



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING

OCHRANA OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ PROTI KOROZI

PROTECTION OF STEEL CONSTRUCTIONS AGAINST CORROSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

JIŘÍ MAREŠ

Ing. EVA NOVOTNÁ Ph.D., Paed IGIP

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Mareš

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: Strojní inženýrství (2301R016)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Ochrana ocelových konstrukcí proti korozi

v anglickém jazyce:

Protection of Steel Constructions against Corrosion

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se ve své závěrečné práci bude věnovat problematice koroze vybraných konstrukčních celků a popíše možné metody ochrany těchto ocelových konstrukcí proti korozi.

Cíle bakalářské práce:

Při zpracování tématu práce se student seznámí s podstatou koroze, s jejími formami a vlivem různých prostředí na korozní procesy. Dále se bude věnovat korozním charakteristikám vybraných konstrukčních ocelí a vytvoří přehled možností ochrany zmíněných konstrukcí proti korozi. V závěru práce se zmíní o možnostech monitoringu koroze.

Seznam odborné literatury:

1. Revie, R. W., Uhlig, H. H.: Inhibitors and Passivators, in Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2008. ISBN: 9780471732792
2. Craig, B.D., Lane, R.A., Rose, D.H.: Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials. Ammtiac, U.S.A., 2006.
http://ammtiac.alionscience.com/pdf/Corrosion_Hdbk_S2.pdf, 26.2.2013
3. Davis, J.R.: Corrosion: Understanding the Basics. ASM, U.S.A., 2000. ISBN: 978-0-87170-641-6

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou koroze a možnostmi protikorozní ochrany ocelových konstrukcí. Postupně jsou zmíněny principy a mechanismy elektrochemické koroze, formy korozního napadení a vlivy prostředí na korozní procesy. Dále je věnována pozornost specifickým ocelovým konstrukcím a možnosti jejich protikorozní ochrany. V závěru jsou popsány metody korozního monitoringu.

KLÍČOVÁ SLOVA

korozí, protikorozní ochrana, monitoring, ocel, konstrukce, prostředí

ABSTRACT

This thesis is focused on the issues of corrosion and anti-corrosion control of steel structures. Firstly, the principles and mechanisms of electrochemical corrosion are discussed along with the specific forms of corrosion and how the environment influences the corrosion process. Additionally, options for anti-corrosion control are discussed as it relates to specific steel structures. Finally, the methods of corrosion detection and monitoring are discussed.

KEYWORDS

corrosion, anti-corrosion protection, monitoring, steel, structure, environment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAREŠ, J. *Ochrana ocelových konstrukcí proti korozi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Novotná, Ph.D., Paed IGIP.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Evy Novotné, Ph.D., Paed IGIP a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2013

.....

Jiří Mareš

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Evě Novotné, Ph.D., Paed IGIP za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	1
1 Úvod	10
2 Definice koroze.....	11
3 Mechanismy a principy důležité pro korozi	12
3.1 Chování materiálu v prostředí.....	12
3.1.1 Imunní chování	12
3.1.2 Aktivní chování	12
3.1.3 Pasivní chování.....	12
3.1.4 Vlastní reaktivita kovu	12
3.1.5 Termodynamika elektrochemické koroze	13
3.1.6 Elektrochemický potenciál	14
3.1.7 Diagramy potenciál-pH	14
3.2 Kinetika elektrochemické koroze	17
3.2.1 Teorie smíšených potenciálů	17
4 Formy koroze.....	19
4.1 Rovnoměrná koroze	19
4.2 Bodová koroze	19
4.3 Štěrbinová koroze	19
4.4 Mezikrystalová koroze.....	20
4.5 Korozní praskání.....	21
5 Vliv prostředí.....	23
5.1 Atmosférická koroze.....	23
5.2 Půdní koroze	24
5.3 Koroze ve vodě	25
6 Oceli a jejich odolnost proti korozi	27
6.1 Nelegované a nízkolegované oceli.....	27
6.2 Korozivzdorné oceli.....	27
6.3 Feritické a martenzitické korozivzdorné oceli.....	28
6.4 Austenitické korozivzdorné oceli	28
6.5 Duplexní korozivzdorné oceli.....	28
7 Ochrana ocelových konstrukcí proti korozi.....	29
7.1 Ochrana mostních konstrukcí proti korozi.....	29
7.1.1 Používané typy ocelí.....	29
7.1.2 Cementové prvky vyztužené ocelí.....	29
7.1.3 Části mostu zapuštěné v zemi.....	30

7.1.4	konstrukční řešení snižující pravděpodobnost lokální koroze.....	30
7.1.5	Systém uzavření nosné konstrukce.....	32
7.2	Ochranné povlaky ocelových konstrukčních částí.....	32
7.2.1	Organické povlaky.....	32
7.2.2	Metallické povlaky	33
8	Korozní monitoring	35
8.1	Kupónové testování	35
8.2	Sondy elektrického odporu	35
8.3	Sondy indukčního odporu	35
8.4	Elektrochemický šum	35
8.5	Chemická analýza	35
8.6	Korozní potenciál.....	35
8.7	Metoda elektrického pole.....	35
8.8	Akustické emise	36
9	Závěr.....	37
	Použité informační zdroje.....	38
	Seznam použitých zkratk a symbolů	39

1 Úvod

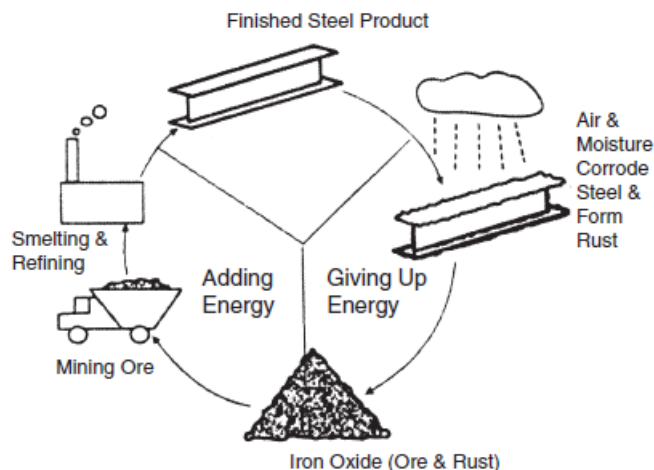
Koroze, i když se to na první pohled nemusí zdát, ovlivňuje náš každodenní život a to jak přímo tak nepřímo. V našich domovech je protikorozní ochrana použita ve většině nezbytného vybavení domácnosti, například v ohřívačích vody, potrubí, topení atd. Nepřímo se pak s korozí setkáváme v obchodech, kdy jsou dodavatelem do ceny produktů zahrnuty náklady spojené s korozí [1].

Problematika protikorozní ochrany ocelových konstrukcí je obzvláště důležitá. Její zanedbání může mít dalekosáhlé následky. Například narušení statiky, až kolapsu části či celé konstrukce a způsobení tak vážného ohrožení na životech. Koroze má také relativně velké důsledky pro naši ekonomiku. Je odhadováno, že v průmyslově vyspělých státech koroze způsobuje ekonomice ztráty ve výši 4 až 5 % hrubého domácího produktu. V roce 2012 byl HDP České republiky 3 843 mld. Kč, to znamená, že koroze způsobila ekonomice ztráty cca 172 mld. Kč. Tyto ztráty by se podle odhadů daly snížit zhruba o jednu čtvrtinu, pokud by byly lépe aplikovány materiály odolné proti korozi a další formy protikorozní ochrany [1].

Fakt že tyto ztráty lze výrazně snížit vytváří příležitosti pro dodavatele a výrobce, kteří se touto problematikou zabývají. V posledních letech v technologiích ochrany proti korozi učinil největší pokrok automobilový průmysl. Pokroky učinil zejména v technologiích týkajících se používání korozivzdorných ocelí, povlacích a efektivnějších finishích a také v substituování ocelí za jiné materiály pro snížení celkové váhy automobilů [1].

2 DEFINICE KOROZE

Většina kovů se v přírodě nevyskytuje v čisté formě. K tomu, aby bylo možné je průmyslově používat, je třeba je zpracovat a tím jim dodat určité množství energie. Kov je ovšem po zpracování zpravidla nestabilní, má tendenci korodovat a tím uvolňovat energii mu dodanou do okolního prostředí. Snižuje tak svou energii na minimum a přechází tak opět do své stabilní formy. Tento proces ilustruje obrázek 1 [1] znázorňující korozní cyklus oceli [1].



