозије. Тема овог рада је усмерена искључиво на заштиту метала који уједно представљају најупотребљивију врсту конструкционих материјала у производном машинству и машинству уопште.

Од конструкционих материјала се очекује да уз што нижу цену имају повољна механичка својства и добра својства обрадивости, а да у исто време осигурају и корозивну отпорност. Наведена својства, осим у случају коришћења изузено корозивно постојаних материјала, попут нерђајућих челика и легура никла, у практичном случају ретко могу испунити наведени конструкциони материјали. Због тога се примењују разне методе, односно технологије заштите метала од корозије.

Својства метала последица су њихових структурног стања. Структурно стање неког метала добија се обрадом одређеног (хемијског) састава одређеним технолошким поступком. Тако се избором метала и одговарајућег технолошког поступка постиже циљано (микро) структурно стање које ће дати жељена (механичка) својства.

Утицајем корозије на материјал, механичка својства истог се погоршавају, чиме се омогућава бржи настанак развоја пукотине, односно лома материјала, нарушавају се естетска, функционална и остала својства. Економско значење корозије метала и металних конструкција је велико и оно расте с индустријализацијом привреде. Стварну штету насталу због корозије на металним конструкцијама је тешко израчунати јер осим директних штета укључује и индиректне које су велике. Да би дошло до појаве корозије или процеса оштећивања металне конструкције, у посматраном систему мора постојати хемијска, механичка, биолошка или нека друга покретачка сила. Она је узрок штетне појаве или процеса. Због тога заштита од корозије и превенција појаве корозије код метала и металних конструкција је неопходна.

Да би се за одредили начини заштите и превенције, односно спречавања корозије, првенствено је потребно извршити идентификацију, по појави, најучесталије врсте корозије и разумети понашање метала у корозивним срединама. Такође је неопходно уочити утицајне факторе корозије и на крају кроз различите видове заштите и превенције начине њиховог уклањања/спречавања.

Услед претходно наведеног, у другом поглављу овог рада је приказана класификација корозивних процеса са објашњењем начина деловања сваке врсте понаособ. У трећем поглављу је приказано понашање карактеристичних метала у корозивним срединама. Четврто и пето представљају основне принципе заштите металних делова и конструкција и превентивне заштите металних делова и конструкција респективно. У њима су изнети најпримењивији начини заштите са конкретним примерима везаним претежно за челик, као једног од најупотребљивијих метала у области машинства и машинских конструкција, а самим тим и најизложенији корозији.

Светска организација за корозију (енгл. *The World Corrosion Organisation - WCO*) је проценила да се директним утицајем корозије метала губе милијарде еура на годишњем нивоу где је највећи удео свакако удео челика. Више од половине штете узрокује атмосферска корозија, што је и логично јер највећи број металних конструкција и опреме су изложени њој.

2. КЛАСИФИКАЦИЈА КОРОЗИВНИХ ПРОЦЕСА

Корозија се може класификовати на пуно начина. На пример, према механизму деловања, средини у којој се налази конструкциони материјал, материјалу који кородира, индустријској грани или врсти посројења, односу између корозије и других штетних процеса, геометријском облику корозивних разарања итд.

Најучесталије су према механизму процеса и према геометријском облику корозионог разарања. Према механизму настајања корозија се дели на: електрохемијску и хемијску. По геометријском облику корозионог разарања корозија може бити општа, локална и селективна. Општа корозија обухвата читав метални део или машинску конструкцију. Она може бити равномерна или неравномерна. Локална корозија „напада“ само неке делове изложене површине. Има разне облике, а од посебног значаја су тачкаста корозија, корозија у зазорима и интеркристална корозија. Поред локалне корозије, селективна корозија је облик корозије при којој кородира само један елемент металне легуре, након чега промењена структура. Поред поменуте класификације постоје посебни видови корозије попут напонске корозије, корозије узроковане лутајућим струјама, микробиолошке, ерозионе, у земљишту, у бетону итд. У табели 2.1 су приказане све три одабране класификације. Већина наведених врсти су уско повезане једна са другом. На пример електрохемијска корозија је повезана са готово свим осталим, тачкаста са напонском, контактна са селективном итд.

Табела 2.1 Класификација корозивних процеса

Посебни видови	По механизму процеса		
Напонска	Хемијска		Електрохемијска
У земљишту	По геометријском облику корозивног разарања		
У бетону	Општа	Локална	Селективна
Услед лутајућих струја		Тачкаста (Рупичаста)	
Микробиолошка		Контактна	
Ерозиона		Корозија у зазорима	
		Међукристална (Интеркристална)	

2.1 КЛАСИФИКАЦИЈА ПРЕМА ВРСТИ МЕХАНИЗМА

2.1.1 ХЕМИЈСКА КОРОЗИЈА

Хемијска корозија метала се одвија у неелектролитима, тј. у супстанцама које не спроводе електричну струју, при чему настају хемијска једињења метала са неметалним елементима (најчешће оксиди и сулфиди). Најважнији неелектролити који у пракси изазивају хемијску корозију метала свакако су врели гасови и органске течности.

Хемијска корозија метала састоји се у реакцији атома метала из кристалне решетке са молекулама неког елемента или споја из околине. Најчешће се одвија у гасовима и органским течностима. Због тога се хемијска корозије дели и на гасну и течну.

Хемијска корозија у врућим гасовима се одвија само уз услов да су ти гасови суви, тј. да због високе температуре на површини метала не могу се кондензовати течност нити водена пара, јер чим дође до једне од тих појава, одвија се електрохемијска корозија. Хемијска корозија најчешће се одвија у врелом ваздуху као и при сагоревању гасова. До ње може доћи код термичке обраде метала, у металуршким и термоенергетским постројењима, индустријским пећима, моторима са унутрашњим сагоревањем и тсл.

Органске течности могу изазвати хемијску корозију само ако су безводне, јер иначе тада настаје електрохемијска корозија. Најважније су безводне течности, нафта и њени деривати, средства за одмашћивање и разређивање боја и тсл.

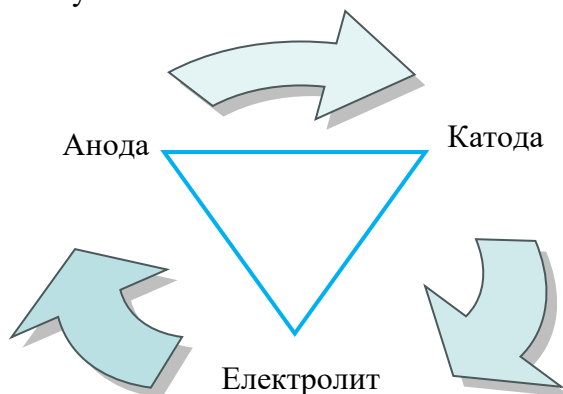
Додатни примери неелектролита, поред загрејаних гасова, су органске течности попут нафте, горива, мазива, одмашћивача, разређивача боја и лакова и др.

Брзина и ток хемијске корозије зависе од:

- ✓ метала који кородира (састав, структура и текстура),
- ✓ физичких услова (температура, храпавост површине, заостали напони),
- ✓ агресивне средине која га окружује (састав и концентрација састојака околине),
- ✓ корозивних производа (физичке и хемијске особине производа корозије),
- ✓ брзине кретања средине,
- ✓ легирајућих елемената које лако оксидишу, знатно смањују брзину корозије у оксидационој средини,
- ✓ стања површине - глатке и чисте металне површине мање кородирају од храпавих и онечишћених, јер је њихова стварна величина много већа од геометријске,
- ✓ Нечистоће на површини метала (чађ) онемогућавају настајање квалитетног заштитног слоја
- ✓ Заосталих напона (термичких и структурних) у металу који убрзавају хемијску корозију у почетној фази.

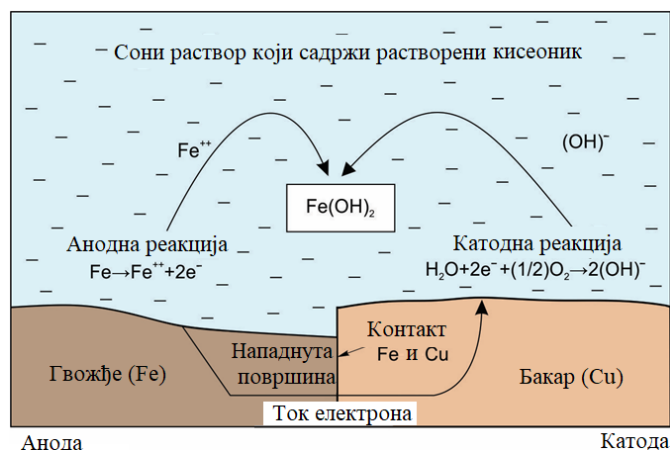
2.1.2 ЕЛЕКТРОХЕМИЈСКА КОРОЗИЈА

Електрохемијска корозија метала одвија се у електролитима, тј. у срединама са јонском проводљивошћу. То је сложени физичко-хемијски процес при коме долази до оксидације мање племенитог метала (анода), уз истовремену редукцију више племенитог метала (катода). Електрохемијска корозија се одвија у природној и техничкој води, киселинама, базама, солима, влажном тлу, соковима биолошког порекла итд. Другим речима електрохемијска корозија настаје стварањем галванских парова (сл. 2.1) између два различито електропроводљива метала (са различитим електродним потенцијалима), који се налазе у електролиту.

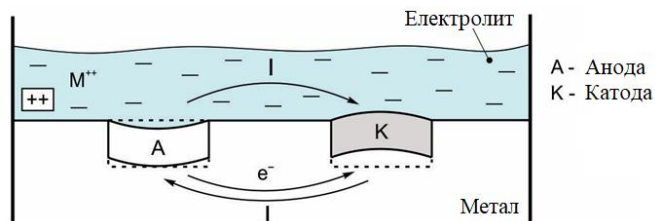


Слика 2.1 Три неопходна услова за настанак електрохемијске корозије

Аноде и катоду се могу образовати и на површини једног те истог метала услед локалних разлика у саставу легуре. У присуству електролита настаје галвански спрег. Пример процеса електрохемијске корозије између два метала различитог електродног потенцијала је приказан на слици 2.2. Пример корозије на површини метала услед различитости састава легура које га чине приказан је на слици 2.3.



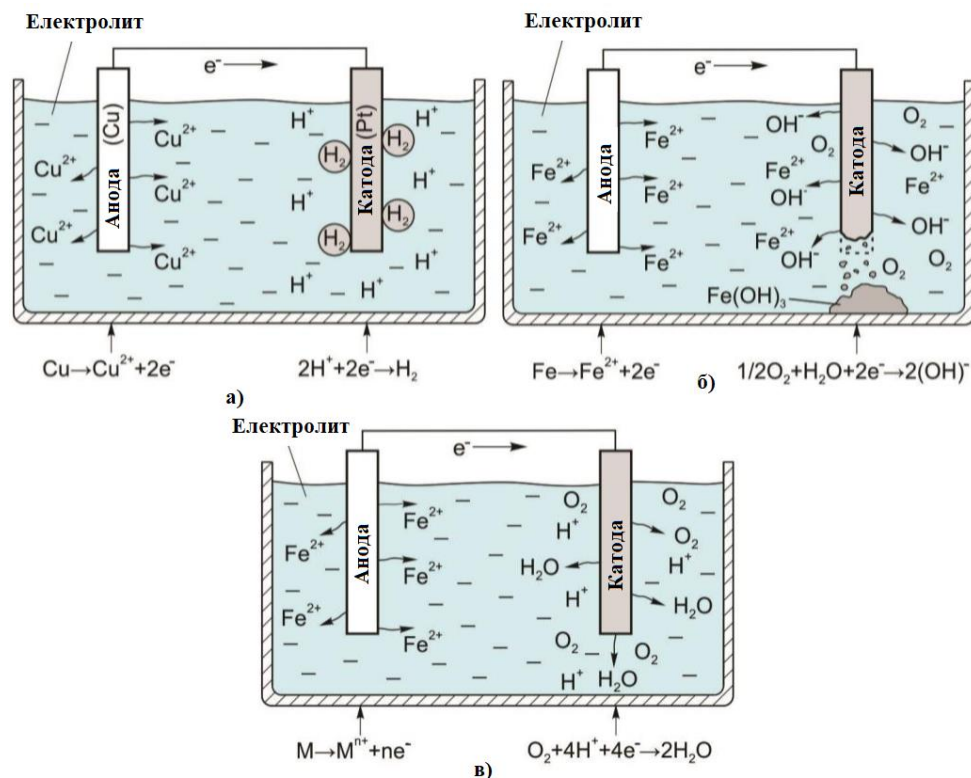
Слика 2.2 Схематски приказ типичне електрохемијске корозије галванског пара Fe-Cu



Слика 2.3 Галвански спрег на истом металу

Анодна реакција, као што се може видети на слици 2.2 доводи до дисипације (растурања) електрона и оксидације и губитака јона. Супротно њој, катодна реакција се препознаје по примању електрона и редукцијом, што ремети равнотежу на аноди.

При прелазу метала у облику јона у електролит ослобађају се електрони који долазе на катоду и ступају у другу хемијску реакцију која се назива редукцијом, при чему се као споредни продукти образују: гасовита, течна или чврста фаза (сл. 2.4а,б,в).

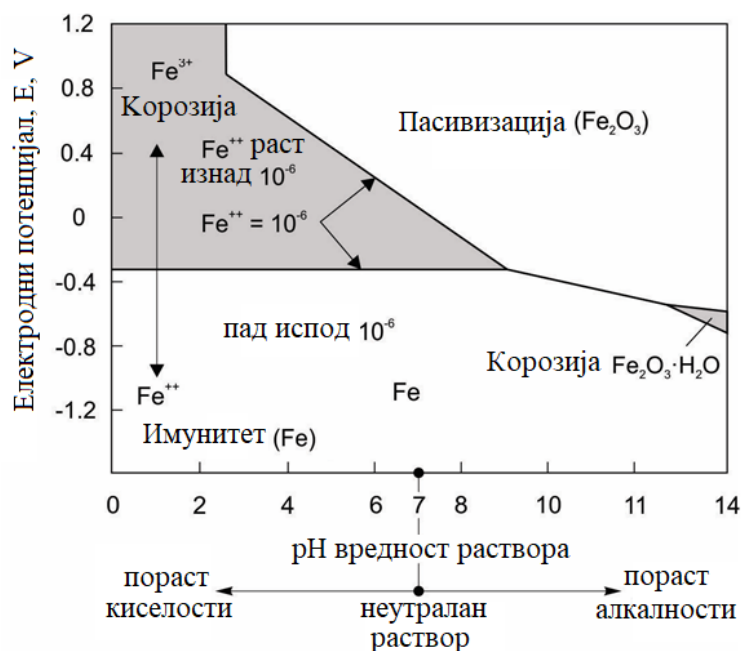


Слика 2.4 Схематски приказ електрохемијских реакција на аноди и катоди и појаве нових фаза (продуката) на катоди: а) гасовите (H_2), б) чврсте $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и в) течне (H_2O)

Процеси корозије зависе не само од врсте метала, већ и од околне средине у којој се метал налази; тај се утицај (за киселе, алкалне и неутралне растворе) приказује Пурбеовим¹ дијаграмом E-pH ² (сл. 2.5); pH -вредност је мера активности водоникових јона (H^+) у раствору електролита, па се на основу тога може одредити да ли је раствор *киселог*, *неутралног* или *базног* (алкалног) карактера. Практично се као индикатор користи лакмус папир који ће у алкалијама постати плав. pH -вредност је бездимензијска величина која се креће од 0-14; за *киселе* растворе одговара $\text{pH} < 7$, за *неутралне* $\text{pH} = 7$ и за *базне* $\text{pH} > 7$. Пурбеов дијаграм показује да челик рђа у продукт ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) углавном у киселим срединама, мада у посебним условима ($\text{pH} > 13$ и $\text{E} < -0.8 \text{ V}$) рђа може да се појави и у алкалним срединама.

¹ Marcel Pourbaix (1904-1998) је белгијски научник руског порекла који је конструисао термодинамичке дијаграме зависности електродног потенцијала од киселости раствора (E-pH).

² Помоћу pH - вредности квантитативно се дефинише *киселост* или *базичност* раствора, при чему се за *неутралну* супстанцу узима чиста вода. За воду је $\text{pH} = -\log \text{H}^+$ где H^+ означава концентрацију водоничних јона, која за неутралну воду износи 10^{-7} , па је $\text{pH} = 7$.



Слика 2.5 Дијаграм Пурбеа - корозивни домени у функцији E-pH

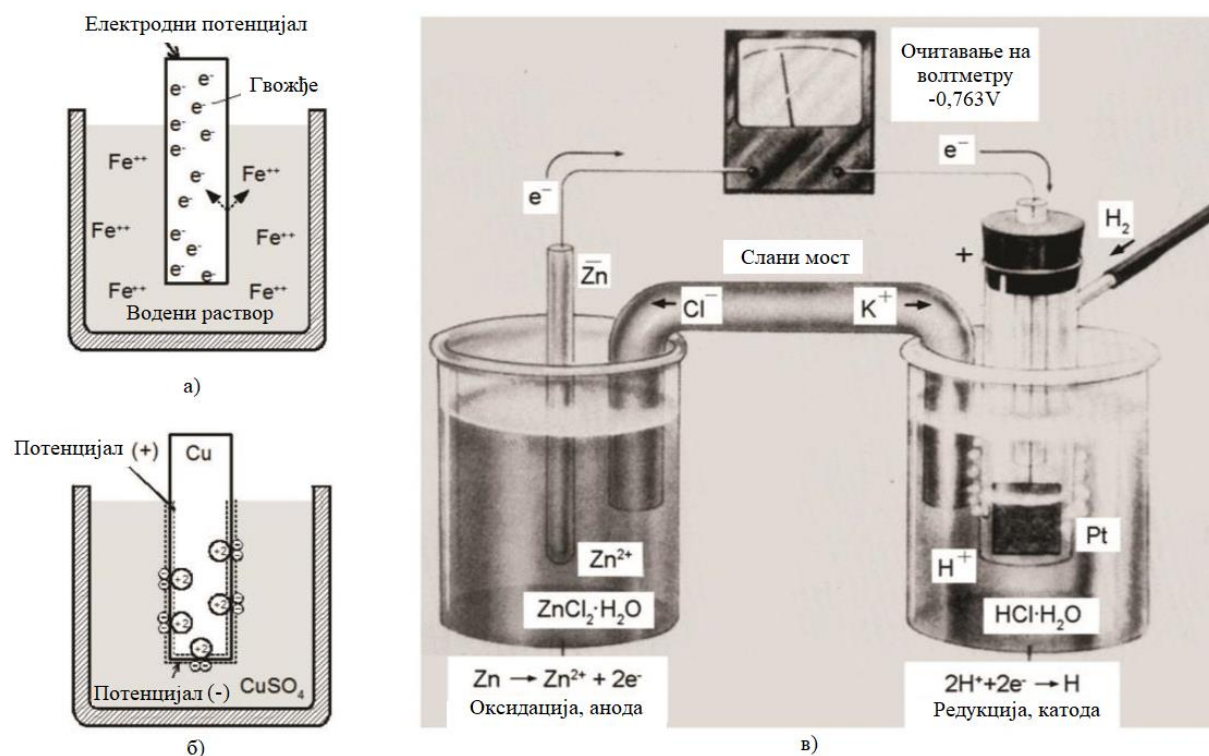
Дакле, Пурбеов дијаграм представља корелацију потенцијала метала, у овом случају гвожђа, pH раствора, производа растворљивости тешко растворљивих хидроксида односно, оксида и концентрације слободних јона метала. Једновремено испрекиданим линијама су назначене вредности потенцијала кисеоничне и водоничне реакције. Поједина назначена поља означавају вредности потенцијала и pH-вредности при којима је назначен облик метала или једињења стабилан.

На пример, хоризонтална линија означава вредност електродног потенцијала електроде од гвожђа у растворима фери јона за целу област pH у којима су фери јони стабилни. При вишим вредностима pH или позитивнијим потенцијалима, стабилан је хидроксид гвожђа или његов оксид, што прекрива металну површину и гвожђе прелази у пасивни облик. Коса изломљена линија означава водоничну электроду, која у спрегу са гвожђем образује корозивни спрег, па стога област између ове линије и хоризонталне линије потенцијала гвожђа обухвата област активне водоничне корозије гвожђа. Слично овоме, област између изломљене линије и хоризонталне линије за потенцијал гвожђа означава област активне кисеоничне корозије гвожђа. Ове области нестабилног понашања гвожђа су обојене. Обојена је и мала област при pH-вредностима већим од 12, због тога што се у тим условима као растворна јонска врста јавља комплексни јон ферата. Овај дијаграм јасно показује да ће у присуству кисеоника у области потенцијала метала и pH раствора, означеној шрафираним површином, гвожђе да кородира, док ће у одсуству кисеоника кородирати, ако је потенцијал у области између водоничне линије и потенцијала гвожђа. Овакви дијаграми постоје за све метале у воденим растворима за различите температуре, као и за корозију у случају када су други корозивни агенси у питању, нпр. водоник-сулфид, угљен-диоксид.

2.1.2.1 СТАНДАРДНИ ЕЛЕКТРОДНИ ПОТЕНЦИЈАЛ

Мања или већа склоност појединих метала према електрохемијској корозији може се проценити помоћу стандардног електродног потенцијала $E^0(V)$. Ако се неки метали уроне у електролит, у зависности од њиховог електродног потенцијала могу настати две различите реакције: анодна и катодна.