Obrázek 1 - korozní cyklus oceli [1]

Korozi lze definovat mnoha způsoby. Slovo koroze je odvozeno od latinského slova „corrodere“, což doslova znamená „rozhrýzat na kousky“. Obecně lze říci, že jde o přirozený proces, při kterém dochází ke snižování energie korodujícího materiálu na minimum. Pro účely této práce bude koroze definována jako, chemická či elektrochemická reakce mezi materiálem a prostředím ho obklopujícím, která má za následek degradaci materiálu, úbytek jeho hmotnosti a zhoršení jeho vlastností [1].

Pod pojmem prostředí rozumíme vše, co materiál obklopuje a co je v kontaktu s jeho povrchem. Prostředí popisujeme zejména následujícími charakteristikami: skupenstvím, chemickým složením a teplotou. Pokud to situace vyžaduje, je možno přidat další, například: zatížení materiálu, relativní rychlost roztoku prostředí vzhledem k materiálu atd. [1].

3 MECHANISMY A PRINCIPY DŮLEŽITÉ PRO KOROZI

Pro pochopení podstaty koroze, její předvídání a následné zvolení vhodné ochrany, je třeba uvést principy a mechanismy, kterými se koroze řídí a podle kterých probíhá. Je třeba dodat, že i když některé principy a mechanismy se dají aplikovat i na korozi probíhající v oxidačně a redukčně působících plynech, je tato kapitola převážně věnována korozi probíhající za přítomnosti vody a to z důvodu rozsahu práce, který není dostatečný pro to, aby zde bylo popsáno obojí [1].

3.1 CHOVÁNÍ MATERIÁLU V PROSTŘEDÍ

3.1.1 IMUNNÍ CHOVÁNÍ

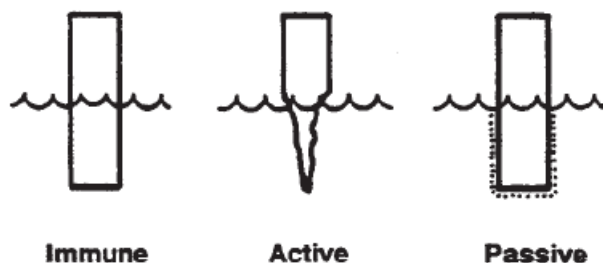
Neprobíhá žádná reakce mezi kovem a prostředím, tedy neprobíhá žádná koroze. Říkáme, že je kov vůči prostředí imunní, systém je termodynamicky stabilní a korozní reakce samovolně neproběhnou (viz Obrázek 2 [1]) [1].

3.1.2 AKTIVNÍ CHOVÁNÍ

V tomto případě kov koroduje, rozpouští se v prostředí a výsledkem reakce mezi kovem a prostředím jsou produkty v prostředí rozpustné, které další korozi nijak neomezuji. Dochází k úbytku hmotnosti kovu (viz Obrázek 2 [1]) [1].

3.1.3 PASIVNÍ CHOVÁNÍ

Pokud se kov chová pasivně, znamená to, že koroduje, ale výsledkem reakce jsou nerozpustné produkty usazující se na povrchu kovu. Ty vytvářejí na povrchu kovu tzv. pasivační povlak, který další korozi omezuje. Do jaké míry jsou reakce omezeny je dáno kompaktností utvořeného povlaku (viz Obrázek 2 [1]) [1].



*Obrázek 2 - možné způsoby chování materiálu v prostředí,
vlevo - imunní, uprostřed - aktivní, vpravo – pasivní [1]*

3.1.4 VLASTNÍ REAKTIVITA KOVU

Každý kov má svou vlastní tendenci korodovat. Kovy s velmi malou tendencí jako zlato, stříbro, platina nazýváme ušlechtilé, naopak ty s velkou tendencí jako jsou lithium, draslík hořčík nazýváme neušlechtilé (viz Obrázek 3 [1]). Jako měřítko vlastní reaktivity kovu se používá standardní elektrodový potenciál, což je hodnota potenciálu elektrody určitého kovu ponořeného do roztoku jeho soli za standardních podmínek (teplota 25°C, při atmosférickém tlaku a koncentraci iontů v roztoku 1 mol/ dm³) [1].

Electrode reaction	Standard potential at 25 °C (77 °F), V-SHE
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	1.50
$\text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pd}$	0.987
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}$	0.854
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	0.800
$\text{Hg}_2^{2+} + \text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg}$	0.789
$\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	0.521
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	0.337
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0.000 (Reference)
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$	-0.126
$\text{Sn} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0.136
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0.250
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$	-0.277
$\text{Tl}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Tl}$	-0.336
$\text{In}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{In}$	-0.342
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0.403
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0.440
$\text{Ga}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Ga}$	-0.53
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0.74
$\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0.91
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0.763
$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}$	-1.18
$\text{Zr}^{4+} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{Zr}$	-1.53
$\text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ti}$	-1.63
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1.66
$\text{Hf}^{4+} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{Hf}$	-1.70
$\text{U}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{U}$	-1.80
$\text{Be}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Be}$	-1.85
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2.37
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2.71
$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}$	-2.87
$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2.93
$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}$	-3.05

Obrázek 3 - tabulka standardních elektrodových potenciálů pro kovy [1]

3.1.5 TERMODYNAMIKA ELEKTROCHEMICKÉ KOROZE

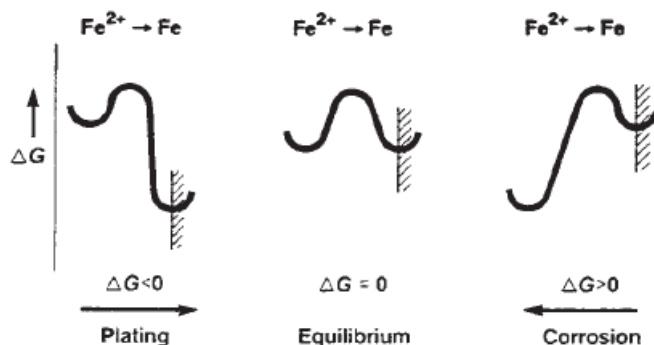
Za pomoci termodynamiky jsme schopni určit, zda bude koroze probíhat, a předpovědět, jaké stabilní produkty budou vytvořeny. Podle zákonů termodynamiky se materiál v kontaktu s okolním prostředím snaží dostat do stavu co nejmenší volné energie. Pokud kov sníží svou energii na minimum, říkáme, že je v takzvaném stavu rovnováhy (equilibriu). To znamená, že je systém vůči okolí stabilní a neexistuje v něm žádná hnací síla, která by tento stav změnila [1].

Toto lze ilustrovat na příkladu, kdy je železo ponořeno do vody. Reakce, která nás zajímá, je vylučování železnatých iontů do vody, reakce vypadá takto:



Reakce může probíhat jak zleva doprava, tak zprava doleva (viz Obrázek 4 [1]); směr reakce závisí na koncentraci železnatých iontů ve vodě. V prvním případě reakce probíhá zleva doprava a ve vodě je velká koncentrace železnatých iontů. Aby došlo k snížení volné energie systému, je třeba, aby ionty železa ve vodě vytvořili s volnými elektrony na povrchu železa atomy železa; dochází tak k pokovování. V druhém případě probíhá reakce oba směry zároveň a stejnou rychlostí, nedochází tedy k žádné celkové změně volné energie. Systém se nachází v equilibriu v tzv. stavu rovnováhy. V posledním případě probíhá reakce zprava

doleva; povrch železa se rozpouští a železné atomy se rozpadají na železnaté ionty, které přecházejí do prostředí a 2 volné elektrony zůstávají na povrchu železa; dochází ke korozi [1].