На слици 2.6 пример под (а) се односи на анодну а под (б) на катодну реакцију. Са површинских слојева гвоздене плочице (сл. 2.6а), валентни електрони се ослобађају, а позитивни јони Fe^{++} прелазе у електролит, све док је притисак растварања довољно висок; због тога Fe-плочица постаје негативно наелектрисана. Супротно томе, бакарна плочица уроњена у електролит (сл. 2.6б) биће наелектрисана позитивно, јер се јони Cu^{++} нагомилавају на површини, а електрони на граничној површини Cu-плочице и електролита; тако се на тој површини ствара двојни електрични слој, позитивног (Cu^{++}) и негативног наелектривања (-). Ако се слободни крајеви плочица споје жицом, електрони ће се кретати од аноде ка катоде, што се може регистровати амперметром, или се у отвореном струјном колу може измерити напонска разлика. Ипак се овако не може одредити стандардни електродни потенцијал E^0 , јер се напон између Fe и Cu непрекидно мења у току времена па се не може установити који је меродаван. Зато се стандардни електродни потенцијал неког метала (E_{Me}^0) одређује за сваки метал у односу на референтну (упоредну) електроду (сл. 2.6в); то је водоникова електрода за коју се усваја $E_{Me}^0 = 0$. Водоникова електрода у ствари је платинска плочица превучена црном платином (Pt) у праху да би се повећала активна површина и тиме олакшала адсорпција водоника под притиском. Платина има већу корозивну отпорност од било ког другог елемента па зато служи за одређивање потенцијала других метала (E_{Me}^0) који се одређују под посебним условима (чисти метали, притисак гаса $\sim 1\text{bar}$, $T=25^\circ\text{C}$, врста електролита и тсл.), што је на слици 2.5в приказано на примеру Zn ($E_{Zn}^0 = -0,763V$).



Слика 2.6 а) Анодна реакција, б) катодна реакција и ц) одређивање E_{Me}^0 (слани мост је раствор соли KCl)

У табели 2.2 је приказана листа са вредностима стандардних електродних потенцијала (E^0) разних метала. Читав интервал вредности E^0 је подељен на 5 делова са вредностима електродног потенцијала водоничне односно кисеоничне реакције при $pH=7$, односно 0 и то:

1. Од -3,04 V до -0,414 V је подручје E^0 метала чији су стандардни потенцијали негативнији од E^0 водоничне реакције при $pH = 7$. Ова је група екстремно нестабилних метала (алкални и земноалкални метали, Al, Mn, Zn, Fe, ...) који би требало да кородирају и у неутралној води због присуства H^+ јона од свега $10^{-7} \text{ g mol/dm}^3$
2. Од -0,414 V до 0 V су метали чије су вредности E^0 позитивније од E^0 водоничне реакције при $pH = 7$, а негативнији од E^0 водоничне реакције при $pH = 0$. Ова је група нестабилних метала (на пр. Cd, In, Tl, Co, Ni, Mo, Sn, Pb, ..) који не кородирају у неутралној води, али кородирају (сагласно предходној реакцији) у 1 g mol/dm^3 растворима киселина.
3. Од 0 V до + 0,815 V су метали чије су вредности E^0 позитивнији од E^0 водоничне реакције пре $pH = 0$, али негативнији од E^0 кисеоничне реакције при $pH = 7$. Ово је група стабилних метала (на пр. Bi, Sb, Cu, Hg, Ag, ...), који не кородирају у киселинама ($pH = 0$), али их напада кисеоник растворен и у неутралној води.
4. Од +0,815 V до +1,23 V су метали чије су вредности E^0 позитивније E^0 од кисеоничне реакције при $pH = 7$, али негативнији од E^0 кисеоничне реакције при $pH = 0$. Ово је група полуплеменитих метала (Pd, Ir, Pt), који не кородирају у киселинама ни у неутралним растворима који садрже кисеоник, већ само у киселим растворима који садрже кисеоник.
5. Злато је јединствени метал чија је вредност E^0 позитивнија од вредности E^0 кисеоничне реакције при $pH=0$. Зато је и злато прави племенити метал који не кородира чак ни у киселинама засићеним кисеоником. Оно се раствара само у јачим оксидирајућим срединама, као што је смеша концентрованих киселина $HNO_3 + 3HCl$, позната као царска вода.

Табела 2.2 Вредности стандардног електродног потенцијала E^0 на $25^\circ C$

I Екстремно нестабилни метали		II Нестабилни метали		III Стабилни метали		IV Полуплеменити метали		V Племенити метали	
Метал	E^0, V	Метал	E^0, V	Метал	E^0, V	Метал	E^0, V	Метал	E^0, V
Li -e	-3,04	Cd -2e	-0,40	Bi -3e	+0,22	Hg -2e	+0,85	Au -3e	+1,50
K -e	-2,92	In -3e	-0,34	Sb -3e	+0,24	Pd -2e	+0,99	Au -e	+1,68
Cs -e	-2,92	Tl -e	-0,34	Re -3e	+0,30	Ir -3e	+1,00		
Ba -2e	-2,90	Mn -3e	-0,28	As -3e	+0,30	Pt -2e	+1,19		
Ca -2e	-2,87	Co -2e	-0,28	Cu -2e	+0,34				
Na -2e	-2,71	Ni -2e	-0,25	Co -3e	+0,42				
Mg -2e	-2,37	Mo -3e	-0,20	Cu -e	+0,52				
Al -3e	-1,66	Ge -4e	-0,15	Rh -2e	+0,60				
Zr -4e	-1,53	Sn -2e	-0,14	Tl -3e	+0,72				
Mn -2e	-1,18	Pb -2e	-0,13	Pb -4e	+0,79				
Zn -2e	-0,76	W -3e	-0,11	Hg -e	+0,79				
Fe -2e	-0,44	Fe -3e	-0,04	Ag -e	+0,80				

2.2 ГЕОМЕТРИЈСКА КЛАСИФИКАЦИЈА КОРОЗИЈЕ

2.2.1 ОПШТА КОРОЗИЈА

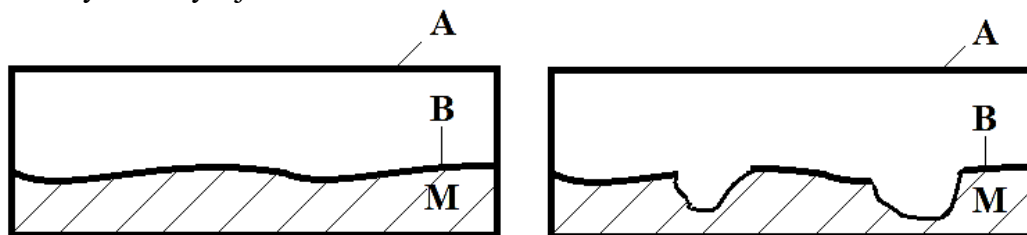
Општа корозија захвата читаву површину материјала, а може бити равномерна или неравномерна. Равномерна општа корозија технички је најмање опасан, јер се процес може лако пратити и предвидети када треба одређени део поправити или га заменити са новим. Неравномерна општа корозија је много опаснија. До опште корозије долази када је читава површина материјала изложена агресивној средини под приближно једнаким условима с обзиром на унутрашње и спољне факторе корозије.

При одабиру материјала отпорних на општу корозију, треба узети у обзир околину у којој ће се поједини метал налазити те његову подложност општој корозији у предвиђеним условима. Овај облик корозије контролише се коришћењем органских или металних превлака.

Битније карактеристике опште корозије су:

- ✓ до опште корозије долази када је читава површина материјала изложена „агресивној“ средини под приближно једнаким условима.
- ✓ За време одвијања овог вида корозије долази до замене анодних и катодних места, услед чега је растварање метала у приближно једнаким условима с обзиром на унутрашње и спољашње факторе корозије.
- ✓ овај облик корозије је знатно мање опасан од локалних видова корозије, јер омогућава лако предвиђање века трајања конструкције.
- ✓ јавља се обично на лимовима великих површина.
- ✓ јавља се код метала и легура са малим садржајем легирајућих елемената (елементи имају приближно исти потенцијал у електролиту у који су уроњени).
- ✓ процес корозије се може пратити:
 - визуелно,
 - мерењем губитка маса (g/m^2 дан) и
 - мерењем дебљине узорка ($mm/год$).

Кородирање материјала може бити равномерно и неравномерно. На слици 2.7 приказана су оба случаја.



Слика 2.7 Типови корозије материјала при равномерној (лево) и при неравномерној (десно) општој корозији А - пре корозије; В - после корозије; М – метал

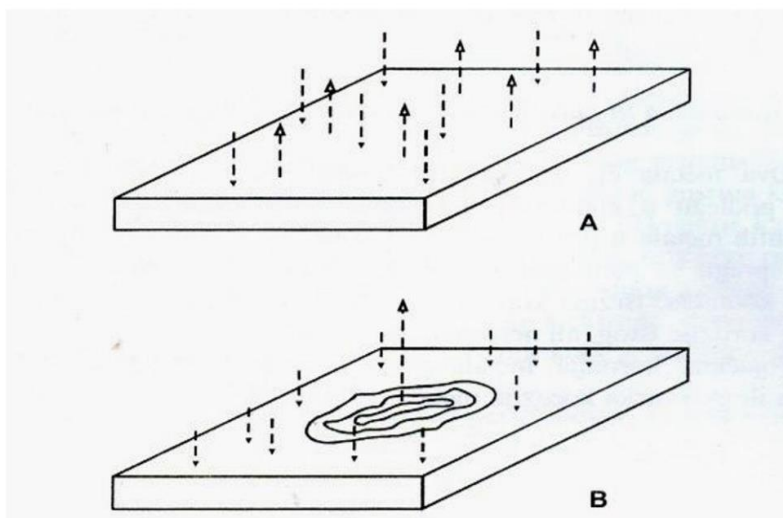
2.2.2 ЛОКАЛНА КОРОЗИЈА

Локална корозија напада само неке делове изложене површине, те је уједно и најраширенији појавни облик корозије. Као што је већ споменуто, локална корозија се може поделити на тачкасту, контактну, корозију у зазорима и интекристалну. Пегаста корозија ограничена је на поједине веће делове површине.

Опште карактеристике локалне корозије су:

- ✓ настаје при образовању одвојених корозивних спрегова на површини метала - одвојене анодне и катодне реакције. Оксидација метала се одвија на једном, редукција агенса корозије на другом, а стварање продуката корозије на трећем месту. Зато продукт не штити метал од корозије.
- ✓ анодна површина је знатно мања од катодне: губитак масе је мали, али је корозија опасна.
- ✓ изазива је неједнака концентрација кисеоника и присуство племенитијег елемента на површини метала, хемијска нехомогеност.
- ✓ често настаје на микроскопском нивоу и делује убрзано само на малом локалном подручју.

Разлика између опште и локалне корозије илустративно је приказана на слици 2.8.



Слика 2.8 Разлика између опште и локалне корозије

За део А слике 2.8 важи да су:

- ✓ анодне и катодне парцијалне струје су хомогено распоређене и
- ✓ корозивни потенцијал једнак је на било ком месту на површини.

За део В слике 2.8 важи да је:

- ✓ реакција оксидације локализована и
- ✓ није могуће дефинисати корозивни потенцијал за целу површину метала.

Примери локализоване корозије су: влакнаста, јамичаста (енг. pitting) , корозија у зазорима.

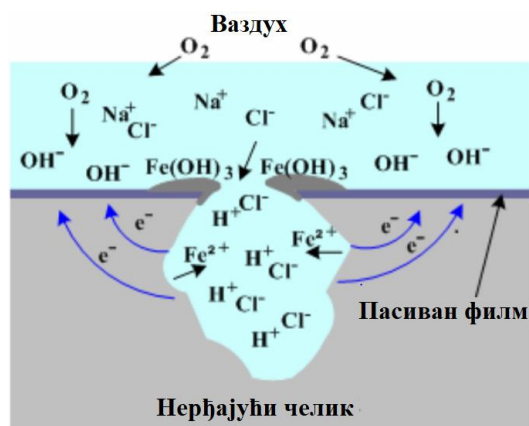
2.2.2.1 ТАЧКАСТА (РУПИЧАСТА) КОРОЗИЈА

Тачкаста (рупичаста) корозија је уско локализовани облик корозије која настаје када електролит који узрокује корозију напада материјал и узрокује настајање малих рупа. То се обично догађа на местима где је заштитна превлака пробијена услед механичког оштећења или хемијске деградације.

Тачкаста корозија је један од најопаснијих видова корозије, јер ју је врло тешко предвидети и спречити. Настаје врло брзо те продире у метал без узроковања видљивог губитка масе. Често може доћи до изненадних хаварија мада је губитак материјала незнатан. То се обично догађа на конструкцијама које су механички оптерећене.

Овакав вид корозије је тешко мерити и предвидети, јер се појављује у облику многих рупица (тачкица) са различитим дубинама и пречницима, које се не појављују под одређеним специфичним условима. Нерђајући челици су најподложнији рупичастој корозији међу металима и легурама. Рупице се на нерђајућем челику појављују у морској води, у околини која садржи високе концентрације хлора и брома.

Полирањем површине нерђајућег челика може се повећати отпорност према рупичастој корозији. Такође, добар učinak на отпорност рупичастој корозији постиже се легирањем Cr, Mo и Ni. Исправан избор материјала је изузетно важан у превенцији појаве рупичасте корозије. Један од начина провере одабраног материјала је и тестирање, односно излагање материјала околини. Такође, могуће је постићи смањење склоности ка рупичастој корозији, смањењем агресивности корозивне околине. На слици 2.9 приказана је схема образовања и раста јамица.



Слика 2.9 Схема образовања и раста јамица

Унутар јамица одвија се убрзано растварање метала (анодни процес) док се ван јамице врши редукција O_2 (катодни процес). Карактеристике, рупичасте корозије су:

- ✓ овакав тип корозије је тешко детектовати (мале јамице на површини а дубоке испод површине и могу бити покривене);
- ✓ рупице које настају на површини обично су скривене слојем корозивних продуката који не штите метал од корозије. Зато, понекад, оваква корозија остаје неоткривена све док не дође до перфорације металног дела;
- ✓ Рупице се лакше детектују на попречном пресеку.

Пример изгледа јама на површини метала приказан је на слици 2.10 док су различити облици јама на попречном пресеку приказани на слици 2.11.



Слика 2.10 Схема образовања и раста јамица



Слика 2.11 Различити облици јамица на попречном пресеку

Раширеност и склоност тачкасте корозије је карактеристична код:

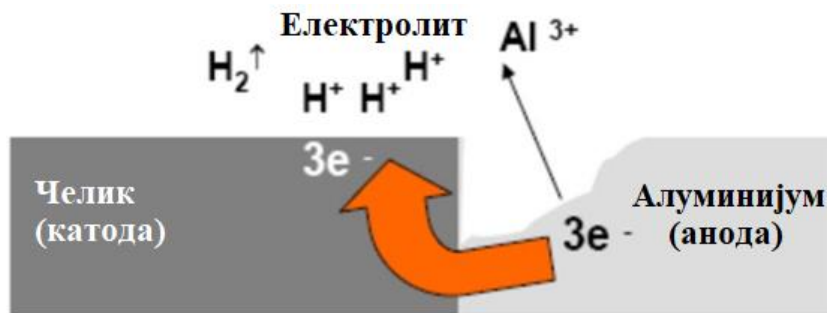
- ✓ племенитих превлака, на површини прекривеној честицама прашине, каменцем, продуктима корозије, алгама, металима склоним асивирању и
- ✓ код нерђајућих челица, легуре Al и легуре Cu. Код нерђајућих челика, за смањење тачкасте корозије се додају Cr, Mo и Ni, а код легура Al, додаје се Mg и Mn.

2.2.2.2 КОНТАКТНА КОРОЗИЈА

Контактну корозију можемо поделити на галванску контактну корозију која се јавља при додиру (контакту) два различита метала, потом на пукотинску контактну корозију при додиру два дела од истог метала или метала и неметала. Галванска корозија се јавља када су два метала са различитим електродним потенцијалима електрично повезани уструјно коло, било физичким контактом или кроз средину која проводи електрицитет. Састав који задовољава наведене услове ће формирати електрохемијску ћелију која ће проводити струју. Електрична струја тада одвлачи електроне од једног метала који се понаша као анода, на супротан метал – катоду која прима електроне.

Галванска корозија је највећа у близини површине где су два метала у контакту. Смањење склоности ка галванској корозији постиже се правилним одабиром материјала који имају релативно блиске корозивне потенцијале, изолацијом контакта различитих метала, тј. изолацијом анодног метала од корозивне околине.

Корозија у процепу (зазору) слична је тачкастој корозији. Смањење склоности ка корозији у процепу постиже се избегавањем уских зазора при конструисању, избегавањем настанка наслага, катодном заштитом, избегавањем задржавања раствора и омогућавањем дренаже. На слици 2.12 приказана је схема деловања контактне корозије.



Слика 2.12 *Схема деловања контактне корозије*

Јавља се код лимова, конструкција са закивцима, заварених спојева, код аутомобила, грађевинама и тсл. На слици 2.13 дат је пример контактне корозије.



Слика 2.13 *Пример контактне корозије између поцинкованог челика (завртња и навртке) и челичног лима*

Брзина контактне корозије зависи од:

- ✓ Разлике потенцијала,
- ✓ Отпорности електролита и
- ✓ Величине анодне и катодне површине површине.

Понашање метала при контактної корозији у атмосферским условима приказано је на слици 2.14.

Ред. Бр.	Метал	У контакту са металом										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Ti	-	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
2	Cr	H	-	H	H	H	H	H	H	H	H	H
3	Ni	C	C	-	H	H	H	H	H	H	H	H
4	Cu (легује Cu)	C	H	H	-	H	H	H	H	H	H	H
5	Нерђајући челици	H/C	H	H	H/C	-	H	H	H	H	H	H
6	Нелегирани челици	J	C	C	C	C	-	H	C	C	H	H
7	Cd	J	C	C	C	C	C	-	C	H	H	H
8	Pb и Sn	C	C	H	C	C	H	H	-	H	H	H
9	Al (легује Al), без Cl	J	H	C	J	H	C	H	H	-	H	Ц
9a	Al (легује Al), са Cl	J	C	J	J	C	J	H	C/J	-	H	Ц
10	Zn (легује Zn)	J	C	J	J	C	J	C	C	C	-	H
11	Mg (легује Mg)	J	J	J	J	J	J	J	J	C	C	-

Слика 2.14 Јачина корозије у зависности од споја материјала
Где су ознаке: H – нема корозије, C – слаба корозија, J – јака корозија

На основу табеле са слике 2.14 и истраживања извршена је расподела метала по групама компатибилности (сл. 2.15).

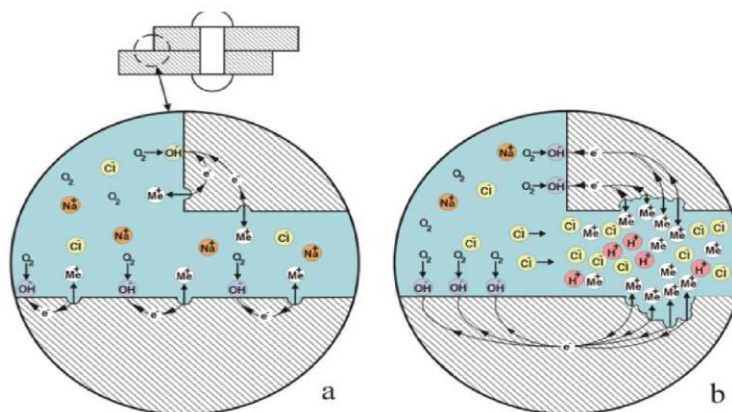
Групе				
I	II	III	IV	V
Магнезијум	Алуминијум Цинк Кадмијум	Гвожђе Угљенични челици Олово, Калај	Никл, Хром Нерђајући челици	Злато, Сребро Бакар Месинг

Слика 2.15 Расподела метала по групама

2.2.2.3 КОРОЗИЈА У ЗАГОРИМА

Корозија у зазорима настаје на месту спајања два дела који могу бити од истог или различитог материјала или код заварених спојева (нестручно изведених).

То је вид локалне корозије сличан тачкастој (рупичастој) корозији, само што анодно место није у јамици већ у зазору. У почетку, на свим деловима метала се једнако редукује кисеоник. Али врло брзо се смањује довод кисеоника и инхибитора корозије до места у зазору и отежава се одвођење јона метала из зазора. Зато површина метала у зазору постаје анодна у односу на површине око зазора. Пример настанка и прогресије корозије у зазорима приказан је на слици 2.16.



Слика 2.16 Настанак и прогресија напонске корозије

Корозија у зазору је сродна рупичастој корозији, само што уместо тачкица (рупица) има зазор. Између два конструкциона елемента (процепа) настаје разлика у концентрацији електролита (најчешће кисеоника у електролиту).

Корозија метала је обично интензивнија на малим заштићеним местима у зазору где се два метала спајају. Други материјал може бити део (прирубнице, споне, навртке итд.) истог или различитог метала, силоси песка и тсл.

Ако је зазор створен на два различита метала или ако је талог проводљив (нпр. магнетит или графит), корозија у зазору може бити појачана галванским ефектима. Корозија у зазору може бити узрокована и атмосферским условима, нпр. задржавање воде, док се остатак површине исцеди и осуши (сл. 2.17).



Слика 2.17 Корозија у зазору испод изолационе цеви на цеви од нелегираног челика

2.2.2.4 МЕЋУКРИСТАЛНА КОРОЗИЈА

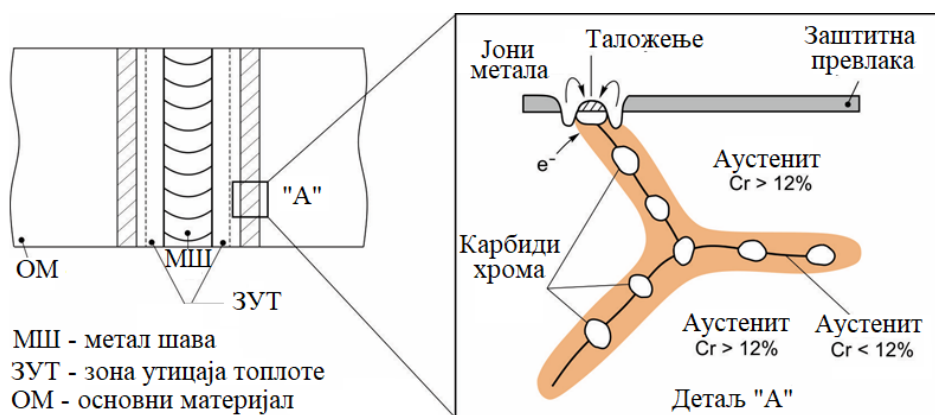
Међукристална (интеркристална) корозија разара материјал на границама металних зрна ширећи се на тај начин у дубину метала (легура). Та врста корозије углавном се појављује код легура. Интеркристална корозија је најопаснији облик корозије, јер може дуго остати незапажена, а заправо нагло смањује јачину и жилавост материјала. Коначна последица интеркристалне корозије јесте лом или чак распад материјала. Најчешће захвата нерђајуће челике, легуре на бази никла и алуминијума и тсл.

Границе зрна представљају потенцијална места за издвајање неметалних једињења, интерметалних фаза и нечистоћа. Оне се хемијски и физички разликују од унутрашњости зрна (најчешће су те зоне анодна места). Зато долази до селективног раздвајања границе зрна и уске зоне око границе зрна.

Интеркристална корозија код нерђајућих челика (Cr-Ni) се одвија зато што границе металних зрна разлажу карбиде Cr (долази до миграције хрома). Тиме границе металних зрна бивају осиромашене хромом и постају аноде, зато што хром излази из чврстог раствора и пада испод граничне вредности од 12% (из електропозитивности прелази у електронегативност, сл. 2.18). На слици 2.19 приказан је пример такве корозије.



Слика 2.18 Зависност стандардног потенцијала хромових челика од садржаја Cr у чврстом раствору гвожђа



Слика 2.19 Међукристална корозија код нестабилизованог нерђајућег челика

Овај тип корозије је веома опасан, зато што се тешко запажа, јер не изазива промене на површини метала. Корозија продире у дубину дуж граница зрна, чиме се смањује чврстоћа и жилавост метала.

Коначна последица међукристалне корозије јесте лом или чак распад материјала по границама металних зрна.

Услови настајања интеркристалне корозије јесу:

- ✓ када се челик обрађује у топлом стању, кад се изводи термичка обрада или се изводи спајање заваривањем, као и
- ✓ излучивањем неметалних једињења по границама зрна.

У закључку се може истаћи да су на располагању четири начина за спречавање међукристалне корозије нпр. при заваривању аустенитних нерђајућих челика:

- брзо хлађење воденим млазом одмах после заваривања (спречава се дифузија хрома ка границама зрна),
- употреба аустенитног челика стабилизованог титаном или ниобијумом који имају већи афинитет према угљенику него хром, те се они сједињују са угљеником, а хром остаје у легираном аустениту у количини изнад 12%,
- употреба челика са садржајем угљеника испод 0.03% ("безугљенични челик") и
- накнадно прекристализационо жарење целе заварене конструкције - загревање изнад 870°C (најчешће око 1150°C), прогревање сразмерно дебелини док се растворе карбиди хрома и добије 100%-на структура легираног аустенита; најзад се заварени спој брзо хлади да би се хром задржао у чврстом раствору α -гвожђа (тзв. "гашење").

2.2.3. СЕЛЕКТИВНА КОРОЗИЈА

Селективна корозија је ређи облик корозије при којој је нападнут један елемент металне легуре при чему настаје промена структуре и састава. Најчешћи облик селективне корозије је осиромашење цинка из легуре Cu-Zn (месинг). Настаје када цинк мигрира из месинга или било које друге легуре где цинк представља аноду. Код тако новонасталих структура не долази до значајне промене димензија, али је легура ослабљена, порозна и веома крта. Селективна корозија је веома опасан облик корозије, јер претвара чврст и дуктилан метал у слаб и крт, самим тим је подложен лому. Како нема великих промена у димензијама, селективна корозија може проћи незапажено и изазвати изненадну хаварију.

У најкраћем, селективну корозију карактеришу:

- ✓ Селективно растварање једне или више фаза у легури.
- ✓ Фазе имају различите положаје у галванском низу.
- ✓ У присуству електролита, мање племенита (анодна) фаза бива селективно растворена.
- ✓ У растворима, растопима соли и метала, гасовима на високој температури легура постаје порозна и губи своја најважнија својства (механичка, физичка, хемијска, технолошка и тсл.).
- ✓ Дубина растварања се може мерити на попречном пресеку узорка (микроскопом).
- ✓ Селективна корозија може бити довољан услов за почетак напонске корозије.

Типични примери селективне корозије приказани су на слици 2.20.



а) б)
 а) Растварање Zn из месинга; б) Раств. Fe из сивог ливеног гвожђа (3% C)
Слика 2.20 Типични примери селективне корозије

2.3 ПОСЕБНИ ВИДОВИ КОРОЗИЈЕ

2.3.1 НАПОНСКА КОРОЗИЈА

Напонска корозија (НК) (енг. SCC – Stress Corrosion Cracking) јесте селективни облик корозије која настаје у инжењерским материјалима због истовремених дејства околине, експлоатације, механичких напрезања и корозивних реакција.

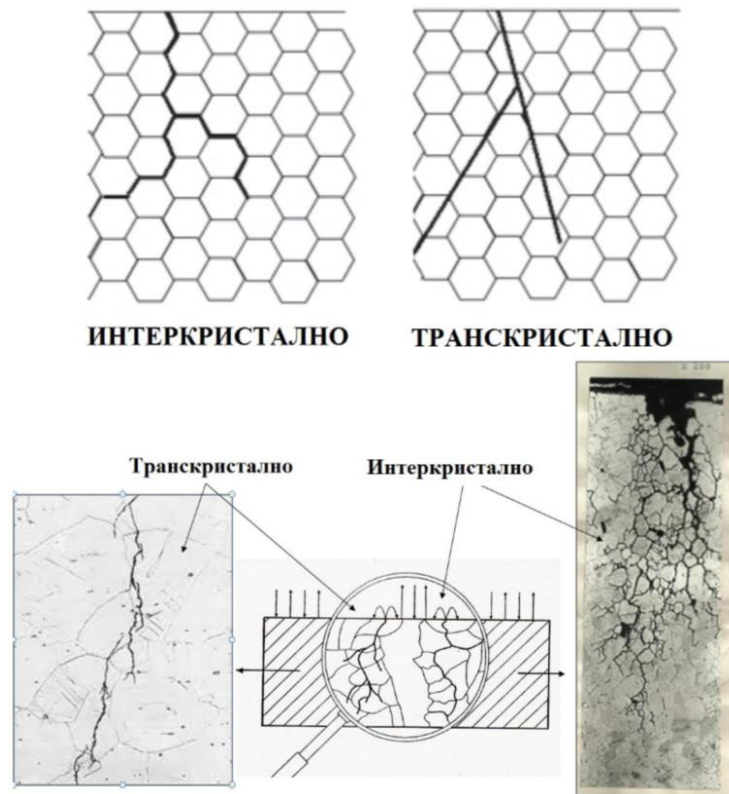


Слика 2.21 Фактори који утичу на појаву напонске корозије

Уопштено посматрано, корозија изазвана комбинованим утицајем средине и напрезања може се представити као напонска корозија, корозивни замор и водонична корозија. Напонска корозија представља вероватно најсложенији облик корозије, јер истовремено укључује неколико независних фактора (сл. 2.21), а као резултат често доводи до катастрофалних ломова и великих штета.

Напонска корозија и ломови проузроковани напонском корозијом најчешће настају истовременим деловањем два утицаја - механичког и електрохемијског, а често потпомогнутим и трећим фактором - водоником када настаје водонична кртост. Генерално посматрано, корозија изазвана комбинованим утицајем средине и напрезања може се сматрати напонском корозијом, корозивним замором и водоничном корозијом.

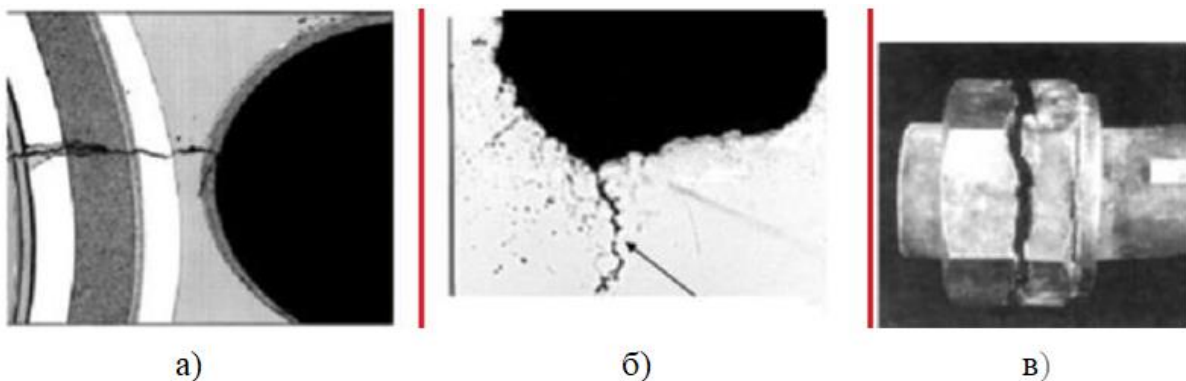
Напонску корозију више изазивају затезна заостала напрезања (унитрашњи напони) него спољна напрезања и углавном су последица заосталих напона због прераде на хладно или заваривања, у средини у којој је повишена температура, повећан притисак и у присуству опасних раствора који садрже халогене, хлориде алкалних метала, водоник, сулфиде и тсл. Прслине напредују управно у односу на смер затежуће силе, а шире се како интеркристално тако и транскристално (сл. 2.22).



Слика 2.22 Начин ширења пукотине код напонске корозије

Иако се напонска корозија најчешће везује за нерђајући челик, ова врста корозије се јавља и у другим материјалима и њиховим легурама, као и у техничким материјалима као што су полимери, стакло, керамика итд.

Везано уз материјале код којих се појављује, као и за механизме у којима настаје, напонска корозија је добила и посебна имена као што је нпр. *SSC - Sulphide Stress Cracking*, за напонску корозију која настаје истовременим деловањем сумпор-водоника (H_2S) и затежућих напона; "сезонско пуцање" - назив за напонску корозију у агресивној околини амонијака. На слици 2.23 приказани су примери ломова материјала услед напонске корозије.



Слика 2.23 Примери ломова материјала услед напонске корозије

Корозивни процеси који изазивају напонску корозију тешко су уочљиви, а најчешће се јављају за време експлоатације. Резултирају великим губитком механичке чврстине и каснијим и ломом, а све то уз мали губитак масе материјала. За појаву и настанак напонске корозије морају се испунити три услова:

1. Да је материјал склон напонској корозији,
2. Да је агресивна средина која у комбинацији са материјалом одговара настанку напонске корозије и
3. Да постоје унутрашњи и спољашњи напони у делу.

Напонска корозија је релативно је релативно ретка појава (због услова истовременог деловања споменутих фактора), али штете које настају њеним деловањем могу бити великих размера. На слици 2.24 приказани су чиниоци напонске корозије на примеру дејства исте у зони утицаја топлоте.



Слика 2.24 Узрочници напонске корозије

Процес напонске корозије можемо поделити у четири главне фазе:

1. Инкубација,
2. Настанак иницијалне прслине,
3. Раст (пропагација) прслине и
4. Лом.

Много је механизма који утичу на настанак и развој напонске корозије, али их можемо поделити у две главне групе:

1. Анодни механизми и
2. Катодни механизми.

У самом процесу напонске корозије делују истовремено оба механизма, а резултат ширења прслине се повезује са једним од њих. Механизми који у интеракцији са материјалом узрокују напонску корозију, а тиме и коначан лом, као последњу фазу овог типа корозије, могу бити следећи:

- ✓ апсорпција електролита у материјал,
- ✓ реакција површине материјала,
- ✓ реакције у насталој прслини материјала и тсл.

Споменути механизми засебно нису довољни за настанак и ширење напонске корозије. Они захтевају међуделовање с разним хемијским процесима и реакцијама који директно утичу на брзину ширења прслине. Појавом већег броја механизма као и процеса и реакција које погодују напонској корозији, брзина ширења (пропагације) напонске корозије ће бити интензивнија.

Споменуте реакције и процеси којима је одређена вредност и брзина пропагације прслине при настанку напонске корозије су:

- ✓ напрезање,
- ✓ реакције раствора,
- ✓ површинска апсорпција на самој прслини или уњеној околини,
- ✓ површинска дифузија,
- ✓ површинске реакције,
- ✓ запреминска апсорпција,
- ✓ запреминска дифузија у пластичној зони пре настанка прслине,
- ✓ хемијске реакције,
- ✓ величина међуатомских празнина и тсл.

Из ових процеса и реакција видљиво је да околина експлоатације има велики утицај на настанак и ширење напонске корозије преко следећих параметара, као што су:

- ✓ температура,
- ✓ притисак,
- ✓ врста раствора,
- ✓ концентрација раствора и његова активност,
- ✓ рН- вредност,
- ✓ електродни потенцијал,
- ✓ вискозност раствора,
- ✓ мешање и тсл.

Мењајући било који од споменутих параметара, процес настанка и ширења напонске корозије могуће је убрзати, успорити или зауставити. Од механизма важно је истакнути три најважнија који су најчешћи узрок напонске корозије:

1. Активно подручје разарања,
2. Водонична кртост и
3. Разарање површинског слоја (превлаке).

Напонска корозија није неизбежан и непредвидив процес, а за већину метала у већини окружења неће се ни појавити. Из тог разлога могуће је идентификовати специфичне комбинације метала и околине (окружења) које могу бити проблем напонске корозије.

Водонична кртост се јавља као пластична деформација легура које су у контакту са водоником. Изазвана је дифузијом атомог водоника у метал чиме се смањује пластичност, односно повећава се кртост материјала. Дифузија водоника може се спречити легирањем челика хромом.

2.3.2 ЕРОЗИОНА КОРОЗИЈА

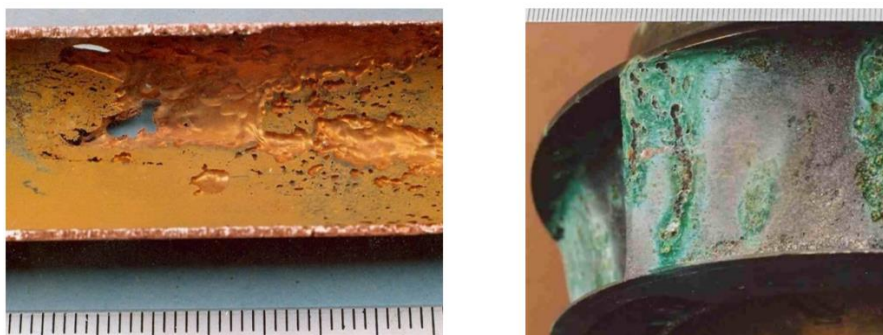
Ерозиона корозија је пример истовременог деловања хемијског (корозије) и физичког (ерозије) оштећења материјала. Ерозија је механички потпомогнут процес губитка материјала, а дефинише се као прогресиван губитак материјала с површине конструкције због механичког међуделовања површине и ерозионог окружења. У случају деловања у агресивном (корозивном) окружењу долази до појаве ерозионе корозије што је чест случај у системима за пренос флуида. Оштећења тада врло брзо настају чак и кад је корозивност средине врло мала. Разлог томе је међусобно синергијско деловање корозије и велике брзине струјања течности (често локално) што посебно може бити опасно у погонима за транспорт и прераду запаљивих материја где оштећење може довести до велике хаварије (сл. 2.25).



Слика 2.25 Последица ерозионе корозије приликом оштећења цевовода за транспорт нафте

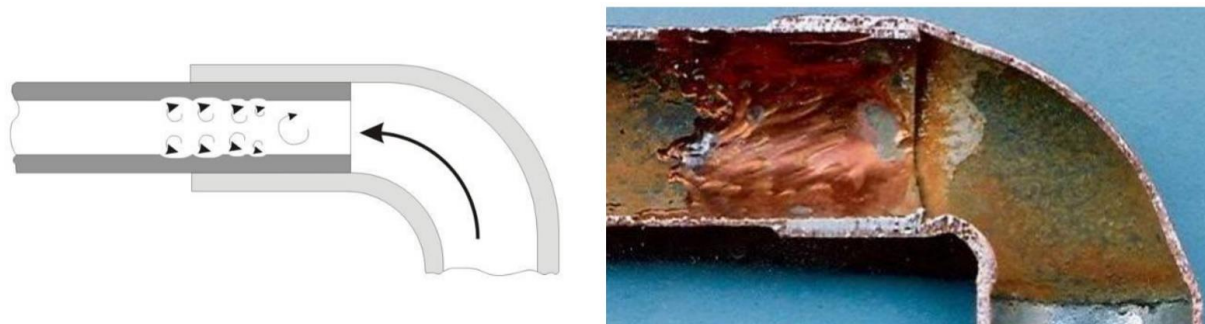
Ерозија скида заштитне превлаке са површине материјала у облику отопљених јона или димензионално стабилних корозивних продуката и онемогућује њихово заштитно деловање при чему долази до излагања површине материјала корозивном деловању околине. У исто време, корозија повећава храпавост површине метала и тврди компактни метал обично претвара у мекши корозивни продукт, што додатно убрзава ерозију.

Метали који стварају релативно дебеле слојеве заштитних корозивних продуката (попут угљеничног челика) подложнији су ерозионој корозији од конвенционалних пасивних метала (попут нерђајућег челика или титана), јер је слој оксида нерђајућих метала тањи и много боље приања на површину. Меки метали попут бакра и неких легура бакра јако су подложни ерозији (сл. 2.26).



Слика 2.26 Оштећења бакарне цеви услед ерозионе корозије (лево) и разарање ротора пумпе за воду од алуминијумске бронзе (десно)

Присутво крутих честица (нпр. песка) или мехурића гаса у течности додатно повећава ризик од оштећења. У зависности од врсте метала, својстава ерозионих честица (облик, тежина, тврдоћа, густина распршених честица), брзине и агресивности флуида, као и појаве турбуленције (локалног убрзавања струјања флуида) ерозиона корозија манифестује се у облику потковице, угриза, бразди или удубљења након наслага или рупица. Сви облици оштећења површине увек су оријентисани у смеру протока флуида (сл. 2.27).



Слика 2.27 Оштећење бакарног цевовода услед ерозионе корозије – оштећења су оријентисана у смеру протока флуида

Уколико на ерозионо оштећеној површини нема наслага и корозивних продуката знак је да се ерозиона корозија појавила недавно. Ипак, није увек могуће на темељу изгледа закључити да ли је реч о ерозионој корозији или чистој ерозији. То највише зависи од локалних услова као што је састав флуида.

Посебни облик ерозионе корозије је „*Attack*“ корозија која је последица напада на материјал капљицама воде из агресивног флуида (мокра пара, двофазни гасови) на местима где долази до промене смера струјања, а узрокује локално јаку ерозиону корозију у облику тачкасте/рупичасте корозије (питинга). Капљице воде које су много гушће од гаса (двофазног) при скретању струјања због инерције продужују равно, ударају у зидове цеви и еродирају је. Додатно, уз зидове се ствара један стални филм воде (хемијски агресивне) што придоноси иницирању електрохемијског корозивног процеса.

Такође, поменути „*Attack*“ корозију могу изазвати и гасни мехурови у течности. Континуирано деловање (удари) таквог флуида на материјал конструкције резултују замором површине при чему на површини или испод површине се јављају прслине/пукотине које се поступно шире што доводи до откидања материјала са површине остављајући трагове трошења начешће у облику јамица.

2.3.3 МИРКОБИОЛОШКА КОРОЗИЈА

Микробиолошка корозија (скраћено **MIC** од енгл. *Microbially Influenced Corrosion*) подразумева процес корозивног разарања уз активно деловање микроорганизама у самом процесу корозије. Притом је потребно нагласити да микробиолошка корозија није нека нова засебна форма – облик корозије, већ процес којим се биолошким путем стварају погодни услови за одвијање „класичних“ корозивних процеса. Најчешће **MIC** процеси имају карактер неког од локалних корозивних феномена попут тачкасте/рупичасте корозије или корозије у зазору, а могу настати као резултат метаболичких процеса разноврсних микроорганизама и то најчешће различитих врста бактерија.

Код микробиолошке корозије стога се „класични“ двокомпонентни корозивни систем метал – околина претвара у неочекивани, изузетно агресивни трокомпонентни систем метал – околина – биофилм (продукти живота микроорганизама). На слици 2.28 приказане су фазе настанка микробиолошке корозије.