Obrázek 4 - diagramy volné energie pro reakce železnatých iontů a atomů železa [1]

3.1.6 ELEKTROCHEMICKÝ POTENCIÁL

Hnací síla elektrochemických reakcí je elektrochemický potenciál na povrchu kovu. Vztah mezi volnou energií a elektrochemickým potenciálem popisuje následující rovnice [1].

$$\Delta G = -nFE \quad (2)$$

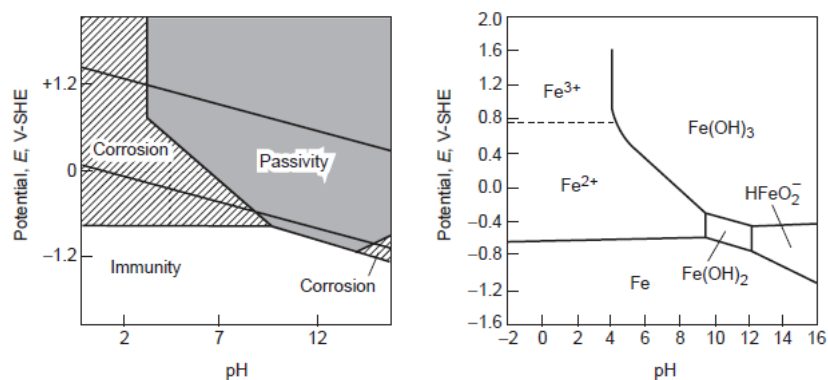
kde n je počet elektronů, které se účastní reakce, F je Faradayova konstanta a E elektrochemický potenciál. Tento potenciál je ovlivněn koncentrací iontů v prostředí podle Nernstovy rovnice [1].

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{(red)}{(ox)} \quad (3)$$

kde E je elektrodový potenciál, E^0 je standardní elektrodový potenciál, R představuje plynovou konstantu, T absolutní teplotu, n je počet elektronů účastnících se reakce, F je Faradayova konstanta a (red) a (ox) jsou koncentrace redukovaných a oxidovaných elementů. E^0 je dáno vlastní reaktivitou prvků a ta je snížena o hodnotu odvozenou z podílu koncentrací redukovaných a oxidovaných elementů [1].

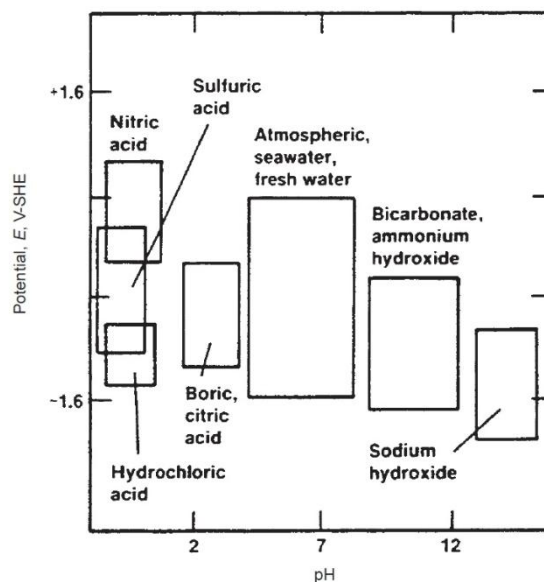
3.1.7 DIAGRAMY POTENCIÁL-pH

Tyto diagramy znázorňují termodynamické podmínky jako funkci elektrodového potenciálu (E) a koncentrace vodíkových iontů (pH) a lze z nich zjistit, za jakých podmínek kov koroduje, je stabilní, či je pasivní. Na obrázku 5 [1] můžeme vidět potenciál-pH diagram železa [1].



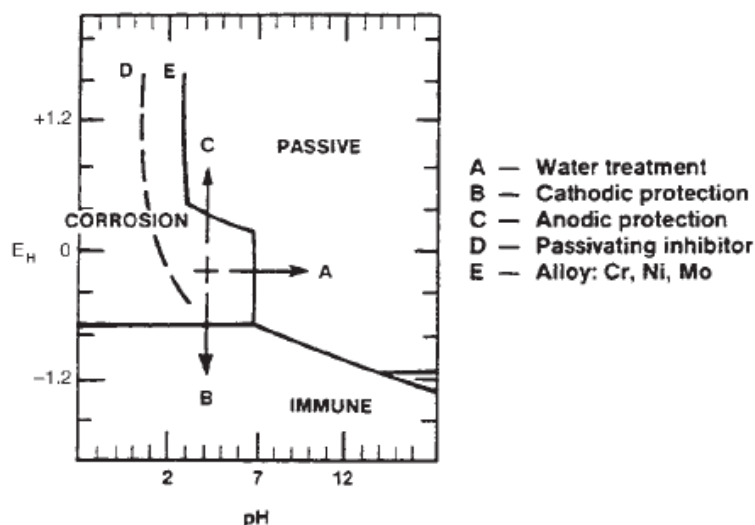
Obrázek 5 - zjednodušený potenciál-pH diagram pro železo při 25° vyobrazující vlevo - oblasti imunity, pasivity a koroze; vpravo - reakce a vznikající korozní produkty [1]

Na následujících obrázcích můžeme vidět lokaci různých korozních prostředí v potenciál-pH diagramech a také potenciál-pH diagram železa [1].



Obrázek 6 - přibližná lokace některých prostředí v potenciál-pH diagramech [1]

Tyto diagramy nám mohou posloužit jako zdůvodnění při výběru určitého typu ochrany proti korozi (viz obrázek 6 [1]) [1].



Obrázek 7 - metody ochrany proti korozi a jejich účinky zobrazené v potenciál-pH diagramu [1]

Pokud železo za daných podmínek koroduje (viz Obrázek 7 [1]), podle potenciál-pH diagramu máme několik možností, jak tomu zabránit:

- Neutralizovat kyselé pH vody a posunout se směrem A do oblasti, kde se železo chová pasivně [1].
- potenciál na povrchu železa zmenšit aplikováním katodické ochrany a dostat se tak směrem B do oblasti více redukční, kdy se železo chová imunně [1].
- pomocí anodické ochrany se posunout směrem C, do částí diagramu kde panují více oxidační podmínky a železo se chová pasivně [1].
- přidat do vody pasivní inhibitory jako třeba ionty chromu podporující tvorbu nerozpustných produktů při korozních reakcích a podpořit tak pasivní chování železa (D) [1].
- přidat do železa prvky jako například Cr, Ni, Mo, které rozšíří oblast pasivního chování železa v prostředí (E); železo s větším obsahem Cr než 12% a s Ni a Mo se chová pasivně v mnoha různých prostředích [1].

Při používání potenciál-pH diagramů je si třeba uvědomit, že neposkytují žádné informace o rychlosti reakcí zobrazených v diagramu. Může se stát, že požadovaného cíleného stavu nebude dosaženo, právě kvůli neuvážení kinetických aspektů reakcí. Dále existuje nebezpečí opomenutí některých dalších reakcí z důvodu neznalosti komplexního složení prostředí [1].

3.2 KINETIKA ELEKTROCHEMICKÉ KOROZE

Kinetika slouží k předpovědi rychlosti elektrochemických reakcí [1].

3.2.1 TEORIE SMÍŠENÝCH POTENCIÁLŮ

Tuto teorii lze použít k předpovědi rychlosti elektrochemických reakcí. Musí být ovšem splněny dvě zásadní podmínky: [1]

- Anodický a katodický proud se z důvodu zákona zachování elektrického náboje musí rovnat, to znamená, že množství elektronů generované oxidačními reakcemi musí být rovno množství elektronů spotřebovaných reakcemi redukčními [1].
- Druhá podmínka zní, že musí být přesně definovány oxidační a redukční reakce a musí se s nimi pracovat odděleně [1].

Pokud jsou tyto podmínky splněny lze proud v korozním článku vyjádřit dle následující rovnice [1].