а) Почетак стварања биофилма; б) Раст биофилма; в) Потпуно формиран биофилм и формирана корозијска жаришта

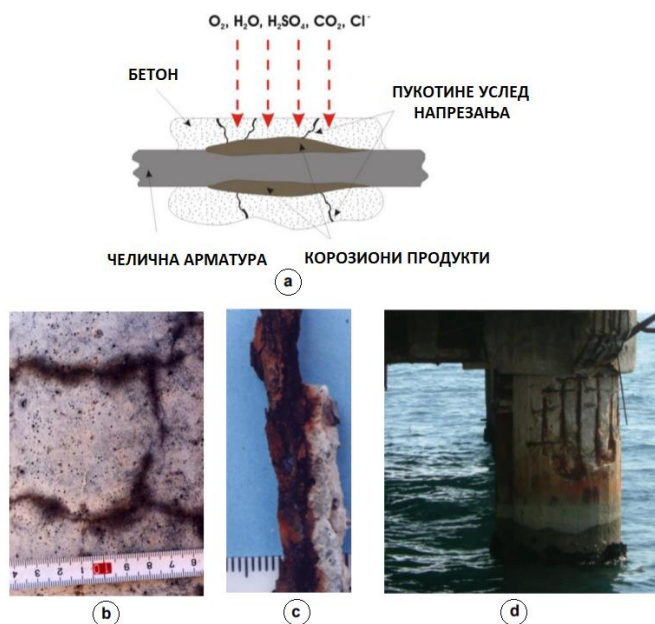
Слика 2.28 Процес стварања биофилма

Микроорганизми најчешће стварају комплексне заједнице у којима могу егзистирати и битно различите врсте микроорганизама које се уобичајено називају биофилмом. Настанком биофилма се стога значајно мења гранична фаза између метала и околине који га окружује и у коме најчешће не би дошло до појаве никаквих значајнијих корозивних оштећења. Биолошком активношћу могу настати тзв. електрохемијски парови/чланци (нпр. тзв. чланци диференцијалне аерације испод бактеријских заједница – биофилма у којима је смањен удео и доступност кисеоника), или чланци настају услед локалне промене у саставу електролита или рН-вредности. Осим тога, услед метаболичких процеса може доћи до настанка врло корозивне средине (попут нпр. сулфатне киселине, органских киселина или азотне киселине) у којима поједини метали нису корозивно отпорни. Микроорганизми могу деловати и на процесе активације корозивног члана - нпр. поједине бактерије апсорбују у својем метаболизму водоник настао катодним процесом подстичући тиме одвијање целокупног процеса корозије. Тако на пример делују анаеробне сулфат бактерије. Осим тога, поједине врсте бактерија могу продуктима свог метаболизма померити корозивни потенцијал неког метала у позитивном смеру и то чак до изнад границе потенцијала потребног за појаву рупичасте корозије. Тај феномен назива се активација анодним померањем потенцијала. На пример код нерђајућих Cr-Ni челика изложених деловању природне воде може довести до озбиљних рупичастих корозионих оштећења услед биоминерализације мангана којом настаје MnO_2 који је изузетно јак оксиданс.

2.3.4 КОРОЗИЈА У БЕТОНУ

Проблем пропадања армираних конструкција због процеса корозије челика за армирање бетона врло је озбиљан и има велике економске последице. Новоуграђени бетон због своје алкалности чини површину арматуре пасивном и спречава корозију. Међутим, ако се рН-вредност воде у бетону смањи, долази до депасивизације површине челика, односно појаве корозије. То се догађа као последица продора јона хлорида из околине у бетон или због реакције са атмосферским CO_2 (карбонизација).

Продукти корозије заузимају већи обим него челик, што узрокује напрезања у бетону. Ако су напрезања у бетону већа од јачине/чврстоће бетона, резултат је његово пуцање и љускање коре бетона. На местима стварања прслина долази до појачаног продора јона хлора и повећане дифузије кисеоника и угљен-диоксида. То даје главни допринос смањивању рН-вредности воде и узрокује даље разарање пасивног филма ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) који је почетно штитио челик. На тај начин долази до убрзаног ширења корозије. На слици 2.29 дат је пример таквог вида корозије.



a – схематски приказ механизма корозије, b – пукотине у бетону услед корозије арматуре, c – оштећена челична арматура моста, d – одломљивање бетона услед корозије арматуре на уроњеном носивом стубу
Слика 2.29 Корозија челичне арматуре у бетону

Фактори који поспешују корозију у бетону су:

1. Губитак базности због једињења угљеника,
2. Смањење базности узроковано хлоридима,
3. Пукотине узроковане механичким оптерећењем,
4. Лутајуће струје,
5. Корозија челичне арматуре услед атмосферског загађења,
6. Пуцање бетона услед влаге,
7. Однос цемента и воде,
8. Ниска затезна јачина бетона,
9. Електрични контакт на различитим металима,
10. Корозија узрокована разликама у окружењу и тсл.

3. ПОНАШАЊЕ МЕТАЛА У КОРОЗИВНИМ СРЕДИНАМА

Корозивно понашање метала је свакако један од најважнијих критеријума за избор материјала металне конструкције. Материјали према корозивном понашању могу бити имуни (ако не кородирају, јер не постоји афинитет за процес корозије), активни (ако кородирају) и пасивни (ако врло споро кородирају због снажног кочења процеса корозије). У поглављу 2.1.2 су детаљније објашњена поменута стања.

3.1 ЛЕГУРЕ ГВОЖЂА И УГЉЕНИКА - ЧЕЛИЦИ

Легуре гвожђа које садрже мање од 2% угљеника називају се угљенични челици. Нискоугљенични челик садржи између 0,05 и 0,29% угљеника. Својствима је близак чистом гвожђу, а главни недостатак му је немогућност постизања високе тврдоће, јер је онемогућено каљење. Нискоугљенични челик је због своје релативно ниске цене и добрих механичких карактеристика најзаступљенији од свих врста челика. Различити облици корозије челичних цеви су приказани на слици 3.1.



Слика 3.1 Различити облици корозије челичних цеви

Нискоугљенични челици

Нискотемпературско жарење нискоугљеничних челика доводи до равномерног издвајања карбида гвожђа (цементита), што смањује концентрацију угљеника на границама зрна, па према томе повећава отпорност челика према напонској корозији. Дуже жарење, или повећање температуре жарења доводи до настанка напонске корозије. У хлоридним растворима, нарочито у присуству једињења која спречавају рекомбинацију водоника (на пример) код ових челика долази до напонске корозије појавом механизма локалне водоничне кртости. При томе повећање јачине/чврстоће челика изазива смањење отпорности према напонској корозији.

До напонске корозије ових челика долази у специфичним корозивним срединама као што су кључали раствори хидроксида, нитрата или карбоната. У тим растворима челик се налази у пасивном стању, а уколико су границе зрна у активном стању може доћи до напонске корозије. Утврђено је да су за напонску корозију ових челика главни узрочници сегрегације (издвајање) нечистоћа по границама зрна, пре свега једињења сумпора и водоника, а не излучивање карбида. Веома су склони напонској корозији челици који садрже мање од 0,1% С. Карактеристични услови у којима долази до корозије нискоугљеничних челика дати су у табели 3.1.

Табела 3.1 Услови у којима долази до корозије нискоугљеничног челика

Карактеристични услови корозије нискоугљеничног челика
Изражавање гасовима који садрже водоник при температури већој од 250°C
Концентрисане киселине
Врући концентрисани базни раствори (NaOH, KOH) при pH ~14
SO ₂ , ZnSO ₄ , MgSO ₄ , H ₂ S, MgCl, Na ₂ CO ₃
KCl, хлоридни раствори и влажан хлор
Атмосфера, тло, вода и водене соли које нису испуњене инхибиторима

Нерђајући челици

Најпознатији аустенитни нерђајући челик је 18-8 Cr-Ni челик. Држањем овог челика у температурском интервалу од 500 до 800°C, или спорим хлађењем кроз тај температурски интервал, долази до издвајања карбида хрома по границама зрна и осиромашења чврстог раствора хромом уског граничног слоја испод нивоа потребног за образовање пасивног слоја на том челику (Cr<12%). Тако осиромашени челици хромом су склони међукристалној (интеркристалној) корозији, а у неким срединама и напонској корозији.

Смањењем садржаја угљеника у челику (испод 0,03% С) или додатак челику Ti или Nb (који вежу С у карбиде) излучивање хрома се у знатној мери смањује (тзв. стабилизовани челици). Стабилизовани 18-8Cr-Ni аустенитни челици ипак подлежу напонској корозији у растворима хлорида, при чему прслина расте интеркристално. Додатак молибдена (Mo) овим челицима појачава корозивну отпорност пасивног слоја, па су тако челици легирани молибденом отпорнији према питинг корозији и корозији у зазорима.

До напонске корозије аустенитних челика долази у хлоридним растворима на повишеним температурама, у присуству кисеоника, чак иако су ти челици стабилизовани. Отпорност према напонској корозији се повећава повећањем садржаја легирајућих елемената. Код неких аустенитних Cr-Ni челика који не садрже довољну количину елемената за стабилизацију аустенитне структуре (нпр. Ni), под одређеним условима долази до трансформације аустенитне у мартензитну структуру, на пример, због пластичне прераде хладним деформисањем.

Мартензитна структура је подложна напонској корозији по механизму локалне водоничне кртости. До напонске корозије аустенитних нерђајућих челика долази и у концентрованим растворима натријум-хидроксида на повишеним температурама. При томе прслина расте транскристално. Дакле, до напонске корозије ових челика (како у раствору хлорида, тако и хидроксида) не долази на температурама испод 60 до 80°C.

Стабилизирани аустенитни Cr-Ni челици су склони напонској корозији у растворима полиотионских киселина (*eng. Polythionic acid*) H_2SxO_6 на собној температури. У тим растворима је олакшано растварање граничних области осиромашених хромом који олакшава апсорпцију водоника у челик.

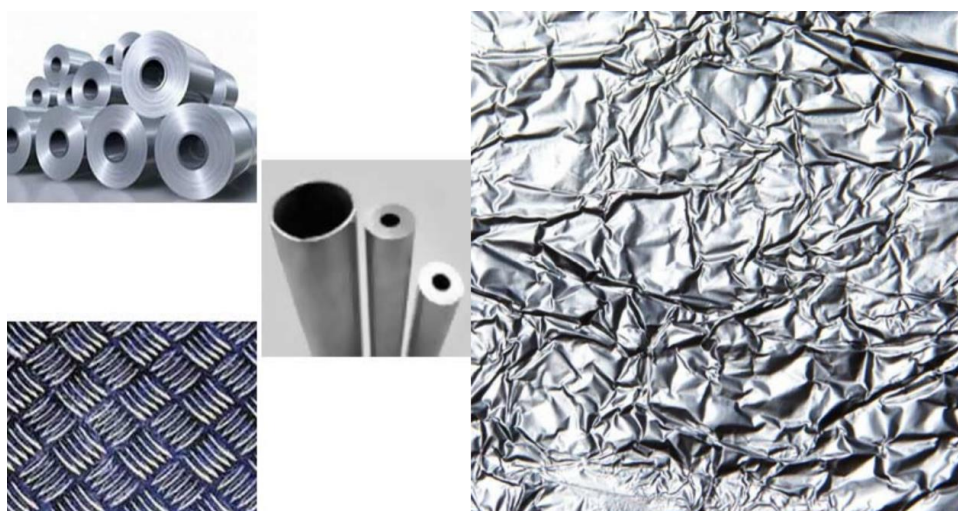
3.2 АЛУМИНИЈУМ И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ

Алуминијум (сл. 3.2) је метал сребрнкасто-беле боје, веома је лаган и после челика он и његове легуре имају највећу примену у техници. Алуминијум се у атмосферским условима брзо „превлачи“ (пасивизира) слојем оксида Al_2O_3 који га штити од даље корозије. Чист алуминијум је мекан те се због тога прерађује на хладно, термички преципитационо ојачава и легира, најчешће багром, силицијумом, хромом, манганом, цинком и другим металима. Недостатак легура алуминијума у односу на чист алуминијум јесте већа склоност корозији.



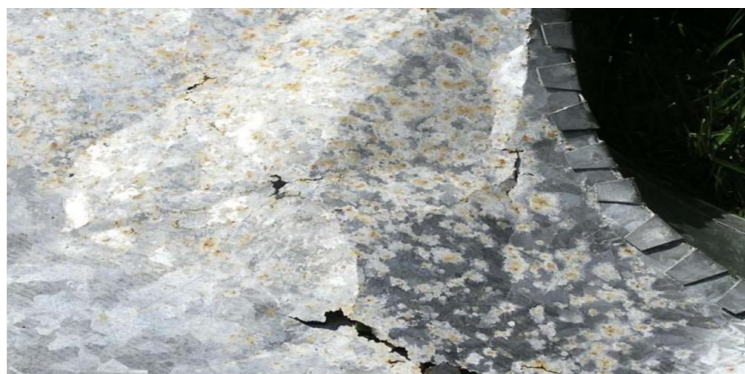
Слика 3.2 Изглед алуминијума

Употребљава се за израду електричних проводника, у грађевинарству, у аутомобилској индустрији, у прехранбеној индустрији и за израду амбалаже.



Слика 3.3 Примери примене алуминијума

Отпорност алуминијума према корозији зависи од заштитног оксидног слоја (филма), који настаје у влажној атмосфери, у слаткој води и у оксидишућим анјонским растворима (нитрати, хромати...). Алуминијум је зато отпоран према атмосферској корозији, у слаткој и дестилованој води, у неутралним електролитима који садрже кисеоник, а немају растворене активне анјоне, као што су хлориди, или катјоне тешких или племенитих метала. Пример корозије алуминијума је приказан на слици 3.4.



Слика 3.4 Пример корозије алуминијумског лима изложеног агресивној средини

Алуминијум је отпоран у хладној сумпорној киселини, затим у азотној, фосфорној, сирћетној и другим органским киселинама. Слаби алкални раствори не утичу ако су додати инхибитори. Постојан је према нафти и нафтним дериватима, као и према разним сувим гасовима. Алуминијум није отпоран према живи или у растворима њених соли, у морској води јер настаје локална корозија, у соној киселини и базама јер је изразито амфотеран метал. Други метали у електролитима лоше делују на алуминијум због његове изразите електронегативности.

Најважније легуре алуминијума настају легирањем са Cu, Mn, Mg, Cr, Si и Zn. Оне су механички чвршће, али зато мање корозивно постојане. Дуралуминијум садржи око 0,5% Mg, 3 - 4% Cu, 0,25 - 1% Mn док је остатак алуминијум. Легура је корозивно постојана. Силумин је легура са силицијумом, којег садржи 12 - 13,5%. Отпоран је према корозији. Од свих легура алуминијума, према напонској корозији су склоне легуре Al-Cu-Mg, Al-Cu-Li, Al-Mg и Al-Zn-Mg-Cu. У легуре Al-Cu-Mg спадају алуминијумске легуре високе чврстоће (нпр. дуралуминијум), које су најмање отпорне према напонској и другим видовима корозије. Са повећањем садржаја Cu отпорност према корозији се смањује.

Повећање чврстоће ових легура се остварује у првом реду термичким таложењем (преципитационим старењем). Највећу склоност према напонској корозији има легура непосредно пре достизања максималне јачине (подстарено стање), а највећу отпорност у престареном стању, када је присутна стабилна фаза алуминијума и легирајућег елемента. При недовољно брзом каљењу са температуре хомогенизационог растворног жарења, по границама зрна може доћи до издвајања честица стабилне фазе, што те легуре чини склоним према интеркристалној корозији, а тиме и локалној корозији. Повећање отпорности према напонској корозији се огледа у померању вредности критичног фактора, према вишим вредностима. У табели 3.2 приказани су карактеристични услови у којима долази до корозије алуминијума.

Табела 3.2 Карактеристични услови у којима долази до корозије алуминијума

Карактеристични услови у којима долази до корозије алуминијума
Киселине (HCl, HF, HBr, H ₂ SO ₄ , HClO ₄ , H ₃ PO ₄ , мравља киселина, ...)
Базе (NaOH, Ca(OH) ₂ и јако базни амини ³
Жива и живине соли
Морска вода
Хлоридни раствори
Врући безводни алкохол (апсолутни алкохол)

3.3 НИКЛ И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ

Никл се попут гвожђа који му је сродан, може лако полирати, ковати, заваривати, ваљати и извлачити у жицу; магнетичан је, али мање него гвожђе. Никл, као и гвожђе, може бити пирофоран, тј. имати способност да се спонтано запали на ваздуху при одређеној температури. Никл је корозивно прилично отпоран метал. Води, атмосферским условима, базама и многим органским супстанцама добро одолева, али га хлоридна, сулфатна и нитратна киселина атапају, нарочито при повишеној температури. У индустријској атмосфери превлачи се постепено смеђим, црним или зеленкастим слојем никловог базног сулфата, који га површински заштићује.



Слика 3.5 Изглед никла

На никл не делују корозивно: природна и морска вода; неутрални и алкални раствори разних соли без оксидационих својстава; сумпорна 80%-тна киселина незагрејана, врућа до концентрације 25%; хлоридна киселина при собној температури ако је испод 20%-ната; врела хлоридна киселина (0,5% - тна); чиста фосфорна киселина незагрејана; органске хладне киселине; базе при високим температурама, разређене и концентрисане, и висока температура до 1000°C у атмосфери без сумпорних једињења.

³ Амини припадају групи органских једињења која садрже најмање једну или више базних азотових атома у молекулу

На никл делују корозивно: морска вода која ствара локалну корозију ако су предмети превучени микроорганизмима; минерална вода која садржи (FeCl_3) или (CuSO_4); оксидационе соли, (NaClO), нитрати, хромати итд.; делимичне растворе киселих соли (нпр. NH_4Cl , ZnCl_2); азотна, азотна и сирова фосфорна киселина и амонијак. Никл се може легирати у практичне сврхе са гвожђем, хромом, манганом, молибденом и бакром.

Легуре никла и гвожђа

Оне садрже изнад 35% Ni и сличне су по својим корозивним особинама чистом никлу. Легуре никла и хрома. Оне имају у саставу од 60% до 80% Ni и од 12% до 20% Cr, док остатак чини гвожђе. Могу имати нешто CuCl_2 , HgCl_2 и NaClO . Легуре класе Ni-Cr легуре уједињују добра својства никла и хрома, јер већи садржај Cr побољшава корозивна својства у оксидационом медију, а већа количина Cr у редукционој средини и у присуству активних анјона (нпр. Cl^-). Ni-Cr-легуре отпорне су према хладној разређеној соној киселини и деломично у азотној киселини (испод 20% HNO_3), у врућој концентрисаној фосфорној, сирћетној и мрављој киселини, као и у базама. Нису отпорне у растворима соли FeCl_3 , CuCl_2 , HgCl_2 и NaClO . Ni-Cr легуре класе (80-20) отпорне су до 1150°C. Њихова се ватросталност (ватроотпорност) може повећати додатком мањих количина силицијума, цирконијума, калцијума и алуминијума. Најбоља антикорозивна својства имају легуре, која се примењује у САД под називом „Inconel“. Међутим, састав им се може мењати ако се са повећањем силицијума или смањењем мангана жели још више повећати отпорност према корозији. Присуство сумпора и хлора не делује корозивно. Отпорна је према нафтним киселинама и базама.

Легуре никла и молибдена

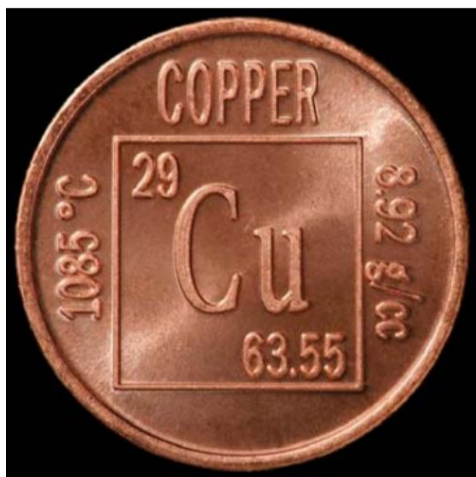
Антикорозивна својства ових легура су знатно боља од осталих легура које се употребљавају у хемијској индустрији. Називају се „Хастелој“ (енг. *Hastelloy*). Постојане су према деловању минералних киселина (HCl и H_2SO_4), као и према оксидационим супстанцама, нпр. Фери-хлориду и хлору у контакту са водом. Израђује се 5 врста ових легура, и то: А, В, С, D и F. Друге врсте легура никла са молибденом представљају легуре „Хлоримет“ (енг. *Chlorimet*), које су релативно недавно произведене. Хлоримет легуре примењују се у облику изливених делова тамо где се тражи отпорност према механичким и термичким напрезањима, као и према корозији соне и сумпорне киселине као и сланих раствора.

Легуре никла и бакра

Најважније су оне под називом монел. Отпорније су од никла у редукционом медијуму, а од бакра у оксидационом. Монел легуре садрже 63-68% Ni и 29-30% Cu, као и мање количине Fe, Mn и Si. На монел-легуре не дјелују: атмосферска корозија без сумпорних једињења, природне воде, морска вода, сумпорна киселина при собној температури (до 80%-тна) а врућа до 20%-тне концентрације, сона киселина (хладна 5%-тна), врућа 1%-тна HCl , органске киселине, базе, разни раствори соли. На монел-легуре дјелују: атмосфера ако садржи сумпорна једињења која стварају смеђи или зеленкасти заштитни филм, морска вода ако се на површини нагомилају морски организми, сирова фосфорна киселина, азотна и сумпорна киселина као и раствори оксидишућих соли. Монел легуре се употребљавају за израду завртњева, осовина, а понекад се као додатни материјал примењују за заваривање сивог лива на хладно.

3.4 БАКАР И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ

Елементарни бакар (сл. 3.6) је метал сјајне црвенкасте специфичне боје. У чистом стању је релативно мекан, али врло жилав и истегљив. Има изванредну електричну и топлотну проводљивост, добра механичка својства и уз то је корозивно отпоран у великом броју средина.



Слика 3.6 Изглед бакра

Уколико се подвргне утицају атмосфере, површински слој се пасивизира и даље га штити од оксидације. Бакар се користи за израду легираних материјала, измењивача топлоте, каблова, цеви (сл. 3.7), а више од 50% произведеног бакра се користи у електроници и електротехници.



Слика 3.7 Употреба бакра за израду каблова и цеви

Бакар је отпоран према утицају атмосферске корозије, јер на његовој површини настаје заштитни слој корозивних продуката, који садрже бакарни базни сулфат $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$. У близини мора заштитни слој се састоји од бакарног базног хлорида. У аерисаној тврдој води на бакру се ствара заштитни слој оксида бакра и хидроксида, док у меканој води кородира, нарочито ако вода садржи CO_2 . У морској води бакар кородира незнатно и његови анјони спречавају прљање метала микроорганизмима. У кондензованој води бакар је постојан према корозији.

На бакар не делује корозивно врући водоник уколико не садржи зрна Cu_2O , нити базе, осим амонијум-хидроксида. Бакар кородира у јако киселим растворима који садрже амонијак, цијанид, сулфиде, хром и др. Контакт бакра с челиком, цинком, алуминијумом и магнезијем проузрокује јаку корозију тих метала. Бакар је неотпоран и према органским сумпорним једињењима која се налазе у гуми и нафти. Не кородира уз развијање водоника и према томе спада у материјале корозивно отпорне у неоксидирајућим киселинама. У табели 3.2 су приказани карактеристични услови у којима долази до корозије бакра. Најважније легуре бакра се добијају са цинком, калајем, алуминијумом, силицијумом и никлом.