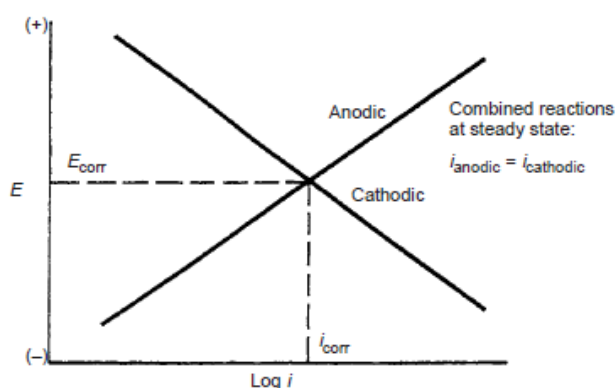
$$i = A \exp\left(\frac{nF\eta}{RT}\right) \quad (4)$$

kde i je proud v korozním článku, A je konstanta, η představuje přepětí (hnací sílu reakce) a je rovno $E - E_0$, kde E představuje potenciál na povrchu kovu a E_0 potenciál v equilibriu pro danou reakci. Dá se tedy říci, že přepětí je proporcionální $\log i$. Závislosti přepětí na $\log i$ pro anodické a katodické reakce se pak dají napsat následovně [1].

$$\eta_a = \alpha_a + \beta_a \log i \text{ (anodický)} \quad (5)$$

$$\eta_c = \alpha_c + \beta_c \log i \text{ (katodický)} \quad (6)$$

Konstanty α a β se nazývají katodické a anodické Tafelovy konstanty. Protože anodické a katodické reakce musí probíhat současně (jedna bez druhé nemohou existovat), je skutečná rychlost korozní reakce dána průsečíkem jejich křivek (viz Obrázek 8 [1]) [1].



Obrázek 8 - závislosti přepětí na logi anodických a katodických reakcí [1]

Rychlost korozní reakce je v grafu na obrázku 8 [1] znázorněna jako i_{corr} . Konstanty β určují sklon přímek těchto lineárních závislostí a jsou závislé na vlastnostech jak povrchu

kovu, tak elektrolytu. Ne vždy je jejich sklon stejný, pokud je například sklon přímky katodické reakce větší než anodické, je dobré ochranu proti korozi zaměřit na katodické reakce, jelikož je korozní reakce na ně více citlivá. Tyto křivky jsou pak dále ovlivněny difuzí a tím jak rychle jsou reaktanty a produkty reakcí v elektrolytu přemísťovány. Vliv má také odpor elektrolytu [1].

4 FORMY KOROZE

Formy korozního napadení se dají rozdělit do několika skupin podle mechanismu průběhu, celkového poškození atd. Toto rozdělení je praktické a je dobré pro základní orientaci, neznamená to však, že reálný korozní problém, nemůže spadat do více než jedné kategorie [1].

4.1 ROVNOMĚRNÁ KOROZE

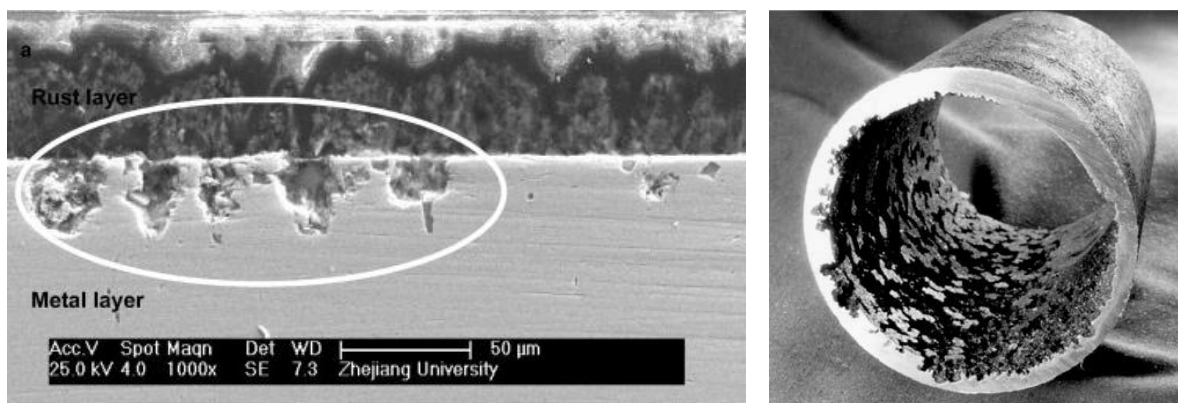
Dochází k relativně rovnoměrnému rozrušování a rozpouštění povrchu vystaveného koroznímu prostředí. Vzniká jako důsledek reakcí v lokálních korozních člancích, kdy na povrchu kovu existují katodická a anodická místa, která se po povrchu v čase přesouvají [1].

Rovnoměrná koroze patří z hlediska úbytku materiálu k nejdestruktivnější. Z technického hlediska ale nepředstavuje velký problém, jelikož je relativně snadné ji předpovědět pomocí jednoduchých testů a zvolit tak vhodnou ochranu [1].

4.2 BODOVÁ KOROZE

Jedná se o lokální napadení, při kterém v materiálu vznikají důlky různých velikostí (viz Obrázek 9 [1]). Ty od sebe mohou být izolovány, nebo také blízko u sebe, až v některých případech splývají a připomínají zdrsňený povrch. Kterýkoliv kov či slitina může být tímto druhem napadení poškozen. Dochází k ní, pokud se některá oblast na povrchu kovu stane více anodickou vzhledem ke zbytku povrchu, nebo dojde v místě kontaktu s povrchem kovu k lokální změně korozního prostředí a tím v tomto místě dojde k agresivnějšímu napadení [1].

Patří k jedné z nebezpečnějších forem koroze a to z toho důvodu, že v raných stádiích je obtížné ji detekovat pouhým okem, a také proto, že i přes relativně malý úbytek materiálu může způsobit selhání součásti či části konstrukce. Tato forma se vyskytuje například u nerezových ocelí v případech, kdy dojde k lokální ztrátě pasivity a následné expozici prostředí obsahujícího brom, jód nebo například chlór [1].



Obrázek 9 – vlevo – důlková koroze ocelové trubky vystavené silné minerální kyselině; vpravo – důlková koroze oceli vystavené roztoku NaCl [1]

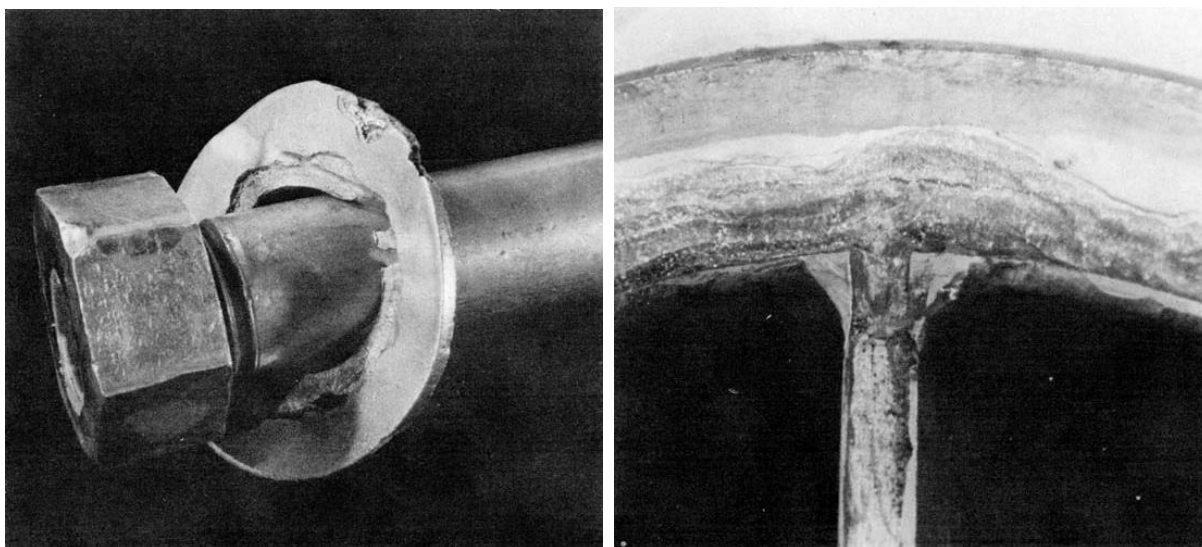
4.3 ŠTĚRBINOVÁ KOROZE

Je to forma lokalizovaného útoku vznikající v malých například mezerách ve styku materiálů, nebo v okolí malých štěrbin (viz Obrázek 10 [1]). V těchto místech bývá nižší koncentrace kyslíku v porovnání s okolím. Místa ve štěrbině se stávají více anodickými a

vzhledem k povrchu mimo štěrbinu a to má za příčinu vznik lokálního vysoce korozivního prostředí. Obecně platí, že s rostoucí hloubkou štěrbin a její plochou se rychlost korozního napadení zvyšuje [1].

Štěrbin vznikají jako výsledek konstrukčního řešení, například u přírub, pryžových okroužků, děr pro šrouby, nýtových a závitových spojů, nebo pod aplikovaným povrstvením atd. Mohou také vznikat nepředvídatelně v trhlinách ve švech a v metalurgických defektech. Tento druh koroze představuje především nebezpečí pro materiály chovající se v prostředí pasivně. Je zejména nebezpečná pro nerezové oceli vystavené prostředí obsahující chlór [1].

Štěrbinové korozi se dá zabránit úpravou konstrukčního řešení v místech, kde je důvod se štěrbinové koroze obávat například volbou svarových spojů namísto šroubových, zamezení přístupu vody utěsněním, nebo použitím materiálů odolnějších proti štěrbinové korozi v problémových částech. Pokud možno by mělo také docházet k pravidelnému čištění těchto rizikových míst, aby se zabránilo usazování nečistot [1].



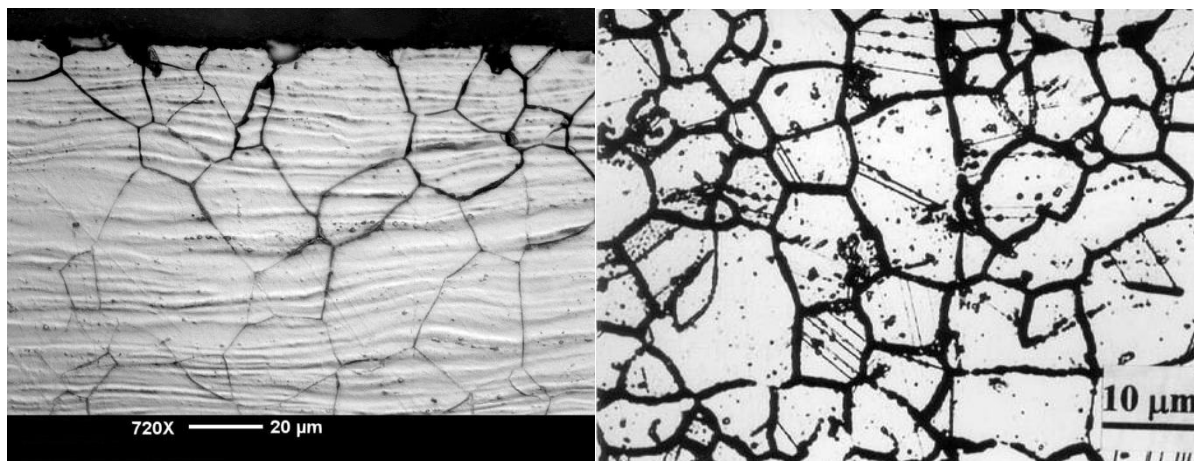
Obrázek 10 – vpravo – štěrbinová koroze vzniklá mezi nemetalickým těsněním a ocelí v mořské vodě; vlevo – štěrbinová koroze ve styku dvou nerezových ocelí v mořské vodě [1]

4.4 MEZIKRYSTALOVÁ KOROZE

Jedná se o selektivní rozpouštění materiálu na hranicích zrn nebo přiléhajícího okolí bez výrazného napadení zrn samotných (viz Obrázek 11 [1]). Je způsobena nehomogenitou materiálu na kontaktu zrn - mohou se zde vyskytovat nečistoty, precipitáty či intermetalické fáze. Precipitáty na hranicích zrn jsou výsledkem tepelného zpracování. Pokud jsou bohaté na legující prvky, potom se materiál stává náchylným k mezikrystalové korozi, jelikož přilehlé oblasti hranic zrn budou o tyto prvky ochuzeny a budou tak napadány přednostně [1][2].

Zmíněná situace nastává například u austenitických ocelí, kdy na hranicích zrn precipitují karbidy bohaté na chrom, což má za následek ochuzení okolí hranic zrn o tento prvek zajišťující pasivitu oceli. Pokud obsah chromu v okolním tuhém roztoku klesne pod 12%, může dojít ke ztrátě pasivity a následné mezikrystalové korozi [1].

Zabránit tomuto druhu koroze můžeme tak, že udržíme množství nečistot na minimu a vybereme takové tepelné zpracování, které omezí precipitáty na hranicích zrn (to platí zejména pro nerezové oceli). Dále je možno snížit obsah uhlíku, případně přidat stabilizující prvky jako jsou Ti, Nb, Ta, které mají větší afinitu k uhlíku než chrom a tvoří tak karbidy přednostně [1].



Obrázek 11 – vpravo – mezikrystalová koroze tepelně upravené nerezové oceli;
vlevo – mezikrystalová koroze austenitické korozivzdorné oceli [1]

4.5 KOROZNÍ PRASKÁNÍ

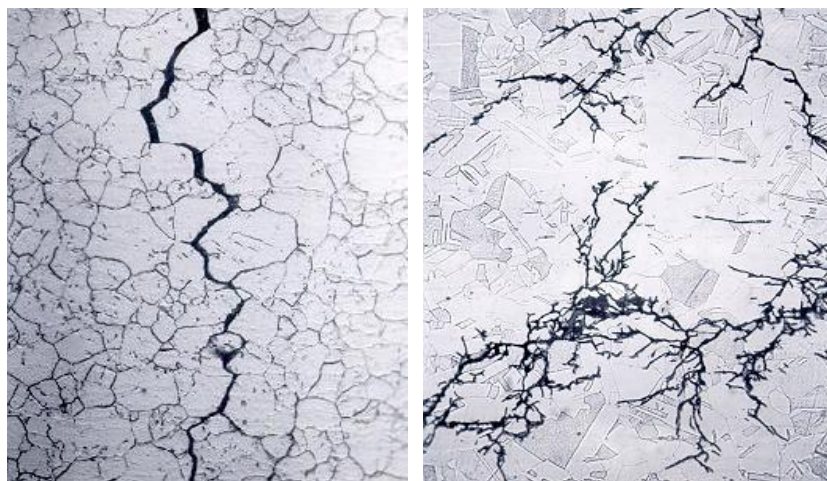
Jedná se o vznik prasklin v materiálu za kombinovaného působení statického napětí a přítomného korozního prostředí (viz Obrázek 13 [1]). Napadení bývá intenzivnější, než jaké by způsobilo jejich samostatné působení. Vyskytuje se pouze v jistých konfiguracích prostředí, slitin a teploty (viz Obrázek 12 [1]). Podobná této formě koroze je korozní únava; ta se může vyskytnout u dynamického zatížení v korozním prostředí [1][2].

Environment	Aluminum alloys	Carbon steels	Copper alloys	Nickel alloys	Alloy system			Titanium alloys	Zirconium alloys
					Stainless steels				
					Austenitic	Duplex	Martensitic		
Amines, aqueous	...	X	X	...	...	...	...	...	...
Ammonia, anhydrous	...	X	...	...	...	...	...	...	...
Ammonia, aqueous	...	...	X	...	...	...	...	...	...
Bromine	...	...	...	...	...	...	...	...	X
Carbonates, aqueous	...	X	...	...	...	...	...	...	...
Carbon monoxide, carbon dioxide, water mixture	...	X	...	...	...	...	...	...	...
Chlorides, aqueous	X	...	...	X	X	X	...	...	X
Chlorides, concentrated, boiling	...	...	...	X	X	X	...	...	...
Chlorides, dry, hot	...	...	...	X	...	...	...	X	...
Chlorinated solvents	...	...	...	...	...	...	...	X	X
Cyanides, aqueous, acidified	...	X	...	...	...	...	...	...	...
Fluorides, aqueous	...	...	...	X	...	...	...	...	...
Hydrochloric acid	...	...	...	...	...	...	...	X	...
Hydrofluoric acid	...	...	...	X	...	...	...	...	...
Hydroxides, aqueous	...	X	...	...	X	X	X	...	...
Hydroxides, concentrated, hot	...	...	...	X	X	X	X	...	...
Methanol plus halides	...	...	...	...	...	...	...	X	X
Nitrates, aqueous	...	X	X	...	...	...	X	...	...
Nitric acid, concentrated	...	...	...	...	...	...	...	...	X
Nitric acid, fuming	...	...	...	...	...	...	...	X	...
Nitrites, aqueous	...	...	X	...	...	...	...	...	...
Nitrogen tetroxide	...	...	...	...	...	...	...	X	...
Polythionic acids	...	...	...	X	X	...	...	...	...
Steam	...	...	X	...	...	...	...	...	...
Sulfides plus chlorides, aqueous	...	...	...	...	X	X	X	...	...
Sulfurous acid	...	...	...	...	X	...	...	...	...
Water, high-purity, hot	X	...	...	X	...	...	...	...	...
X, known to result in SCC									

X, known to result in SCC

Obrázek 12 - tabulka kombinací materiálů a korozních prostředí známých pro výskyt korozního praskání [1]

Bránit se proti tomuto druhu koroze dá minimalizací napětí (i tepelného), volbou materiálu odolného vůči koroznímu praskání, použitím úpravy povrchu zvyšující odolnost vůči koroznímu praskání atd. [1].