Табела 3.2 Карактеристични услови у којима долази до корозије бакра

Карактеристични услови у којима долази до корозије бакра
O_2 , Cu^{2+} , Fe^{3+} и оксидишуће киселине
Киселине (HCl , H_2SO_4 , HNO_3)
Базе (NaOH , Na_4OH , KOH)
Оксидне соли тешких метала (FeCl_3 , $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$)
Влажни гасови
При повишеним температурама и притиску
Повећана брзина струјања слатке или морске воде

Легуре бакра и цинка

То су разне врстелегура (месинзи) који се у влажној атмосфери пасивирају. Месинг (сл. 3.8) је назив за низ легура бакар-цинк са различитим комбинацијама својстава, укључујући чврстину, електричну и топлотну проводљивост, боју, отпорност на корозију и др. Садржи од 10 до 40% цинка, а осим њега може садржати и гвожђе, калај, манган, алуминијум и друге елементе (углавном метале). Може бити различите боје у зависности од удела цинка. Он подлеже специфичној форми корозије која настаје у разним електролитима, јер долази до селективне корозије цинка из легуре или до кородирања месинга уз накнадно излучивање племенитијег бакра услед јонске измене. Селективна корозија (сл. 3.9) може бити локална или равномерна.



Слика 3.8 Изглед месинга



Слика 3.9 Селективна корозија месинга

Легуре с додатком Sn, As, Sb или Р успоравају или спречавају губитак цинка. Друга је појава корозије месинга тзв. сезонско пуцање, које настаје на хладно вученим деловима. Пукотине настају нагло и може доћи до лома комада услед унутрашњег напрезања. Са повећањем садржаја Си нагло расте отпорност према овој појави корозије. Остала корозивна својства месинга слична су својствима бакра. Због садржаног цинка нестабилнија је од бакра у базним растворима, а отпорнија према атмосфери која садржи H_2S . У табели 3.3 су приказани карактеристични услови у којима долази до корозије месинга.

Табела 3.3 Карактеристични услови у којима долази до корозије месинга

Карактеристични услови у којима долази до корозије месинга
Базни раствори
Влажни гасови
Висока температура, устајали раствори (посебно кисели) – губитак цинка Брзина губирка Zn расте са концентрацијом CO_2 и хлорида у води са загревањем
Влага и амонијак – сезонско пуцање
Турбулентно струјање електролита – појава питинга

Легуре бакра и калаја

Легуре бакра и калаја се називају калајне бронзе. Садрже око 4 - 10% Sn уз нешто Zn и Pb. Корозивна својства су слична бакру. Калајне бронзе отпорније су према атмосферској корозији него бакар и привлаче се заштитним слојем (бакарни базни карбонат). У морској води су стабилне. Сола киселина дјелује корозивно брже, а сумпорна спорије него код бакра. У базама кородирају слабије од месинга, али брже од чистог бакра. Калајне бронзе су отпорније према корозији при напрезању и корозивном замору него месинг.

Легуре бакра и алуминијума

То су алуминијумске бронзе. Садрже до 10% Al. Имају добра корозивна својства и уз остале додатке отпорније су од бакра у врућим гасовима иако садрже H_2S .

Легуре бакра и силицијума

То су силицијумске бронзе. У саставу имају до 4% Si уз додаток Mn, Zn, Fe или Sn. По корозивним својствима сличне су бакру. Њихова отпорност према соној и сумпорној киселини расте са садржајем силицијума.

Легуре бакра и никла

Легуре Cu-Ni („ново сребро“) отпорније су према атмосферској корозији него бакар и друге његове легуре, као и према амонијаку и његовим јонима, па и базама. Нестабилне су према деловању сулфидних растопа и гасова који садрже H_2S . За разлику од других бакарних легура, ново сребро је врло отпорно према органским киселинама, као и према соковима животињских намирница.

3.5 ЦИНК И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ

Цинк (сл. 3.10) је неплеменит метал у неким срединама склон хемијској пасивности због настајања компактних слојева продуката корозије. Ниска тачка топљења ($419,5^{\circ}\text{C}$) и прилично лоша механичка својства која се осим тога уз појаву кртости нагло погоршавају изнад 250°C ограничавају примену цинка као шире прихваћеног конструкционог материјала.



Слика 3.10 Изглед цинка

Према томе, цинк се претежно користи за галванизирање гвоздених и челичних производа ради заштите од корозије, за добијање легура (месинг) и у индустрији боја. Цинк је електронегативан метал па корозију може убрзати сваки његов контакт с другим металом, осим с магнезијумом. Код одређених услова на површини му се ствара заштитни филм, па је отпоран и у влажној атмосфери. Слој се састоји од цинковог базног карбоната. Осим у влажној атмосфери, цинк је отпоран још у слаткој води као и морској, ако није у контакту с племенитијим металима.

У киселинама је стабилан, што зависи од апсорбованог атомног водоника на локалним катодама. Зато племенитије компоненте с високим садржајем атомног водоника већ при ниској концентрацији јако спречавају корозију (нпр. 0,1% живе у цинку снижавају брзину корозије у 10%-тној H_2SO_4 за 11%, а 0,1% Pb за 80%). Цинк је отпоран према нафти и нафтним дериватима, као и према неким сувим гасовима. Цинк није отпоран у атмосфери која садржи хлориде (у близини мора).

У природним водама кородира нешто брже од Cu, али много спорије од гвожђа. У мекој води у присутности кисеоника кородира локално. Није отпоран у киселинама и базама изнад вриједности $\text{pH} \sim 12$, као и у цијанидним растворима. На високим температурама његова механичка својства нагло опадају.

3.6 ОЛОВО И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ

Олово је врло мекан метал мале јачине/чврстоће и велике жилавости. У многим срединама на његовој површини настају компактни слојеви продуката корозије који делују заштитно. Олово је стабилно у влажној атмосфери, у природним водама и разним хемикалијама, јер се на његовој површини ствара заштитни слој који спречава даљу корозију. Зато се у тешкој хемијској индустрији може олово употребити као антикорозивни материјал у облику облога. Олово је корозивно постојано: у тврдим водама, јер се превлачи слојем оловног базног карбоната, па се употребљава за водоводне цеви. Надаље у морској води, тлу, сумпорној киселини (превлачи се слојем сулфата), затим у флуороводичној, хромној и фосфорној киселини, у соној киселини при собној температури и у амонијак-хидроксиду. Олово је непостојано у мекој води поготову ако садржи CO_2 и O_2 , у сумпорној киселини изнад 85% садржаја H_2SO_4 , у врућој соној киселини, мрављој, а нарочито у азотној киселини. Надаље у нитратима и другим оксидационим растворима. Оловне легуре олова имају углавном иста корозивна својства као и олово. Олово се легира с калајем, антимоном и сребром.

Легуре олова и калаја

Легуре олова и калаја садрже до 50% Sn. Најважнија је легура за лемљење која садржи 25-50% Sn. При употреби ове легуре треба пазити да не дође у контакт с бакром у електропроводљивој средини јер настаје галвански пар. То се може избећи врло киселим или базним растворима ако се изврши хомогено пооловљавање без лемљења.

Легуре олова и антимона

Ове легуре се употребљавају за израду акумулатора, сачме и пушчаних патрона. Садржај антимона износи 4-10% уз трагове арсена, који у већим количинама проузрокује корозију олова. Ова легура се назива тврдо олово. У корозивном погледу легуре олова са калајем сличне су чистом олову с тим што су стабилније у растворима хромне киселине, а мање стабилне у врућој H_2SO_4 .

За штампање употребљава се легура која садржи 60-75% Pb, 23-25% Sb, 2-15% Sn, а за израду лежајева легуре садрже 77-84% Pb, 16-20% Sb и до 1% Cu или 71-83% Pb, 13-20% Sb, 4-10% Sn, остатак Cu.

3.7 КАЛАЈ И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ

Калај (Sn) је метал велике жилавости али мале јачине/чврстоће и тврдоће. Калај и већина његових легура примењују се за израду фолија, цеви, амбалаже, украсних предмета итд. Врло је раширена и употреба калајних превлака на челику, бакру и неким легурама бакра. Превлака калаја на челичном лиму позната је под називом бели лим.

Познате су две алотропске модификације калаја, и то бела с тетрагоналном решетком и сива с кубном решетком типа дијаманта. Бели калај може на температурама испод 13,2 °C прећи у сиви калај што утиче на физичко разарање калаја, па настаје тзв. "калајна куга".

Кадмијум и олово са 5% бизмута или антимоно спречавају ову појаву. Калај је веома отпоран према деловању атмосферске корозије, не кородира у слаткој, морској (обичан Sn) и дестилованој води, затим у неаерисаним растворима соли које не делују оксидационо, у оксидационим растворима (нпр. у хромату CrO_4^{2-} , азот-диоксиду NO_2) ако садрже анјоне који са Sn^- јонима дају талог; у киселинама без оксидационог деловања и без кисеоника, као и у органским киселинама које се налазе у намирницама (понекад кородира врло споро); у слабо алкалним растворима (амонијак-хидроксиду, натријум-карбонату) и у нафти. Калај кородира у тврдој (локално) и морској води ако је велике чистоће, затим у оксидационим растворима катјона (Hg^{2+} , Fe^{3+} , Ag^+) или анјона (хлорат ClO_3^- , персулфат $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) и у оксидационим киселинама, нарочито у азотној при повишеним температурама.

3.8 МАГНЕЗИЈУМ И ЊЕГОВЕ ЛЕГУРЕ

Магнезијум је врло неотпоран према корозији, па се употребљавају само његове легуре. Кородира већ у врућој води. Постојан је у чистој атмосфери, у хроматним и бихроматним растворима, базама и флуороводичној киселини због нетопљивости MgF_2 . Магнезијум се легира са Mn, Al, Zn и др. у циљу повећања јачине и побољшања корозивних својстава. Додаје се до 3% Mn, до 10% Al и до 3% Zn. Садржај Fe, Cu, Ni, Cd у Mg погоршава његова корозивна својства. Магнезијумове легуре постојане су у морској атмосфери, природној и индустријској слаткој води, у нафти и њеним дериватима. У врућим оксидационим гасовима магнезијумове легуре брзо кородирају.

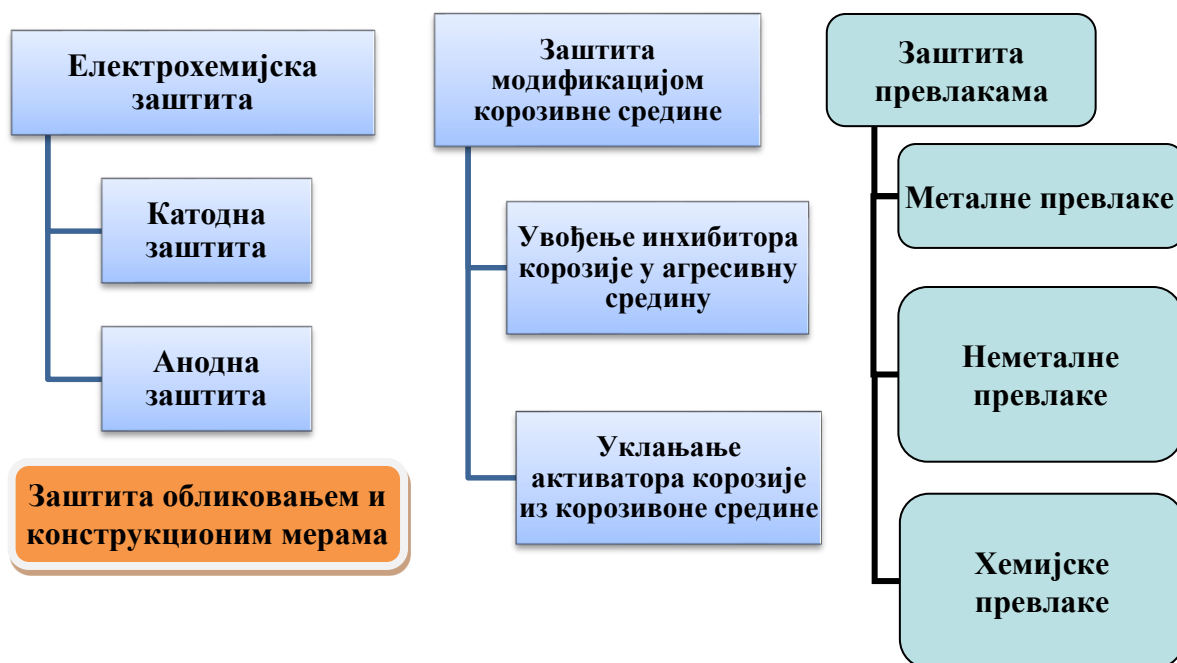
3.9 СРЕБРО

Елементарно сребро јест бео, врло истегљив племенит метал, разградив у азотној и врелој сулфатној киселини, отпоран према алкалима у растопљеном стању. У природи се налази најчешће у рудама са златом и бакром. Сребро је отпорно на атмосферску корозију, постојано у природним водама, у растворима разних соли, и база, у хлоридној киселини, у влажној атмосфери без сумпор-водоника, у воденој пари и оксидима угљеника, као и на високим температурама у оксидационој атмосфери. Сребро није постојано у азотној и у врућој сумпорној киселини (сумпорна једињења полако утичу на њега и стварају црни сулфидни површински слој) као и у цијанидним растворима. Спорије кородира у сулфидним растворима и амонијак-хидроксиду. У влажној атмосфери која садржи H_2S површински се ствара Ag_2S , па сребрна боја постане смеђа. У контакту са живом брзо се разара.

4. ЗАШТИТЕ МЕТАЛНИХ ДЕЛОВА И КОНСТРУКЦИЈА

После уводног упознавања са сложеним физичко-хемијским корозивним процесима и понашањем материјала у корозивним срединама, може се тежиште поставити на заштиту металних делова и конструкција.

Већ је напоменуто да корозија смањује употребну вредност метала/металних конструкција, поскупљује њихово одржавање, скраћује век трајања, повећава губитке у производњи, застоје у раду, ствара угроженост радника и др. Стварну штету је тешко израчунати и она нагло расте применом скувих метала осетљивих на корозију. Из свих тих разлога произлази потреба за заштитом металних делова/конструкција од корозије. Најчешћи начини заштите су приказани на слици 4.1.



Слика 4.1 Блок дијаграм глобалне поделе метода заштите метала и металних конструкција од корозије

Заштита обликовањем и конструкционим мерама је додата са стране и обележена другом бојом, јер она заправо спада у превентивну заштиту а обрађена је детаљно у петом поглављу.

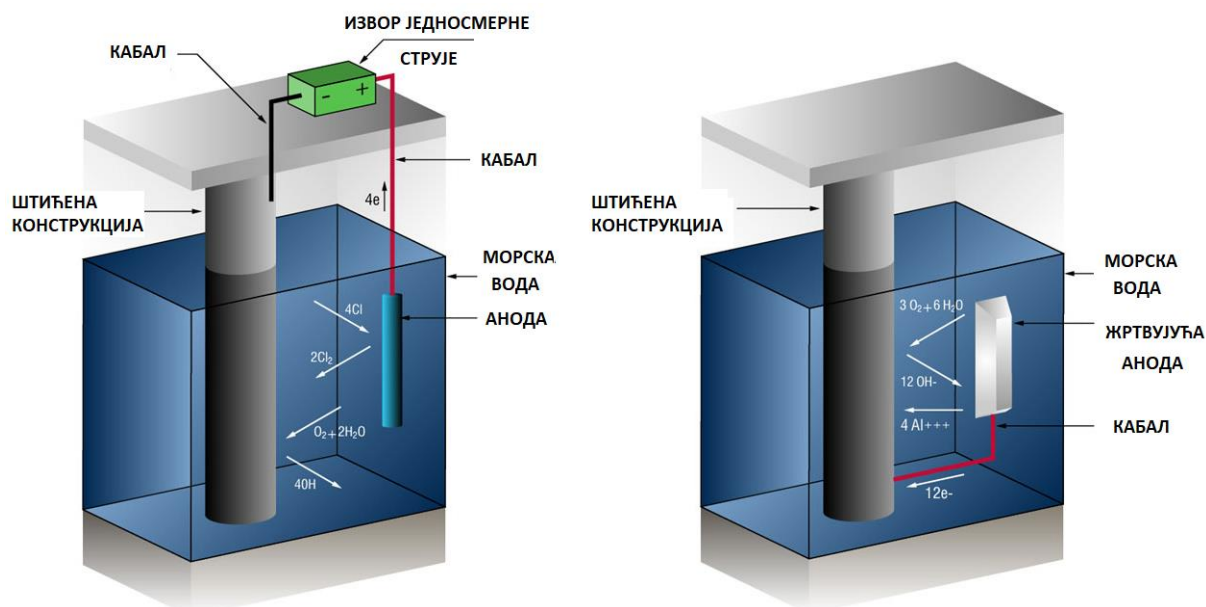
4.1 ЕЛЕКТРОХЕМИЈСКЕ МЕТОДЕ ЗАШТИТЕ

Темеље електрохемијске заштите поставио је 1824. године *Humphry Davy*, који је употребио цинк као заштиту бакарних оклопа на дрвеним труповима ратних бродова у морској води. Методе се темеље на томе да се метал одржава или у пасивном стању (у подручју потенцијала пасивације) или у имуном стању (при потенцијалима нижим од стационарних) када не кородира. Електрохемијске методе заштите се употребљавају као антикорозивна заштита челичних конструкција првенствено у конструкцијама које нису лако приступачне за одржавање – на пример укопане у земљи и уроњене у воду (цевоводи, резервоари, кондензатори, измењивачи топлоте, бродови, лучка постројења, и др.). Зависно од начина поларизације електрохемијска заштита може бити катодна и анодна.

4.1.1 КАТОДНА ЗАШТИТА

Катодна заштита је једна од најзначајнијих метода заштите од корозије у електролитима. Темељи се на успоравању корозије катодном поларизацијом метала тј. избором електрохемијског потенцијала метала са мањом вредношћу. У пракси се употребљавају два начина катодне заштите:

- ✓ Катодна заштита у којој је штићени предмет катодно поларизован деловањем спољашњег извора једносмерне струје (сл. 4.2 – лево)
- ✓ Катодна заштита у којој се катодна поларизација остварује контактом штићеног метала са мање племенитијим металом - жртвованом анодом (протектором) (сл. 4.2– десно).



Слика 4.2 Катодна заштита спољашњим извором једносмерне струје (лево) и употребом жртвујуће аноде (десно)

Између два наведена поступка катодне заштите нема битне теоријске разлике, јер се оба темеље на истим електрохемијским принципима. Успостављањем везе катодне заштите са спољашњим извором једносмерне струје, метал се спаја на негативни пол извора једносмерне струје, тако да се на граници фаза конструкције и електролита,

успоставља разлика потенцијала (електродни потенцијал), при којој се на целој површини конструкције одвија катодна реакција, док се анодна реакција одвија на аноди (жртвованом металу).

Аноде за овај систем заштите могу бити разградиве или неразградиве. Разградиве су најчешће од конструкционог угљеничног челика, а неразградиве се израђују од феро-силицијума, графита, никла, олова, платинираног титана итд. Потпуно су неразградиве само платиниране, док се остале, ипак, полако троше. Предност челичних анода је са економске стране а недостатак разградивост, док су графитне и угљеничне аноде трајније, али лако ломљиве.

Графитне аноде се због својих лоших механичких особина импрегнирају ланеним уљем. За заштиту подземних конструкција с спољашњим извором струје, аноде се редовно укопавају у проводљиво тло тако да и сама учествује у преносу струје на тло, чиме битно смањује утрошак материјала. Аноде могу бити укопане и више од 500 m далеко од штићене конструкције. Код укопавања анода у градовима и у круговима са много подземних инсталација постоји опасност да део заштитне струје из спољашњег извора (као лутајућа струја) изазове корозију оближње незаштићене металне конструкције (тзв. интерференција). Зато се често изводи заједничка катодна заштита две или три блиске инсталације (нпр. гасовода и водовода). Век трајања анода треба да буде најмање 10 до 20 година. Критеријум катодне заштите су заштитни потенцијал и густина струје. Њихове се вредности за различите услове експлоатације знатно разликују. Стационарни потенцијал челика у природној средини је у просеку око $-0,55V$, а 1928 године утврђена је гранична вредност електродног потенцијала од $-0,85 V$ као критеријум за потпуну катодну заштиту.

Заштитни потенцијал челика је негативнији ($-0,95 V$) само у анеробним срединама, у којима бактерије редукују сулфате у сулфите. Ове се вредности достижу одређеним густинама струја које се крећу од $20-40 \text{ mA/m}^2$ за угљенични челик. Потребне густине струја врло јако падају превлачењем челичних конструкција изолационим превлакама (за угљенични челик испод $0,3 \text{ mA/m}^2$), па се зато катодна заштита врло често комбинује са nanoшењем таквих превлака, што смањује велики утрошак енергије који би постојао код катодне заштите без превлаке. Као извори наизменичне струје служе исправљачи од $10-20 V$ који омогућавају фину регулацију заштите. То се лако спроводи и аутоматски помоћу потенциометра.

Будући да је заштитни потенцијал критеријум катодне заштите, треба повремено мерити потенцијал између конструкције и референтне Cu/CuSO_4 електроде на тлу. Из пада потенцијала конструкција/тло процењује се ниво заштите, а само мерење током примене катодне заштите је доста сложено.

Код састава катодне заштите жртвујућом анодом (протектором), конструкција се спаја са електродом од материјала који је електронегативнији него што је материјал конструкције. Жртвована се анода након спајања почиње редуковати, а на конструкцији се успоставља електродни потенцијал при којем се одвија катодна реакција-површина конструкције постаје катода. Приликом рада оваквог састава, аноде се троше те их је потребно повремено мењати (сл. 4.3).