Obrázek 13 – vpravo, korozní praskání transkrystalové; vlevo – korozní praskání mezikrystalové [1]

5 VLIV PROSTŘEDÍ

Tato kapitola je věnována vlivům prostředí atmosféry, půdy a vody na korozní procesy [3].

5.1 ATMOSFÉRICKÁ KOROZE

Agresivita atmosféry jako korozního prostředí závisí na znečištění, vlhkosti, srážkách, teplotě a povětrnostních podmínkách, tyto faktory se na různých místech planety výrazně liší. Obecně se dají rozdělit na atmosféru venkovskou, průmyslovou a přímořskou (mořskou). Jedná se o zjednodušené rozdělení, dalo by se jistě najít místo, kde atmosféra vyhovuje více než jedné kategorii [3].

Venkovská atmosféra - není nijak znečištěná, ale obsahuje organický a neorganický prach. Za korozi je zde především zodpovědná vlhkost, kyslík a oxid uhličitý. Agresivita tohoto prostředí je oproti průmyslové a přímořské atmosféře nejnižší [1].

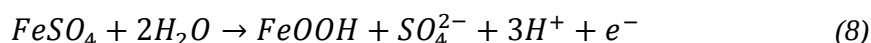
Průmyslová atmosféra – o té se dá mluvit v případě, že se v okolí nachází průmyslové zařízení znečišťující okolní prostředí. V atmosféře se nachází znečišťující látky jako například oxid siřičitý, chloridy, fosfáty, nitridy a další. Tyto látky přechází do rosy nebo srážek a výrazně přispívají ke korozi [1].

Mořská atmosféra – jedná se o jedno z nejkorozivnějších atmosférických prostředí. Částice mořské soli nacházející se v ovzduší jsou unášeny větrem a usazují se na materiálech nacházejících se v prostředí. Charakteristické pro přímořskou atmosféru je přítomnost iontů chlóru. Povětrnostní podmínky velmi ovlivňují agresivitu tohoto korozivního prostředí. Používání posypových solí v zimě má za následek v okolí silnic vznik prostředí podobného přímořskému [1].

ZNEČIŠTĚNÍ

Znečišťující látky obsažené v atmosféře, se usazují na povrchu kovu, kde reagují s kyslíkem, vodou, nebo radikály a zrychlují tak korozní procesy. Jedná se hlavně o chloridy dostávající se do ovzduší z moře a látky vznikající při spalování fosilních paliv (SO_2 , NO_x). Výsledné produkty mají různou rozpustnost v prostředí. Míra, jakou korozi urychlují různé látky, se tedy liší [3].

Oxid siřičitý usazený na povrchu kovu na bázi železa reaguje s kyslíkem a volnými elektrony na povrchu kovu, tím vznikají ionty síranu, které pak vytvoří s atomy železa sírany. Tyto sírany dále reagují s vodou a tím uzavírají korozní proces. Jak jde vidět v rovnicích 7 a 8 je tento proces soběstačný, jelikož se opět tvoří ionty síranu. Oxidy dusíku reagují s železem obdobně, neusazují se však na povrchu železa tak snadno [3].



Chlór se podílí na rozpouštění železa ještě více než oxid siřičitý a oxidy dusíku. Anionty chlóru reagují s kationty železa a vytvářejí chloridy železa, které jsou v prostředí více rozpustné než hydroxidy železa vznikající v reakci v rovnici 8, výsledkem je tak i vyšší rychlost korozních procesů [3].

Další znečišťující látky urychlující korozi, které se mohou v atmosféře ve speciálních případech vyskytnout, jsou hydrogen sulfidy (vznikají při výrobě bioplynu), hydrogen chloridy, chlór, amoniak, sírové oxidy a také částice kouře [3].

VLHKOST

Vlhko slouží při korozních procesech v atmosféře jako elektrolyt, relativní vlhkost tedy také výrazně ovlivňuje jejich rychlost. Aby koroze probíhala závažnější rychlostí, musí být relativní vlhkost okolo 60 %, toto je tzv. kritická vlhkost vzduchu. Přesná hodnota záleží na složení atmosféry [3].

SRÁŽKY

Mohou korozi urychlit nebo zpomalit. Pokud je ocelová konstrukce z hlediska ochrany proti korozi špatně navržena a dochází na některých místech k akumulaci stojaté vody, pak se zvyšuje riziko lokálního korozního napadení. Déšť však také může z konstrukce smývat usazené nečistoty a tak korozi zpomalit [3].

POVĚTRNOSTNÍ VLIVY

Vítr zprostředkovává přenos znečišťujících látek od jejich zdroje do okolí zkoumaných ocelových konstrukcí. Jeho intenzita tedy ovlivňuje rychlost koroze [3].

TEPLOTA

S rostoucí teplotou se korozní procesy urychlují. Se změnou teploty se může změnit také mechanismus napadení [3].

OCHRANA PROTI ATMOSFÉRICKÉ KOROZI

Chránit konstrukci proti atmosférické korozi je možno zohledněním typu korozního prostředí a přítomných korozních sloučenin, dále správným konstrukčním řešením zajišťující odvod vody a zabraňující usazování nečistot, nebo použitím organického/metalického povlaku [3].

5.2 PŮDNÍ KOROZE

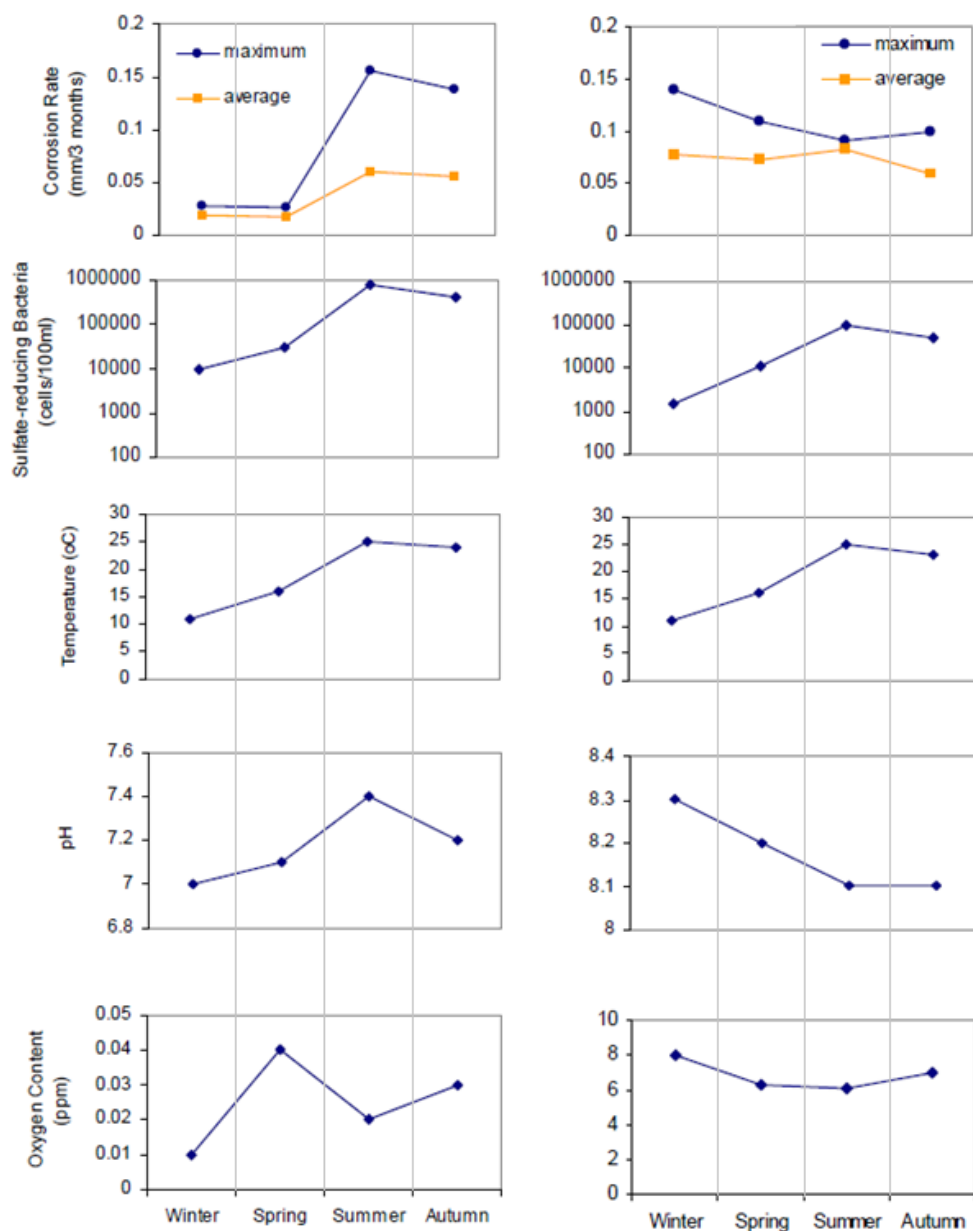
Agresivita půdy jako korozního prostředí je především ovlivněna množstvím přítomné vody, provzdušněním půdy, pH, teplotou a biologickou aktivitou. Agresivita půdy lze také charakterizovat její rezistivitou, která vyjadřuje elektrický odpor půdy. Čím nižší je rezistivita půdy, tím rychleji v ní korozní procesy probíhají. Velikost zrn půdy výrazně ovlivňuje přítomnost vody a kyslíku. Hrubozrnná půda s velkými zrny zadržuje málo vody a je více provzdušněná, opak platí pro půdu jemnozrnnou. Koroze probíhá pomaleji v půdách hrubozrnných, kde jsou soli pravidelně odplavovány dešťovou vodou. Naopak v jemnozrnných půdách se soli usazují a snižují tak rezistivitu půdy, korozní procesy v ní tedy probíhají rychleji [3].