Слика 4.3 Примери истрошених анода

За заштиту челичних конструкција израђују се аноде од цинка, магнезијума, алуминијума и њихових легура. Технички се цинк лако пасивизује корозивним продуктима, што битно смањује заштитну струју. Зато се као протектор бира рафинисани (чист у електролитичком погледу) цинк или његове легуре са мало алуминијума или магнезијума. Магнезијум се превише троши властитом корозијом, па је повољније користити се заштитним елементима (протекторима) од магнезијумових легура (нпр. са 6% алуминијума и 3% цинка). Алуминијум је веома склон пасивизацији тако да су заштитни елементи обично његове легуре са додатком Zn, Cd, Sn и Hg. Оне су (слично цинку) примењиве за заштиту челика само у врло проводљивим срединама. Они се постављају појединачно или у групама и то због смањења отпора што ближе штићеном објекту. У води се постављају директно на конструкцију коју штите (заваривањем, лемљењем или везивањем помоћу завртња), а у тлу на удаљености од 3-4 m од објекта и на дубини 2-4 m. Такође се смештају у лежишта пуњена врло проводљивим смешама фине глине, воде, евентуално уз додатак Na_2SO_4 , Mg_2SO_4 , MgSO_4 и NaCl .

Предности ове методе су:

- ✓ независност од извора струје,
- ✓ једноставност уградње,
- ✓ мање учестало контролисање,
- ✓ незнатни утицај на суседне конструкције и тсл.

Недостаци ове методе су:

- ✓ неповратни губитак материјала аноде и потреба за повременим мерењем,
- ✓ загађивање околине од стране продуката корозије на аноди,
- ✓ непримењивост у срединама са већим отпором,
- ✓ релативно мале заштитне струје и др.

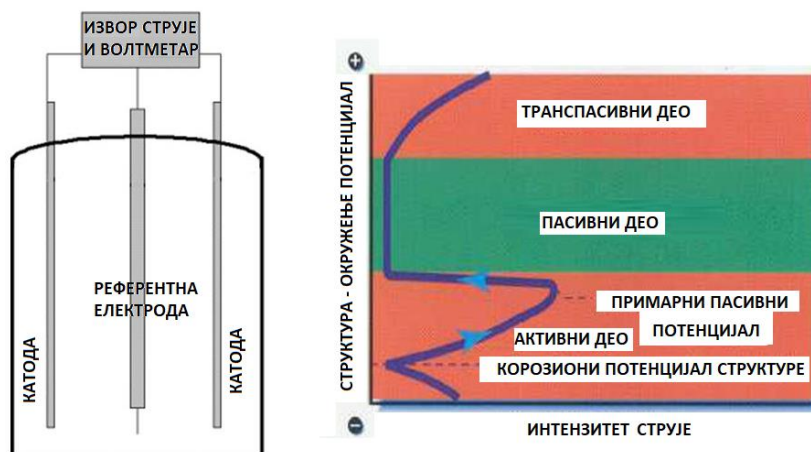
Заштитним елементима (протекторима) се успешно штите цевоводи (спољне стране), укопани резервоари, и цистерне за гориво, расхладни уређаји, танкови за нафту с морском водом као баластом, бушотинске цеви на нафтним пољима, подводни делови брода, подводни стубови, лучки уређаји итд. У пракси нема оштре границе подручја примене заштите спољашњим извором струје и заштите протекторима. Најчешће се избор поступка заштите разматра појединачно за сваки случај заштите, узимајући у обзир економске факторе, техничке могућности, као и предности и недостатке оба поступка. Уопштено, поступак заштите спољашњим извором струје има веће могућности па тиме и шири примену.

4.1.2 АНОДНА ЗАШТИТА

Анодна заштита се темељи на успоравању корозије анодном поларизацијом метала тј. помаком електрохемијског потенцијала метала у позитивном смеру. У пракси се користе два начина анодне заштите:

- ✓ извором једносмерне струје (спајањем са позитивним полом струје),
- ✓ протектором (спајањем са електропозитивнијим металом).

Код анодне заштите извором једносмерне струје (сл. 4.4) корозија челика се смањује одржавањем у подручју пасивизације. Анодна заштита делује управо у том ограниченом подручју потенцијала, па је при постављању исте најзначајније одређивање подручја потенцијала у којем се метал налази у пасивном стању. Код угљеничног челика мора се у првој фази анодне заштите пасивизирати већом густином струје (реда величине A/m^2), што се обавља најчешће у интервалу 15-60 min помоћу посебног исправљача, генератора или акумулаторске батерије, а затим се прелази на нормални режим анодне заштите, при којем је густина струје далеко мања него при катодној заштити.



Слика 4.4 Схематски приказ система анодне заштите извором једносмерне струје

Заштита метала протектором постиже се спајањем с металом чији је потенцијал позитивнији од потенцијала метала који се заштићује. Електропозитивнији метал назива се катодним протектором.

Заштита метала применом катодног протектора може се остварити уколико је корозивни потенцијал протектора позитивнији од потенцијала пасивизације метала. За челик се могу као катодни протектори користити племенити метали (платина, паладијум, сребро, бакар) или графит. Пре извођења анодне заштите потребно је лабораторијски одредити густину струје пасивизације и подручје пасивизације у зависности од услова корозионе средине (рН, температура, састав и концентрација, брзина струјања електролита итд.). Добре карактеристике анодне заштите су потребна мала густина струје ($15-100 mA/m^2$) и смањење брзине корозије чак и до 100 000 пута, но због својих ограничења с обзиром на склоност метала пасивацији и скупе инсталације (потенциостат) не употребљава се често.

4.2 ЗАШТИТА ПРЕВЛАКАМА

Заштита метала превлакама је најзаступљенија метода заштите од корозије. Примарни задатак наношења превлака на челичне конструкције јесте заштита од корозије, а секундарни може бити нпр. поправљање естетике, постизање одређених физичких својстава, поправку лоших производа и др. Притом је потребно осигурати такву технологију која омогућава довољну постојаност саме превлаке, њену трајност и поузданост. У табели 4.1 приказана је уопштена подела превлака.

Табела 4.1 Подела превлака

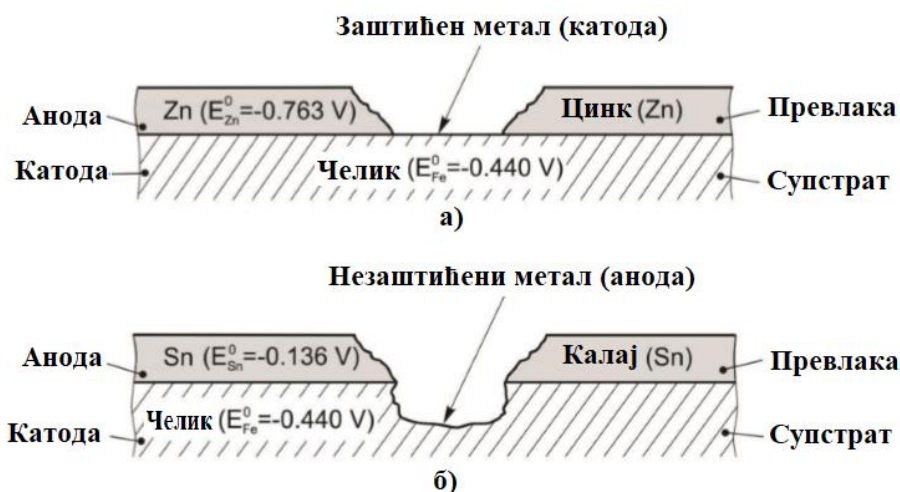
ПРЕВЛАКЕ						
Металне		Неметалне			Хемијске	
Цинк	Органског порекла	Неорганског порекла			Фосфатирање	
Алуминијум					Оксидација гвожђа	
Олово		Лак-боје Киселински отпорни материјали Цемент Бетон Плоче			Пасивизирање обојених метала	
Калај					Бојење обојених метала	
Кадмијум						
Бакар						
Никл						
Хром						
Сребро						
Злато						
Легуре						

Пре сваког од могућих начина заштите потребно је извршити припрему површине метала тј. уклонити продукте оксида (корозије), масти, троску после заваривања, емулзију и друге нечистоће са његове површине. Само на тај начин створиће се услови да се премази нанесу на металну површину, а не на нечистоће које се на њој налазе и слабо приађају за метал, па се после извесног времена заједно са премазом одвајају од површине. Најчешће коришћени поступци припреме површине су: одмашћивање (органским растварачима, воденим растворима детерџената, воденом паром и тсл.); механичко чишћење (ручно и машинско); термичко чишћење (гасним пламеном и високим температурама – уклањање оксида); хемијско чишћење (киселим и алкалним растворима, фосфтирање и тсл.); електрохемијско чишћење.

Избор поступка припреме металних површина, превасходно зависи од стања саме површине и поступка будуће заштите. Уклањање продуката корозије најчешће се врши комбинацијом више поступака. Одабрани систем заштите, поред основне функције (квалитетна заштита од корозије), треба да испуни и еколошке захтеве, односно да спречи загађење животне средине.

4.2.1 ЗАШТИТА МЕТАЛНИМ ПРЕВЛАКАМА

Металне превлаке се према заштитним својствима могу поделити на катодне и анодне. Катодне превлаке имају позитивнији електродни потенцијал од потенцијала метала који штите. Катодне превлаке су од никла, хрома, олова на угљеничном и нисколегираном челику. Катодне превлаке штите метал механички, а добре су само ако су компактне. Комбинацијом велике катодне површине и микроскопски малих анодних површина концентрише се корозивни утицај на заштићени метал у овом случају челик. Корозивни продукти могу зачепити поре и тако смањити електричну проводљивост електролита у порама (сл. 4.5б).



Слика 4.5 Схеми протицања струје кроз оштећења: а) цинкане (анодне) превлаке и б) калајне (катодне) превлаке

Анодне превлаке имају негативнији електродни потенцијал од електродног потенцијала челика. Пример за ову врсту превлака на угљеничном челику су превлаке цинка и кадмијума.

Анодне превлаке штите од корозије штитени метал не само механички, већ и електрохемијски. Механизам заштите је сличан механизму катодне заштите анодним протектором. Корозија темељног материјала престаје при успостављању потенцијала који је негативнији од равнотежног потенцијала штитеног метала. Пример су превлаке цинка на челику где се у порама не разграђује штитени метал него анодна превлака (сл. 4.5а).

Металне превлаке се наносе физичким, хемијским и електрохемијским путем, односно поступцима.

Физички поступци наношења су:

- ✓ вруће ураћање (потапање),
- ✓ метализација прскањем,
- ✓ платирање,
- ✓ наваривање,
- ✓ облагање,
- ✓ лемљење,
- ✓ лепљење и тсл.

Хемијски поступци су:

- ✓ јонска замена и
- ✓ каталитичка редукција.

Електрохемијски поступак:

- ✓ галванизација.

Анализирано према индустријском начину наношења превлака, начини наношења металних превлака приказани у табели 4.2.

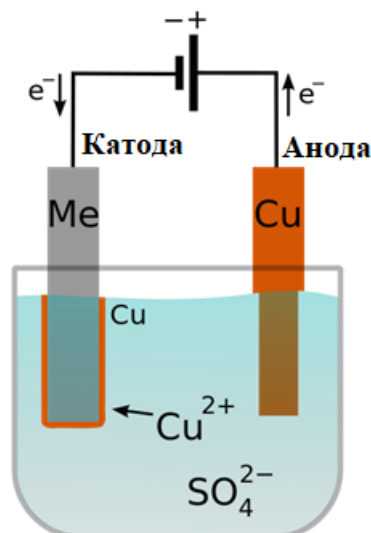
Табела 4.2 Класификација начина наношења металних превлака

НАЧИНИ НАНОШЕЊА МЕТАЛНИХ ПРЕВЛАКА				
Вруће	Метализација	Галвански	Дифузиони	Облагањем
Цинк	Цинк	Цинк	Цинк	Бакар
Олово	Олово	Олово	Алуминијум	Месинг
Калај	Алуминијум	Калај	Силицијум	Томбак
Калај-Олово	Бакар	Алуминијум	Хром	Никл
	Легуре бакра	Бакар	Cr-Si	Алуминијум
	Нерђајући челик	Никл	Cr-Al	Остали
		Хром		
		Сребро		
		Злато		
		Легуре		
		Радијум, платина и др.		

За заштиту делова машинских конструкција или комплетних конструкција највише се примењују галванизација, добијање превлака врућим урањањем (потапањем) и прскањем метала, док се остале методе примењују првенствено за ситније предмете. Галванизација је најраширенији поступак наношења металних превлака.

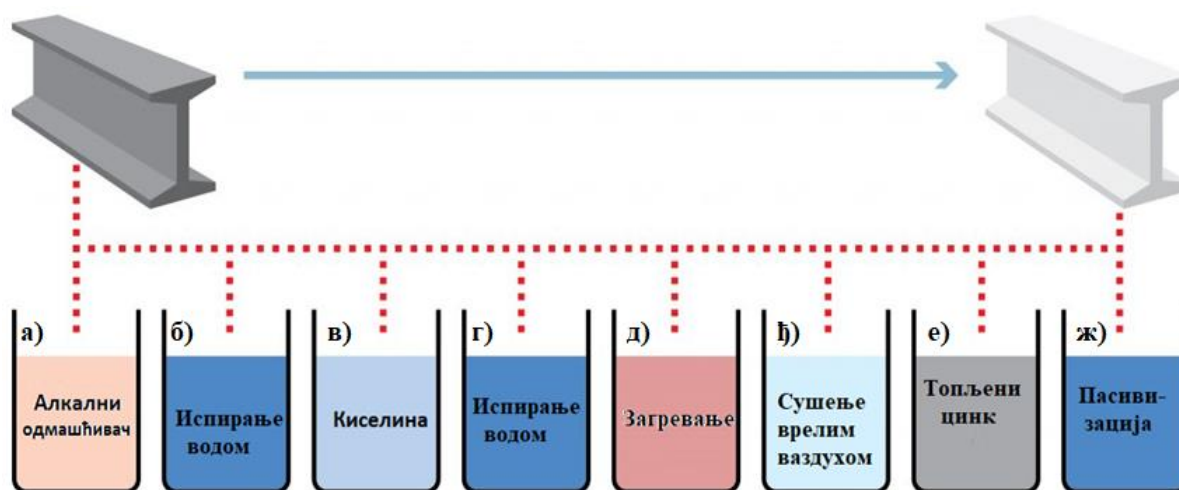
Предности галванизације су економичност, могућност спајања метала различитих механичких својстава, једноставност регулисања процеса, добро спајање превлака са штићеним материјалом, висока чистоћа превлака, ниске температуре обраде и др. Недостаци су неједнака дебљина превлаке на профилисаним површинама, слаба микрорасподела, унутрашњи напони, галвански питинг који изазива порозност тањих превлака и др.

Поступак се темељи на обради металних предмета у електролиту уз примену електричне струје. Предмети на које се жели нанети превлака, спајају се са негативним полом једносмерне струје, тј. као катодe. Са позитивним полом извора једносмерне струје спаја се друга електрода (анода). Као анода најчешће се користи метал који ствара металну превлаку. Електролит садржи један од спојева метала који даје превлаку (метални spoj, најчешће у облику комплексне соли). Стварање металне превлаке је резултат електрохемијске реакције редукције метала јона на катоди и њиховог уклапања у кристалну решетку превлаке. На слици 4.7 дат је пример галванизације неког метала (Ме) бакром (Cu) у електролиту бакар-сулфата.



Слика 4.7 Пример галванизације метала бакром

Добијање металне превлаке врућим урањањем (потапањем) је поступак који се темељи на краткотрајном држању предмета у растопу неког метала. Поступак се примењује за добијање превлака металима релативно ниске температуре растопа: цинком (420°C), оловом (327°C), као и у последње време и алуминијумом (720°C). Превлаке добијене овим поступком су дебље од превлака које се добију галванизацијом, па се и користе када је потребна дебља превлака, јер је галванизација у том случају неекономична. Топло цинковање је дато као пример (сл. 4.7) овог поступка. Пресвлаке цинка на челичним конструкцијама добијене урањањем у растоп цинка представљају најраширенији поступак заштите од атмосферске корозије и од корозије у неутралном тлу. На слици 4.7 је приказан целокупан поступак процеса заштите челичног профила врућим урањањем у растоп цинка.



Слика 4.7 Схематски приказ целокупаног процеса заштите металног профила

Превлака цинка може трајати у атмосфери која није јако агресивна и преко 50 година, али ако су у атмосфери присутни CO_2 , CO_3 и HCl ове превлаке брзо подлежу корозији. Цинк делује заштитно, јер се пасивизира стварањем властитих продуката корозије. Осим тога, превлака цинка делује као заштитна анода (протектор) у корозивном пару цинк-електролит-челик.

Поред урањања (сл. 4.7) добијање металне превлаке прскањем растопљеног метала је поступак насприцавања растопа метала помоћу компримованог ваздуха по површини коју треба заштитити. Растопљени метал излази из млазнице у облику врло ситних капица и ствара слој превлаке у којем су честице повезане без икаквог реда. Због тога је у таквој превлаци велики број пора. Кад се подлога на коју ударају честице претходно загрева повећава се приањање, јер честице дуже задржавају своју пластичност. Овај поступак се спроводи у циљу заштите од атмосферске корозије, повећања декоративности површине, репаратуре похабаних делова, као и добијања специјалних карактеристике површине.

Предности овог поступка су:

- ✓ могућност заштите великих конструкција и предмета у завршном стању,
- ✓ релативно једноставан начин рада,
- ✓ могућност заштите на терену,
- ✓ могућност регулисања дебљине превлаке и тсл.

Недостаци ове методе су:

- ✓ велика порозност превлаке код тањих слојева,
- ✓ велики губитак материјала код прскања,
- ✓ ниска јачина споја превлаке за површину предмета.

4.2.2 ЗАШТИТА НЕМЕТАЛНИМ ПРЕВЛАКАМА

Гумирање

Гумирањем се назива процес превлачења гумом металне површине ради заштите предмета од корозије. Гума је један од најупотребљивијих материјала у машинској индустрији, првенствено захваљујући својој еластичности, особини да амортизује осцилације и доброј отпорности према хабању. Гума такође има високе изолаторске особине у електричном смислу и хемијску стабилност у низу агресивних средина.

Облагање хемијске апаратуре гумом или ебонитом, знатно повећава век трајања апаратуре. Главна компонента гуме је каучук. Каучук улази у састав сока латекса, који се добија од каучуковог дрвета при његовом зарезивању.

За индустријске потребе, где су метални елементи изложени удару, абразији или хемијском нагризању, гумирање је једно од најповољнијих, а тиме уједно и најраспрострањенијих решења заштите метала. Гумирају се разни елементи, попут цеви, носача пумпи, вибрационих апсорбера, танкера, канала за отпадне воде и др. Као обложни материјал употребљава се мека гума. Она добро подноси температурске осцилације; не мрзне и не прелази у лепљиво стање. Супротно од ње, ебонит није погодан за температурске осцилацију и веома је крт. Издржљивост према хабању му је нижа у односу на меку гуму, али је по хемијској стабилности он бољи избор.

Према намени и условима рада предмета припремљених за заштиту од корозије, гумирање може бити извршено меком гумом или ебонитом. Гумирање челичних предмета, припремљених за рад при загревању, врши се наношењем двослојне превлаке: горњег слоја – ебонита од 3-5 mm дебљине и доњег слоја – меке гуме, дебљине 1.5-2 mm. Таква превлака обезбеђује нарочито већу хемијску стабилност и добро издржава удар по гумираној површини апарата. На слици 4.8 дат је пример металног дела обложеног гумом.



Слика 4.8 Пример металног дела обложеног гумом

Трослојна облога која се састоји од слоја меке гуме, дебљине 1,5-2 mm, међуслоја ебонита (3-4 mm) и спољњег слоја меке гуме (1,5-2 mm) често се употребљава за каде за нагризање.

Лак боје

Премази (превлаке) лак-бојом су најраспрострањенији и једни од најјефтинијих начина за заштиту материјала од корозије. Они су у многим случајевима незаменљиви за дуготрајну заштиту металних конструкција које су изложене металној корозији.

Овај вид премаза се често употребљава за декоративну обраду конструкције, а такође и за специјалне намене, као на пример: осветљавање, борбу против воденог биља (у случају да је конструкција уроњена у воду) и слично. Премазивање бојом се користи и до 60% од укупног удела употреба превлака.

Премазивање лак бојом се може окарактерисати као процес наношења и учвршћивања непрекидне превлаке на површину предмета који се обрађује. Превлака се обично састоји од органских материја, по правилу помешаних са неорганским једињењима-пигментима.

Пред њих се постављају захтеви да буду потпуно без шупљина, хемијски стабилни, непропустљиви за гасове и воду, еластични, да имају велику адхезију (прилепљивост за површину), а такође и да поседују одређену механичку чврстину и тврдоћу. У извесним случајевима, с обзиром на намену, пред премазе се подстављају специфични захтеви: стабилност према киселинама, стабилност према базама, стабилност према бензину, стабилност на ниским и високим температурама и тсл. Све материје за израду кошуљица премазивањем деле се у две групе: боје и лакови.

Боје представљају суспензију неорганских (минералних) материја у уљима које се суше. Уља имају улогу материје за везивање. Сем главних састојака (везивна метерија и пигмент), боје садрже попуњивачке материје, које се уводе ради повећања механичке чврстине превлаке, помоћне материје, убрзиваче при сушењу и раствараче (материје за разређивање).

Лакови представљају колоидне растворе уља која се суше у брзим органским растварачима.

Смоле

Познате су смоле различитог састава. Неке од најкоришћенијих су хлоро-винили и дивинил-ацетилени. На бази хлоро-винила, у многим земљама се израђује пластичан материјал миполам, који има високу хемијску стабилност против деловања минералних киселина и база.

Дивинил-ацетилен је споредан продукт пиролизе и крекинга нафте или других органских продуката и представља безбојну течност, која прелази у чврсто или нерастворљиво стање у процесу полимеризације. При изради превлака, дивинил-ацетилен меша се са азбестом. Добијена композиција носи назив абсовинил. Абсовинил се полимеризује већ при собној температури, после 36-48 h. Трајање полимеризације се скраћује за 20-24 h при загревању на 70-80°C.

Абсовинил је стабилан у киселинама и базама и употребљава се у виду пластичног материјала ради облагања различитих врста хемијске апаратуре. Дебљина превлаке обично износи 8-10 mm.

Поред споменутих, као додатак премазима користи се епоксидна смола. Она има изузента механичка и електро-изолациона својства, изврсну хемијску отпорност (нарочито на базне киселине), сјајно приањање на метал, добру прихватљивост боја итд.

4.2.3 ЗАШТИТА ХЕМИЈСКИМ ПУТЕМ

Стварање заштитних оксидних кошуљица на површини металних предмета у техници носи општи назив „оксидирање“. Извесни процеси имају специјалне називе. Тако, на пример, процеси наношења на челик црних оксидних кошуљица називају се брунирање, а наношење превлаке која се састоји од фосфата метала, назива се фосфатирање или бондеризација. Спонтана оксидација обојених метала и њихових легура, гвожђа и његових легура и лаких метала и њихових легура се такође може сматрати хемијском заштитом (пасивизација). Такође, измена боје површине обојених метала, њиховом хемијском обрадом или у разним растворима соли или киселина, носи назив хемијско бојење.

Оксидација, фосфатирање/брунирање и бојење метала има за циљ:

1. Промену боје предмета (на пример наношење на површину предмета кошуљице црне заштитне боје или промена боје метала у циљу уметничког украшавања и тсл.).
2. Заштиту од атмосферске корозије предмета од челика, којим се не постављају велики захтеви корозивне стабилности.
3. Заштиту од корозије лаких метала и његових легура.
4. Стварање на површини метала основе испод превлаке од лак боје.

Најчешће примењиване анорганске неметалне превлаке су оксидне и фосфатне превлаке. За добијање оксидних превлака на челику примењују се термички, хемијски и електрохемијски поступци. Термички и електрохемијски поступци врло се ретко користе, а хемијски поступци стварања оксидних превлака на челику познати су под називом брунирање. Брунирање се првенствено користи за обраду оружја и нема значајније примене код челичних конструкција.

Фосфатирање

Фосфатирање је процес обраде метала у растворима фосфата и фосфорне киселине ради повећања отпорности према атмосферској корозији или предобраде за бојење и лакирање. Фосфатирање може бити хемијско и електрохемијско. Електрохемијско нема већу примену, јер је скупо, а не даје квалитетне превлаке. Хемијски поступци фосфатирања се спроводе или потапањем у растопима или распршивањем. Могу бити врући и хладни.

Вруће фосфатирање се спроводи на температури од приближно 100°C и траје 30-60 минута. Уз додатак оксиданса радна температура се смањује на 60 до 80°C, а трајање фосфатирања на 10-15 минута. Недостатак врућег фосфатирања је велики утрошак енергије за загревање и одржавања купатила, као и због честог надокнађивања испарене воде. Вода се не може доливати током фосфатирања, јер се при томе узбурка муљ с дна купатила и постоји опасност његовог уласка у превлаку.

Хладно фосфатирање се спроводи при собној температури и оно омогућава заштиту предмета помоћу млазнице. Предност хладног фосфатирања пред врућим јесте што се може примењивати за фосфатирање великих површина. Фосфатни слојеви су порозни и из тог разлога не пружају потпуну заштиту од корозије, али су зато одлична подлога за наношење органских превлака.

4.3 ЗАШТИТА ОД КОРОЗИЈЕ ОБРАДОМ КОРОЗИВНЕ СРЕДИНЕ

Брзина корозије металних конструкција у растворима који се не обнављају или се само повремено обнављају, може се смањити регулисањем корозивне средине. Ове методе примењују се највише за заштиту измењивача топлоте, парних котлова, кондензатора, када за декапирање, те разних цистерни намењених за транспорт разних агресивних раствора. Смањење утицаја корозивне средине која делује на метале и легуре може се спровести на два начина:

- ✓ уклањањем активатора корозије из агресивне средине и
- ✓ увођењем инхибитора корозије у агресивну средину.

Активатори корозије и састојци који повећавају агресивност корозивне средине могу се уклонити на више начина:

- ✓ неутрализацијом киселина,
- ✓ уклањањем кисеоника из воде,
- ✓ уклањањем соли из воде, снижавањем релативне влажности ваздуха,
- ✓ уклањањем чврстих честица и тсл.

Неутрализација киселина у воденим растворима се обавља помоћу креча или натријум хидроксида. С обзиром на зависност брзине корозије гвожђа од рН-вредности корозивне средине, за његову заштиту довољна је неутрализација киселог раствора до вредности рН= 5, при чему се нагло смањује агресивност корозивне средине.

Уклањање кисеоника односно деаерација воде или водених раствора постиже се загревањем, уклањањем кисеоника (уз помоћ инертног гаса), хемијским поступком (додавањем редукционих средстава у воду или пропуштањем воде кроз филтере напуњене челичним струготинама) и др.

Соли присутне у води уклањају се јонским измењивачима. Уклањање влаге из ваздуха у малим затвореним просторима спроводи се силикогелом. Снижење релативне влажности околног ваздуха у складишним просторима спроводи се повишењем температуре за 6-7°C у односу на спољну температуру. Уклањање чврстих честица из воде, ваздуха или дима спроводи се филтрирањем.

Инхибитори су супстанце анорганског или органског порекла које у врло малим концентрацијама смањују брзину корозије до технолошки прихватљивих вредности. Према механизму деловања деле се на:

- ✓ анодне,
- ✓ катодне и
- ✓ мешовите (анодно-катодне).

Анодни инхибитори спречавају јонизацију метала односно на анодним местима стварају слојеве оксида или слојеве слабо растворљивих соли и тако чине баријеру која изолује метал. Код анодних инхибитора је потребно нарочито водити рачуна о њиховој концентрацији, јер при одређеној нижој концентрацији стимулишу нпр. рупичасту корозију па се зато називају и опасни инхибитори. Најважнији су анодни инхибитори пасивизатори, тј. растворљиве соли оксидационих анјона, какви су хромати, нитрати, молибдати итд. Због токсичности настоји се да се хромати и нитрити замене молибдатима. Међу анодне инхибиторе се убрајају и тзв. таложни инхибитори.

Међу тим се инхибиторима истиче водено стакло које на анодама ствара слој силикогела и металног силиката. Премала концентрација наталожених инхибитора не може узроковати тачкасту корозију, а примењују се за заштиту од корозије конструкција које се налазе у слабо киселим, неутралним и слабо алкалним срединама. Катодни инхибитори подједнако коче катодну реакцију (редукцију водоника или кисеоника) или делују као таложни инхибитори, стварајући на локалним катодама нерастворљиве продукте. Најважнији катодни инхибитори су раствори са арсеном, бизмутом, антимоном, те као таложни, силикати и полифосфати. Мешовите тј. анодно-катодне инхибиторе чине органске супстанце који теже гомилању на металној површини. Најважнији су мешовити инхибитори амини, амиди, сумпорне и фосфорне инхибиторне супстанце. Највећи ниво заштите инхибиторима постиже се сумпорним и фосфорним инхибиторима, али су они отровнији од осталих, па се морају примењивати са повећаним опрезом. Потребно је напоменути да као инхибитори служе и природни макромолекули колоидног карактера (скроб, декстрин, желатин, танин и тсл.). Код инхибитора се врло често заједно примењују два или више инхибитора који повећавају степен заштите односно делују синергијски. За заштиту челичних конструкција приликом транспорта или складиштења могуће је користити инхибиторе корозије VCI (енгл. *Volatile Corrosion inhibitor*). Они се користе за заштиту од атмосферске корозије. То су органске супстанце у чврстом стању које имају довољно висок притисак пара, да би сублимацијом учиниле некорозивним околни ваздух или неки други гас. Користе се у праху или се њиховом алкохолном раствору натапају папири, односно сунђерасте супстанце (најчешће сунђерасти полипласти). Механизам деловања им се темељи на томе да испаравају и путују према свим деловима металне површине, те је покривају. Када пара дође у додир са металном површином кондензује се и ствара танки мономолекуларни слој који путем јонског деловања штити метал.

Код машинских конструкција инхибитори могу се користити за време складиштења и транспорта различитих профила, а посебно добијају на важности као адитиви у премазима за привремену или трајну заштиту. Такође се употребљавају у средствима за одмашћивање и чишћење, као и у одстрањивачима корозије и премаза.

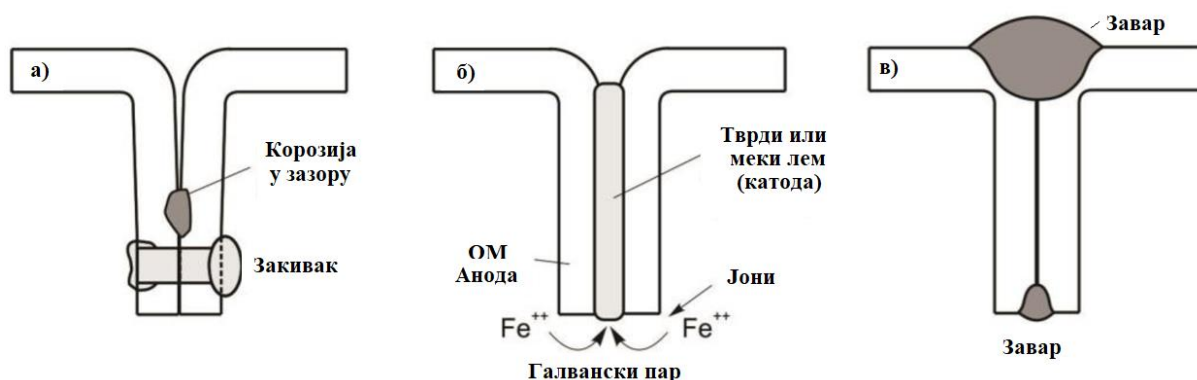
Предности у примени којима се истичу код коришћења су:

- ✓ Дуготрајна заштита од корозије и у екстремним условима:
 - велика влажност,
 - високе температуре (могуће и до 500°C),
 - слана атмосфера,
 - агресивна атмосфера (SO₂, H₂S, Cl) и тсл.
- ✓ У већини случајева није потребно уклањање средстава са површине пре склапања, инсталације или примене. Није потребна посебна или дуготрајна припрема површина пре примене заштитног средства.
- ✓ Делују и на неприступачним местима која су средишта појаве јаке корозије.
- ✓ Делотворни су у спречавању галванске корозије.
- ✓ Ефикасни су у спречавању питинг корозије.

5. ПРЕВЕНТИВНА ЗАШТИТА МЕТАЛНИХ ДЕЛОВА И КОНСТРУКЦИЈА ОБЛИКОВАЊЕМ И КОНСТРУКЦИОНИМ МЕРАМА

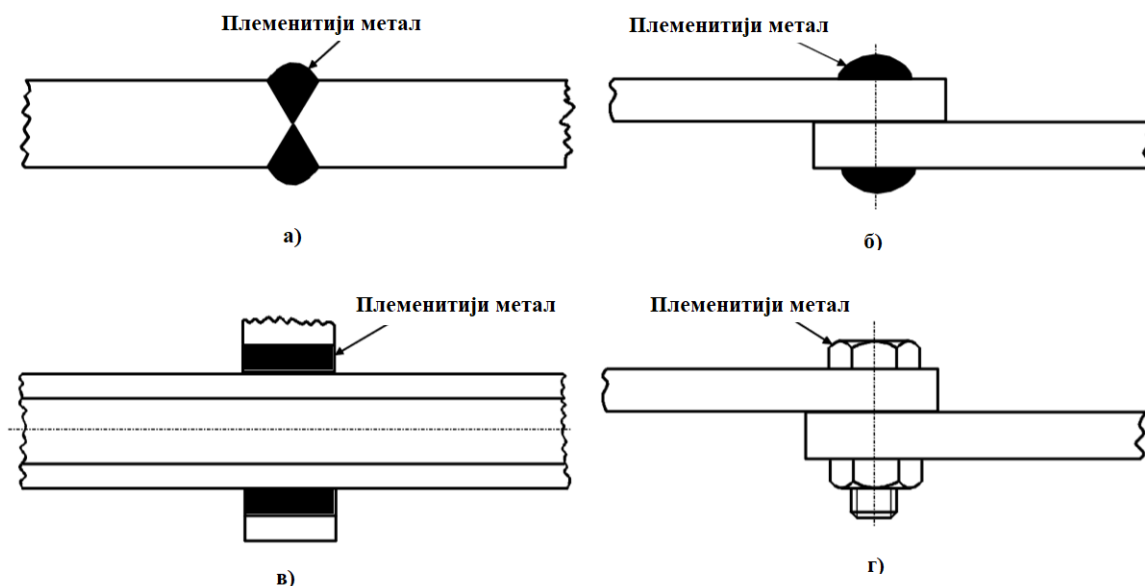
Покретање многих корозивних процеса могуће је уклонити или барем успорити правилним обликовањем металних конструкција, разним пројектним решењима и технологијом израде. Овим мерама може се знатно утицати првенствено на корозију у процепу, галванску, ерозиону и напонску корозију. Код конструисања је препоручљиво придржавати се следећих смерница:

- ✓ Заварени спојеви, ако су добро изведени, имају првенство пред завојним и залемљеним спојевима или закивцима код којих је честа појава корозије у процепу (сл.5.1).



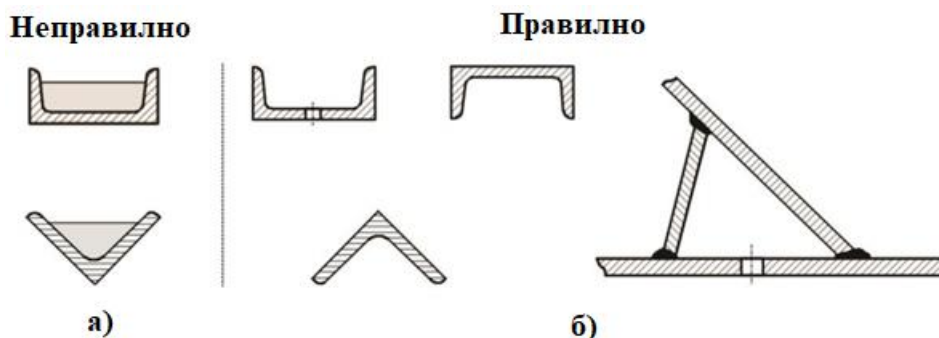
Слика 5.1 Пример смањивања корозије употребом заварених спојева

- ✓ Свим наведеним врстама спојева (заваарима, закивцима, завртњима) треба посветити посебну пажњу. При спајању различитих метала треба тежити да спојни елементи буду катодни, а не анодни метали. Другим речима, спојни елемент мора бити од племенитијег метала да би у галванском пару преузео улогу катоде. Друкчије речено, завртњи, навртке, лемови и заварени спојеви (сл.5.1) морају увек бити израђени од племенитијег метала него спајани делови.

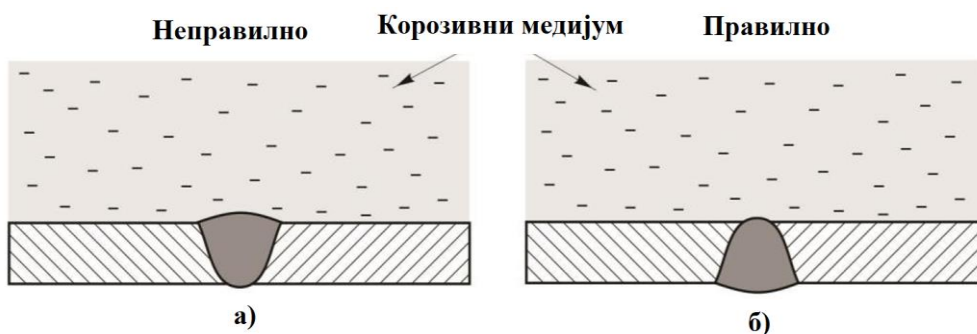


Слика 5.2 Спојеви изведени: а) заваривањем, б) закивањем, в) лемљењем и г) завртњем

- ✓ Конструкцију треба обликовати тако да се на њој не задржава вода, односно треба осигурати отицање воде (сл. 5.3). Генерално, при деловима који раде у атмосферским условима треба се одредити за склопове који не задржавају влагу и воду у отвореним деловима конструкције. При завареним спојевима, исте треба позиционирати/усмерити тако да у што мањој мери буду изложени електролиту (сл. 5.4).

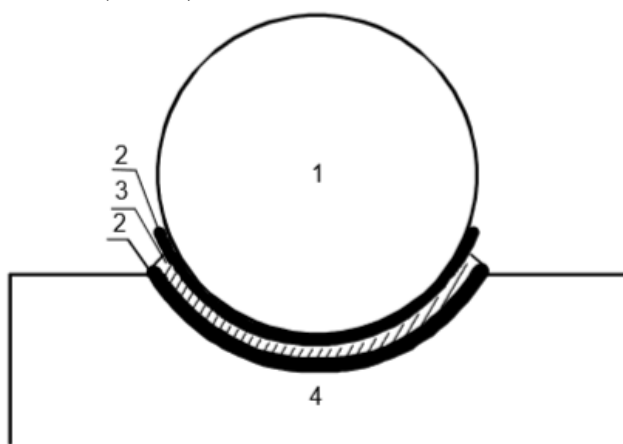


Слика 5.3 Примери неправилних (а) и правилних (б) положаја са аспекта заштите од корозије



Слика 5.4 Неправилно (а) и правилно (б) постављање сучеоног споја у односу на електролит

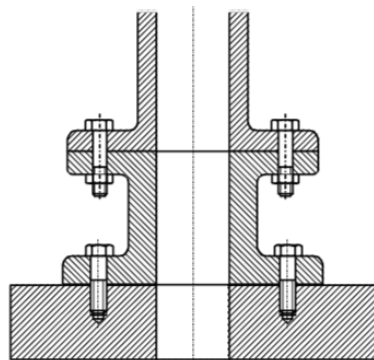
- ✓ Резервоари, spremници и сличне посуде морају се тако конструисати да се лако празне и чисте. На пример, код фиксних цистерна, поред празнења и чишћења, њихов темељ треба фундирати тако да се избегне нагомилавање влаге на површини ослањања (сл.5.5)



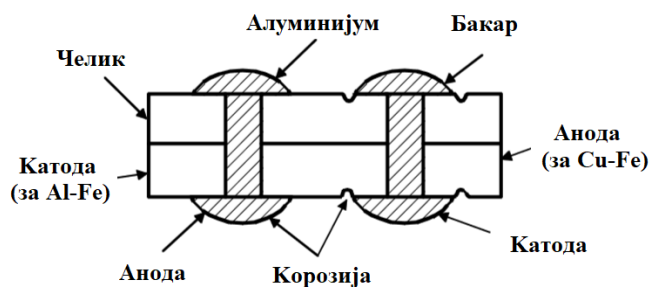
Слика 5.5 Правилно фундирање цистерне: 1 – метална цистерна, 2 – битумен, 3 – тканина од стаклених влакана, 4 – бетонски темељ

- ✓ Пројектним решењима осигурати једноставно и јефтино одржавање.
- ✓ Осигурати да се компоненте у саставу код којих се очекује бржа корозија могу лако и једноставно заменити.
- ✓ Избежавати механичка напрезања због смањења опасности од напонске корозије.
- ✓ Избежавати оштре прелазе у цевоводним саставима ради смањења опасности од ерозионе корозије.
- ✓ Избежавати додир различитих метала удаљених у галванском низу ради спречавања галванске корозије. Пример употребе посредних елемената у циљу спречавања галванске корозије приказан је на слици 5.6. Галванска (електрохемијска) корозија настаје када се испуне следећи услови:
 - спрегнути метали се разликују по електродним потенцијалима више од 50mV
 - метали су у директном међусобном контакту,
 - оба метала су у додиру са истим електролитом и
 - електролит садржи растворен O_2 или киселине, што доприноси успостављању и одржавању катодног процеса.

На слици 5.7 је приказан пример у ком су испуњени поменути услови.



Слика 5.6 Посредно спајање два дела од различитих метала



Слика 5.7 Неправилна спрега различитих метала

- ✓ Избежавати локална интензивна загревања, јер се корозија јако убрзава порастом температуре.
- ✓ Избежавати контакт са агресивним честицама кад год је то могуће.
- ✓ Избежавати сваку хетерогеност (локална напрезања, температурске разлике, места где се скупља влага и тсл.)
- ✓ Код конструкције треба бирати материјале који су корозивни што отпорнији у предвиђеним условима. Материјали за заптивање, термичку, електричну и звучну изолацију не смеју садржавати агресивне састојке и не смеју апсорбовати воду.

Све наведене конструкционе мере треба користити што је могуће више у циљу успоравања корозивних процеса и продужавања века трајања конструкција, као и постизања пројектоване корозивне постојаности.

Корозија у зазорима је корозивни облик на који се јако може утицати конструкционим мерама. Јавља се у близини прслина, процепа, размака између површина, испод наслага нечистоћа, на местима где се дуго задржава агресивни медијум и др. Може бити иницирана корозивним електролитом у пукотини и ако је околна површина сува. Ако се конструкција налази у раствору, онда се као резултат електрохемијске реакције у унутрашњем делу пукотине мењају услови (расте киселост, пада рН-вредност, повећава се концентрација агресивних чиниоца).