OCHRANA PROTI PŮDNÍ KOROZI.

Proti korozi v půdách je možno se bránit správnou selekcí materiálu, nebo například použitím katodické ochrany [3].

5.3 KOROZE VE VODĚ

Faktory ovlivňující korozi ve vodě jsou především její chemické složení, teplota, pH, rychlost proudění vody a přítomnost biologických organismů. Voda se dá obecně rozdělit na dvě skupiny, sladkovodní a mořskou. Agresivitu vody je z korozního hlediska možno – stejně jako u půdy – charakterizovat její rezistivitou. Na obrázku 14 [3] můžeme vidět, jak jednotlivé faktory ovlivňují rychlost jednotné koroze uhlíkových ocelí v Pacifickém oceánu [3].



Obrázek 14 – Faktory ovlivňující korozi uhlíkových ocelí v Pacifickém oceánu [3]

CHEMICKÉ SLOŽENÍ

Složení vody se v různých lokacích může výrazně lišit. Agresivitu vody jako korozního prostředí nejvíce ovlivňuje přítomnost ve vodě rozpuštěných plynů jako kyslík, sirné plyny, rozpuštěné soli a další znečišťující sloučeniny. Ty se do vody dostávají z atmosféry během deště, z půdy, nebo může jít o znečištění způsobené člověkem [3].

TEPLOTA A pH

Dalším faktorem ovlivňující korozi je pH, které na určité kovy působí různě. Hodnota pH mořské a sladkovodní vody se pohybuje v rozmezí 4,5 až 8,5. Dále korozi ovlivňuje teplota vody. S rostoucí teplotou se zvyšuje také rychlost korozních procesů [3].

BIOLOGICKÉ ORGANISMY

Všechny biologické organismy ovlivňují složení vody v jejich okolí, a tedy ovlivňují agresivitu vody jako korozního prostředí. Některé vytvářejí na kovech vrstvu, která je proti korozi chrání, jiné zvyšují ve vodě obsah kyslíku a sulfidů takže agresivitu vody zvyšují [3].

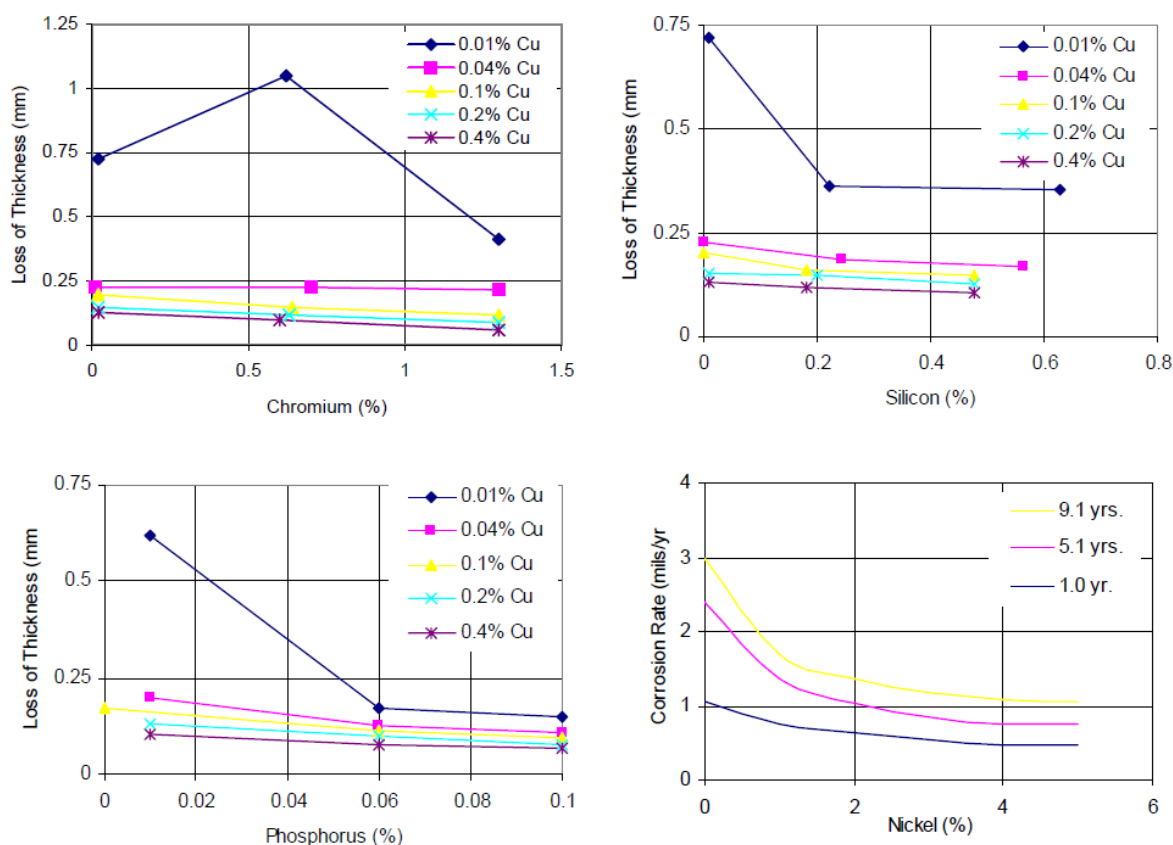
OCHRANA PROTI KOROZI VE VODÁCH

Jako vhodná ochrana proti korozi ve vodách se dá použít katodická ochrana, nebo speciální organické povlaky zvláště určené pro použití pod vodou. Samozřejmě se dá omezit vhodnou volbou materiálu a také pravidelným čištěním pro odstranění mikroorganismů a jiných usazenin z povrchu materiálu [3].