Услед тога унутрашњи део зазора (процепа) постаје анода, а на спољнем делу се одвија катодна реакција. За време заваривања сложених конструкција врло се лако стварују предуслови за развој овог облика корозије, па је потребно водити рачуна на правилну припрему и избор завареног споја и да се спајање заваривањем изведе без грешке. Предуслови за развој корозије у процепу могу бити и непроварени коренски део заваара, испрскане металне капљице, лош избор подлоге за заваривање и др. Да би се умањила могућност појаве корозије у зазору потребно је изводити континуалне и правилно изведене заваре (посебно се то односи на добро проварен коренски део заваара) и дати предност сучеоним спојевима над преклопним кад год то конструкциони услови дозвољавају.

При изради машинских конструкција употребљују се разни профили као основни конструкциони елементи. Профиле је потребно поставити тако да се омогући отицање воде и избегне скупљање наслага нечистоћа испод којих се налази влага стварајући идеалне услове за настанак корозије. Насlage ће мање настајати ако се избегавају оштре странице. Често се на основне профиле стављају разна ребра ради повећања крутости и носивости. Ребра треба конструисати тако да се омогући отицање воде, јер из аспекта корозивне заштите задржавањем воде стварамо идеалне услове за иницирање почетка корозије. Вода и влага се могу задржавати и испод материјала који апсорбују воду, а употребљавају се за паковање и заптивање, па је потребно и о томе водити рачуна. Код стопа носача треба избегавати употребу ребара и користити друге облике ојачања.

Када је приликом израде конструкције немогуће избећи зазор (процеп), потребно га је отворити, односно оставити довољан размак између делова да агресивни електролити могу слободно отицати.

Галванска корозија се јавља када код израде конструкција није могуће користити све делове израђене од истог материјала. Тада услед контакта материјала који имају различити електродни потенцијал долази до појаве галванске корозије. Када су у неком електролиту у контакту два метала различитих корозивних потенцијала, више ће кородирати материјал са вишим корозивним потенцијалом. Код тог процеса више отпоран материјал је катода, а мање отпоран материјал који се брже троши је анода. Због свега тога потребно је избегавати међусобни контакт два метала битно различитих електродних потенцијала. Ако то није могуће, корозија се умањује коришћењем разних изолационих материјала и превлака које спречавају непосредни додир тих метала. Када је електролит изузетно агресиван или су високе радне температуре, такве изолације често није могуће поставити, јер би биле брзо разорене. У таквим случајевима треба користити племенитији метал за спајање делова мање племенитог метала. При томе је потребно водити рачуна на правилан однос анодне и катодне површине у галванском пару. Анодно подручје по правилу мора бити много веће од катодног, па је на тај начин могуће спајати и неспојиве материјале из корозивног аспекта, без угрожавања корозивне постојаности.

Код спајања материјала са превлакама потребно је придржавати се правила да се никада не сме употребити превлака само на аноди, већ се заштитна превлака наноси на аноди и катоди или само на катоди.

Напонска корозија, као што је споменуто у претходним поглављима, узрокује разарање метала које настаје као последица статичког напрезања на затезање делова конструкција у корозивној агресивној средини.

На овај тип корозије нарочито су осетљиви аустенитни Cr-Ni челици који се накнадно хладно обликују и она представља велики проблем у петрохемијској индустрији. Код пројектовања технологије израде потребно је обратити пажњу на елиминисање у највећој могућој мери места локалних напрезања због крутости и облика конструкције. Заостали напони се јављају и приликом заваривања, па је и на то потребно обратити посебну пажњу. Кад је конструкција изложена агресивном електролиту који садржи хлориде, прсине напонске корозије појављују се најчешће у ЗУТ-у. Испупчени облик шавова (вара) уобичајено има мању склоност ка појави прсина од удубљеног, па шавове првенствено код сучеоних спојева треба изводити с ужим и испупчаним лицем, а не са широким удубљеним. Заштита избором корозивно постојаних материјала, при пројектовању неког објекта, без обзира да ли производног, транспортног, грађевинског или другог типа или намене, потребно је узети у обзир све чињенице од којих ће зависити његова трајност и употребна вредност. Објекат треба током предвиђеног времена употребе задржати своја физичка и хемијска својства. Једноставније речено, објекат током предвиђеног трајања не сме мењати своја употребна својства више него што је предвиђено пројектом. До смањења увек долази, али при пројектовању треба користити материјале и конструкциона решења којима ће се осигурати његова технолошка употреба и економска оправданост.

Применом корозивно постојаних материјала настоји се смањити склоност ка настанку корозије. Избор одговарајућег материјала зависи од низа фактора, као што су: механичка својства, очекивани век трајања, естетски изглед, корозивна постојаност и цена. Најчешће примењивани корозивно постојани материјали који се користе код машинских конструкција су:

- ✓ полимерни материјали и њихови композити,
- ✓ титан и његове легуре, алуминијум и његове легуре - нпр. технички чисти Al, Al-Mg, Al-Mn, Al-Cu-Mg и др.,
- ✓ Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu, бакар и његове легуре,
- ✓ никл и његове легуре - Ni-Cu, Ni-Mo,
- ✓ племенити метали или легуре - Ag, Au, Pt, Zr, Ta,
- ✓ високолегирани племенити челици и челични ливови,
- ✓ феритни, аустенитни мартензитни, дуплекс челици и ливови,
- ✓ порцулан,
- ✓ стакло,
- ✓ бетон,
- ✓ емајл,
- ✓ техничка керамика,
- ✓ графитни (угљенични материјали) и др.

6. ЗАКЉУЧАК

Штета коју корозивни процеси наносе металним деловима и конструкцијама на годишњем нивоу се мери милијардама еура.. Посебно добри услови за настанак и развој корозионих процеса постоје у енергетским и металуршким постројењима, као и у хемијској, прехранбеној, текстилној и металопраћивачкој индустрији. Како би се у што већој мери успорила или смањила, корозији је посвећена велика пажња у свакој од поменутих индустрија, а нарочито у свету науке као основе сваке индустрије.

У оквиру овог рада, уочени су и јасно дефинисани сви корозивни процеси у разним агресивним окружењима за најважније метале и легуре. Описани су најважнији физичко-хемијски процеси корозије и дато је њихово разврставање. На пример, према механизму процеса, средини у којој се налази конструкциони материјал, материјалу који кородира, индустријској грани или врсти постројења, односу између корозије и других штетних процеса, геометријском облику корозивних разарања и тсл.

Такође, описан је начин настајања корозивних продуката за сваки наведени вид корозије, и указано на значај познавања система „МАТЕРИЈАЛ + ОКРУЖЕЊЕ = КОРОЗИВНИ ПРОДУКТ“ у циљу заштите материјала конструкције. Они се свде на следеће:

- изоловати материјал од окружења (електрохемијским путем, стварањем пасивног површинског слоја или превлакама),
- регулисањем састава окружења, употребом инхибитора мењају се својства корозивног окружења после чега иста средина мења свој начин деловања на метал, успорава (кочи) корозију или је у потпуности зауставља.

Додатан начин заштите металних делова и конструкција јесте заштита обликовањем и конструкционим мерама. У фази развоја конструкције постоји велики број начина, а уједно и фактора који могу утицати на брзину корозије конструкције за време експлоатације. Почевши од избора материјала (избор корозивно постојаних материјала) па до облика конструкције у циљу лаког отицања воде и прљавштина, избегавања додира различитих метала удаљених у галванском низу итд. Овакав вид заштите је неопходан код сваке конструкције како би се смањили трошкови заштите од корозије, трошкови одржавања и одржао тражени квалитет.

Квалитет металних конструкција је најчешће обрнуто пропорционалан корозивним процесима, те је због тога уско повезан са корозијом. У циљу одржавања квалитета, као главни "алати" користе се стандарди. Стандарди који се користе на глобалном нивоу попут ISO (*International Standard Organisation*) обухватају широки спектар унутар и ван инжењерства. Тако су делом оријентисани и на заштиту од корозије. На пример, интернационални стандард EN ISO 12944 се бави заштитом челичних металних конструкција. Он обухвата препоруке за заштиту наношењем превлака, препоруке о начинима конструисања, методе лабораторијских испитивања, испитивања превлака итд. Осмишљен је тако да се може применити у великом броју случајева. Постоје јасне класе атмосферских утицаја (подељене на шест нивоа) базиране на корозији цинка током једне године. На основу њих и карактеристика изабраног материјала јасно се могу дефинисати и потом изабрати одговарајући типови заштите.

Поред стандарда ISO 12944, који се бави заштитом на глобалном нивоу, постоје и пропратни стандарди који се баве разним процесима уско повезаним за заштиту метала од корозије (а који нису детаљно објашњени у стандарду ISO 12944) попут припреме површине за заштиту (ISO 8504) итд. Коначно, за сваки опште познати начин заштите постоји одговарајући стандард. На пример, за галванизацију EN ISO 1461, за превлаке од алуминијума и цинка EN 15773 и тсл.

Већина индустријских постројења се прилагођава прописима и у обавези су да поштују одредбе стандарда (углавном су то интернационални ISO стандарди прилагођени одговарајућем региону - на пример у Немачкој: ISO DIN 12944) како због одржавања квалитета и заштите машинских конструкција, тако и према еколошким захтевима, тј. спречавању загађења животне средине. Тиме су загарантовали квалитет и у исто време олакшали одржавање.

Дакле, услед разних врста корозивних процеса, развијене су разне методе заштите металних делова и конструкција. Коју методу одабрати и применити често је деликатно питање у пракси. Зато су од велике користи међународни стандарди и препоруке у циљу одабира методе заштите, како би се штетни утицаји умањили. Због тога је употреба стандарда постала обавеза како код великих тако и код малих фирми.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима*, Факултет инжењерских наука, Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [2] В. Ђорђевић: *Машински материјали - први део*, Машински факултет, Београд, 1999.
- [3] Р. Лучић: *Машински материјали*, Научно инжењерство, II издање, "Вук Караџић", Параћин, 1995.
- [4] М. Јовановић, В. Лазић: *Машински материјали - рукописи предавања*, Машински факултет - Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017-2018.
- [5] Revie, W., Uhlig., H., *Corrosion and Corrosion Control, An Intoduction to Corrosion Science and Engineering*, 4th Edition, Wiley Interscience, New Jersey, 2008.
- [6] ISO 8044:2015, *Corrosion of metals and alloys – Basic terms and definitions*, доступно на: <https://www.iso.org/standard/66233.html> , приступљено 24. 4. 2019.
- [7] ASM Volume 13A: *Corrosion, fundamentals, testing and protection*, ASM International, 2003.
- [8] Revie, W., Uhlig., H., *Corrosion and Corrosion Control, An Intoduction to Corrosion Science and Engineering*, 4th Edition, Wiley Interscience, New Jersey, 2008.
- [9] М. Г. Павловић, *Неки аспекти корозије и заштите материјала*, Зборник радова – Корозија и заштита материјала у току експлоатације, стр.27, Пожаревац, 2011.
- [10] М. Трифуновић, *Стање заштите од корозије материјалних добара на подручју града Пожареваца*, Зборник радова – Корозија и заштита материјала у току експлоатације, стр.13, Пожаревац, 2011.
- [11] Ч. Лачњевац, М. Глигорић, З. Рајић, *Могућност додатне заштите челичних конструкција у земљи*, Зборник радова – Корозија и заштита материјала у току експлоатације, стр. 51, Пожаревац, 2011.
- [12] WCO – *The World Corrosion Organization*, доступно на: <http://corrosion.org/>, приступљено 24. 4. 2019.
- [13] B. Chico, D.de la Fuente, I. Díaz, J. Simancas, M. Morcillo, *Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide*, Basel, 2017.
- [14] World steel organization, доступно на: <https://www.worldsteel.org>, приступљено 24. 4. 2019.
- [15] Коцић Д.: *Методе заштите метала од корозије*, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Дипломски рад, Крагујевац, 2000.
- [16] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indolf, *Svojstva i primena materijala*, FSB, Zagreb, 2002.
- [17] P. Marcus, J. Oudar, *Corrosion Mechanisms in Theory and Practise*, New York, 1995.
- [18] Михаил Б., *Корозија - Скрипта*, Војна академија, Београд 2015.

- [19] Петровић З., *Корозија у ваздухопловним конструкцијама*, Војнотехнички гласник, Београд, 2016.
- [20] А. Војић, *Нemijska korozija metala – Скринта*, Машински факултет, Универзитет у Нишу, Ниш, 2019.
- [21] E. E. Stansbury, R. A. Buchanan, *Fundamentals of Electrochemical Corrosion*, ASM international, Materials Park, Ohio, 2000.
- [22] Inženjersko društvo za koroziju, *Корозија и заштита метала*, Монографија, Београд, 2012.
- [23] Intercomparison of thermodynamic databases, *Atlas of Eh-pH diagrams*, Geological Survey of Japan Open File Report No. 419, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Research Center for Deep Geological Environments Naoto TAKENO, May, 2005
- [24] А. Р. Деспих, *Основи Електрохемије*, Завод за издавање уџбеника, Београд 2003.
- [25] А. Р. Деспих, *Електрохемијске технике и технологије*, Српска академија наука и уметности, Београд, 2005.
- [26] *Electrode-potential*, доступно на: <http://googlegalaxyscience.com/electrode-potential/>, приступљено 6. 4. 2019.
- [27] P. R. Roberge: Handbook of corrosion engineering, McGraw-Hill, New York, 1999.
- [28] D. A. Jones, *Principles and preventions of corrosion*, Prentice Hall, University of Michigan, Michigan 1996.
- [29] E. D. Durning, „Corosion atlas - A Collection of Illustrated Case Histories“, Elsevier Science, 1997.
- [30] Jones, R. H., *Stress corrosion cracking*, ASM, International, Materials Park, 1992.
- [31] Marcus, P., Oudar, J., *Corrosion Mechanisms in Theory and Practise*, New York, 1995.
- [32] Stress corrosion, доступно на: <https://corrosion-doctors.org/Forms-SCC/scc.htm>, приступљено, 12. 4. 2019.
- [33] Protective Coatings Europe, Volume 7, July 2002.
- [34] Erosion corrosion, доступно на: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/erosion-corrosion>, приступљено 13.4.2019.
- [35] M.Y. Naz, S.A. Sulaiman, S. Shukrullah, A. Ghaffar, K.A. Ibrahim, N.M. AbdEl-Salam, *Development of Erosion-Corrosion Mechanisms for the Study of Steel Surface Behavior in a Sand Slurry*, Elsevier, 2017.
- [36] E. Mahdi, A. Rauf, S. Ghani, A. El-Noamany and A. Pakari, *Erosion-Corrosion Behavior and Failure Analysis of Offshore Steel Tubular Joint*, International Journal of Electrochemical Science, 2013.
- [37] Erosion corrosion – Attack corrosion, доступно на: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/corrosion-attack>, приступљено 13.4.2019
- [38] I. Beech, A. Bargel, A. Mollica, H. Flemming, V. Scotto, W. Sand, *Microbially influenced corrosion of industrial materials*, Biofilms Publication, September 2000.

- [39] *Трајност армиранобетонских конструкција у условима корозионе средине*, Грађевински факултет Универзитета у Београду, доступно на: http://www.grf.bg.ac.rs/p/learning/trajnost_1447945389782.pdf, приступљено 24.4.2019.
- [40] доступно на: <https://sr.blog-oremonte.ru/izgradnja/korozija-betona-vrste-mekhanizmi-metode-zashtite.html>, приступљено 24.4.2019.
- [41] Brown, B.F., *Stress Corrosion Cracking Control Measures*, NBS Monograph 156, NACE, Huston, 1981.
- [42] Uhlig, H.H., Revie, R.W., *Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering*, John Wiley and Sons, New York, 1985.
- [43] U. Nürnberger: *Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen*, Bauverlag, 1995.
- [44] Заштита материјала, доступно на: <http://www.scribd.com/doc/85067398/skripta-Zastita-materijala>, приступљено 3.5.2019.
- [45] Доступно на: <http://periodictable.com/Items/013.32/index.html>, приступљено 3.5.2019.
- [46] Доступно на: <http://images-of-elements.com/aluminium-4.jpg>, приступљено 3.5.2019.
- [47] Доступно на: <http://www.getit.in/best-metal/product/aluminium/2176625/1823252/>, приступљено 3.5.2019.
- [48] Marsh, P.G., Gerberics, W., *Stress-Corrosion Cracking of High-Strength Steels (Yield Strengths Greater than 1240 MPa)*, in *Stress-Corrosion Cracking*, R.H. Jones Ed, ASM, Ohio, 1992, Chapter 3, pp.41-63.
- [49] Hertzberg, R.W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, J. Wans Sons, New York, 1983.
- [50] Davis, J.R., *Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM, Ohio, 1999.
- [51] Speidel, M.O., *Stress corrosion cracking of aluminum alloys*, Metall. Trans. A, Vol. 6A, 1975, pp.631-651.
- [52] Fontana, M.G., Steahle, R.W., Eds., *Advances in Corrosion Science and Technology*, Vol. 2, Vol. 3, and Vol. 7, Plenum Press, New York, 1972, 1973, 1980.
- [53] *Corrosion*, Metals Handbook, Vol. 13.
- [54] Доступно на: <https://www.livescience.com/29327-nickel.html>, приступљено 3.5.2019.
- [55] Доступно на: <http://www.totalmateria.com/Article18.htm>, приступљено 3.5.2019.
- [56] Доступно на: https://www.nickelinstitute.org/media/1829/thecorrosionresistanceofnickelcontainingalloysinsulphuricacidandrelatedcompounds_1318.pdf, приступљено 3.5.2019.
- [57] Доступно на: https://www.eng.tau.ac.il/~neliaz/Papers_Files/B11_11.pdf, приступљено 3.5.2019.
- [58] Доступно на: <https://www.nickelinstitute.org/about-nickel/copper-nickel-alloys/corrosion-resistance-of-copper-nickel-alloys/>, приступљено 3.5.2019.

- [59] Доступно на: <https://www.nickel-alloys.net/>, приступљено 3.5.2019.
- [60] Доступно на: <http://periodictable.com/Items/029.28/index.html>, приступљено 3.5.2019.
- [61] Доступно на: <http://images-of-elements.com/copper-crystal-2.jpg>, приступљено 3.5.2019.
- [62] Доступно на: <http://www.057info.hr/vijesti/2011-02-25/novi-biznis-bakar-se-krade-na-sve-strane>, приступљено 8.5.2019.
- [63] H.N.Uhlig, R.W. Revie, *Corrosion and corrosion control, third Edition*, A Wiley-Interscience Publication, str.327 – 354
- [64] Доступно на: <http://www.copperinfo.co.uk/alloys/brass/>, приступљено 8.5.2019.
- [65] Доступно на: <http://hghouston.com/resources/corrosion-images/dezincification-corrosion-of-admiraltybrass.aspx>, приступљено 8.5.2019.
- [66] Доступно на: <https://www.belmontmetals.com/product-category/zinc-alloys/>, приступљено 8.5.2019.
- [67] Доступно на: <http://proizvodno-strojarstvo.blogspot.com/2011/07/olovo-i-njegove-legure.html>, приступљено 14.5.2019.
- [68] Доступно на: https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2016_04_18_12_03_45_PM.pdf, приступљено 14.5.2019.
- [69] Доступно на: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/lead-alloy>, приступљено 14.5.2019.
- [70] Доступно на: <https://www.scribd.com/presentation/378680087/Kalaj-i-Njegove-Legure>, приступљено 14.5.2019.
- [71] Доступно на: <https://prezi.com/xfdtnfdqcnig/magnezijum-i-legure-magnezijuma/>, приступљено 14.5.2019.
- [72] Доступно на: <https://www.corrosion-doctors.org/MatSelect/corrsilver.htm>, приступљено 14.5.2019.
- [73] E. Stupnišek-Lisac, *Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala*, FKIT, Zagreb, 2007.
- [74] Доступно на: <https://stoprust.com/cathodic-protection/>, приступљено 23.5.2019.
- [75] ASM International, *Corrosion fundamentals, testing, and protection*, ASM handbook – Volume 13, 2000.
- [76] Доступно на: <http://slideplayer.com/slide/5832206/>, приступљено 23.5.2019.
- [77] Пејовић, Б., Томић. М.В., Павловић, М.Г., *О неким методама за отклањање продуката корозије метала у пракси*, Зборник радова, X YUCORR, Тара, 2008., стр. 251-254.
- [78] Доступно на: <https://www.scribd.com/document/333891286/Galvanizacija>, приступљено 23.5.2019.
- [79] Доступно на: <http://www.acmegalv.com/pdfs/THE-GALV-PROCESS.pdf>, приступљено 23.5.2019.

- [80] Доступно на: <http://www.posco.com/homepage/docs/eng5/dn/company/product/galvanizedsteel.pdf>, приступљено 23.5.2019.
- [81] Доступно на: <https://gaa.com.au/galvanizing-process/>, приступљено 23.5.2019.
- [82] Доступно на: <http://www.industrialpolymers.com/product-uses/coatings>, приступљено 1.6.2019.
- [83] Доступно на: <http://www.bailac.cl/recauchaje-otr/?lang=en>, приступљено 1.6.2019.
- [84] Доступно на: <https://www.sprimag.com/en/coating-machines-products/surface-coating/round-table-coating-machine/>, приступљено 1.6.2019.
- [85] Доступно на: <https://www.teknos.com/globalassets/teknos.com/industrial-coatings/metal-wet-paints-general/handbook-for-corrosion-protection.pdf>, приступљено 1.6.2019.
- [86] Доступно на: <https://www.infosteel.be/images/publicaties/guide-to-protection-of-steel-against-corrosion.pdf>, приступљено 1.6.2019.
- [87] Доступно на: <http://srla.newecoresin.com/info/resin-heavy-anti-corrosion-frp-lining-anti-cor-33236355.html>, приступљено 2.6.2019.
- [88] Доступно на: http://phys.mech.nw.ru/e-journals/RAMS/no_2905/narayanan.pdf, приступљено 5.6.2019.
- [89] Доступно на https://www.rit.edu/affiliate/nysp2i/sites/rit.edu.affiliate.nysp2i/files/pdfs/phosphating_final.pdf, приступљено 7.6.2019.