6 OCELI A JEJICH ODOLNOST PROTI KOROZI

6.1 NELEGOVANÉ A NÍZKOLEGOVANÉ OCELI

Obsahují do 0,3 % C a maximálně 5 % dalších prvků. Tyto oceli jsou jedním z nejběžnějších konstrukčních materiálů. Největší vliv na odolnost proti korozi má obsah Cu, rozdíl v odolnosti je znát především v rozmezí obsahu Cu od 0,01 % do 0,05 %. Dále malé přídavky Cr mají za následek výrazné zvýšení pevnosti v tahu a také odolnosti proti korozi. Takovéto oceli jsou nazývány mikrolegované tzv. HSLA (High Strength Low Alloy) oceli. Do této skupiny také patří patinující oceli někdy známé jako COR-TEN oceli. Jsou to nízkolegované oceli obsahující malé množství chromu, niklu a mědi. Používají se velmi často jako konstrukční materiál a to z toho důvodu, že v mnoha případech nepotřebují žádnou další formu ochrany proti korozi, popřípadě pokud je protikorozní ochrana aplikována ve formě například povlaku, je jejich odolnost proti korozi daleko větší než u nelegovaných ocelí. Vliv obsahu legujících prvků na korozní odolnost nízkolegovaných ocelí, je uveden na obrázku 17 [4].



Obrázek 15 – Vliv obsahu legujících prvků v uhlíkových ocelích na odolnost proti korozi v průmyslově znečištěné atmosféře [3]

6.2 KOROZIVZDORNÉ OCELI

Korozivzdorné oceli obsahují více jak 12-13 % hm. chromu rozpuštěného v základní kovové hmotě a při vystavení koroznímu prostředí na sobě vytvářejí ochranný povlak v podobě oxidu chromu, což výrazně zvyšuje jejich odolnost proti další korozi. Jsou vhodné

pro oxidující prostředí, naopak se ale nehodí do prostředí, kde jsou přítomny halogenové kyseliny a v mořské vodě jsou náchylné k důlkové korozi [4].

6.3 FERITICKÉ A MARTENZITICKÉ KOROZIVZDORNÉ OCELI

Stabilita feritické matrice se zvyšuje s rostoucím obsahem chromu. Dále se liší jejich korozivzdornost podle tepelného zpracování. Kalitelné feritické korozivzdorné oceli se ochlazují z teploty rozpouštěcího žhání, která je cca 1000 °C; to vede k přeměně austenitu na martenzit. Jsou magnetické a mohou být tepelně zpracovány do vysoké pevnosti. Nové typy feritických korozivzdorných ocelí se vyznačují především vysokou odolností proti koroznímu praskání a mezikrystalové korozi. Obsahují 11 až 29 % hm. chromu, do 4 % hm. molybdenu a do 2 % hm. niklu. Z hlediska korozní odolnosti je možné je použít zejména v aplikacích, kde jsou vystaveny oxidujícímu prostředí nebo redukčním kyselinám [4].

6.4 AUSTENITICKÉ KOROZIVZDORNÉ OCELI

Tento typ korozivzdorných ocelí je používán nejčastěji. Nejsou magnetické a jako u všech korozivzdorných ocelí jejich vlastnosti silně závisí na obsahu legujících prvků. Vysoký obsah chromu vede ke zhoršení zpracovatelnosti ocelí, a tak se korozivzdornost zvyšuje obsahem legujících prvků jako je molybden (až 6 % hm.) a dusík (až do 0,6 % hm.). Tyto oceli jsou náchylné k lokalizované korozi v prostředí obsahujícím ionty chlóru a také ke koroznímu praskání [4].

6.5 DUPLEXNÍ KOROZIVZDORNÉ OCELI

Aby se využilo výhod austenitických a feritických korozivzdorných ocelí, používají se dvoufázové tzv. duplexní korozivzdorné oceli, v nichž jsou obě fáze přítomny v zhruba stejném podílu. Mají vysoký obsah chromu (20 – 30 %), niklu (5 – 10 %) a malý obsah uhlíku (méně jak 0,03 %). Mohou však obsahovat další prvky jako molybden, dusík, wolfram a měď dále zvyšující korozní odolnost. Nevýhodou těchto ocelí je jejich strukturní nestabilita, proto nemohou být dlouhodobě používány za vysokých teplot (max. 250 až 305 °C). Tento problém se částečně řeší nahrazováním niklu dusíkem, který jako austenitotvorný prvek zvyšuje i rovnováhu mezi fázemi austenitu a feritu za vysokých teplot. Tím se zlepšuje především jejich svařitelnost. Dvoufázové korozivzdorné oceli mají korozní odolnost srovnatelnou s austenitickými, navíc jsou však ještě odolnější proti koroznímu praskání než austenitické nerezové oceli. Stále však mohou být postiženy korozním praskáním v prostředí, kde se vyskytují chloridové ionty. Odolávají korozi ve většině roztoků anorganických i organických solí [4].

7 OCHRANA OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ PROTI KOROZI

Tato kapitola je zaměřena na ochranu konkrétních ocelových konstrukcí proti korozi v atmosférických podmínkách, přesněji na ochranu mostních konstrukcí. Obsáhnout více či dokonce všechny typy konstrukcí a popsat možnosti jejich protikorozní ochrany by totiž bylo nad rámec rozsahu předkládané práce [8].

7.1 OCHRANA MOSTNÍCH KONSTRUKCÍ PROTI KOROZI

Mostní konstrukce jsou vystavovány atmosférickým vlivům a koroznímu prostředí v půdě a vodě. Aby konstrukce dosáhla požadované životnosti, je třeba aplikovat protikorozní ochranu ať už ve formě povlaku či jiné [8].

7.1.1 POUŽÍVANÉ TYPY OCELÍ

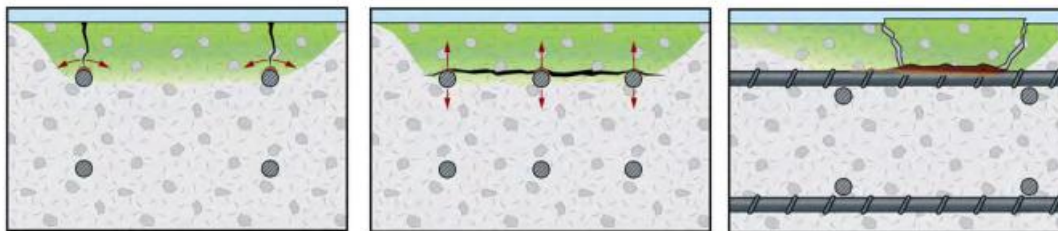
Uhlíkové oceli – Z cenových důvodů je drtivá většina částí konstrukce vyrobena z uhlíkových ocelí. Jejich odolnost proti korozi je nízká, a tak se musí aplikovat protikorozní ochrana nejčastěji ve formě povlaků [8].

Patinující oceli – V některých případech se mohou použít patinující oceli. Ty se buď nepovlakuji, nebo se povlak aplikuje, což dále zvýší jejich odolnost proti korozi [8].

Korozivzdorné oceli – I přes jejich vysokou cenu se najdou části konstrukce, pro jejichž výrobu se volí nerezové oceli. Pokud jsou použity správně, mohou prodloužit životnost mostu až na 100 či více let. Většinou jsou z nich vyrobeny výztuže nebo čepové klouby konstrukce [8].

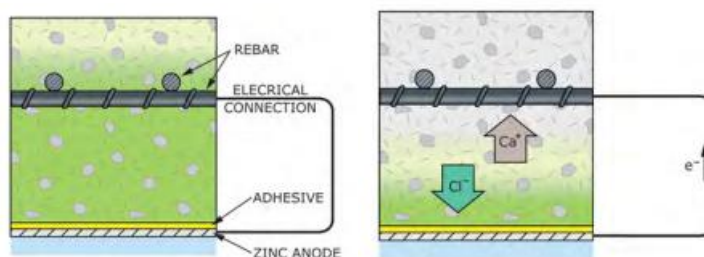
7.1.2 CEMENTOVÉ PRVKY VYZTUŽENÉ OCELÍ

Cement má výbornou pevnost v tlaku, ale jeho pevnost v tahu a v ohybu je nízká, proto se vyztužuje ocelí. Ta v něm za normálních okolností nekoroduje, jelikož cement poskytuje zásadité prostředí a zabraňuje kyslíku, chlorným iontům a dalším sloučeninám v přístupu k oceli. Ocel se tak v cementu chová pasivně. Pokud se ovšem stane, že agresivní ionty se dostanou skrz cement k povrchu oceli, nebo se sníží pH cementu, například když oxid uhličitý rozpuštěný ve vodě začne reagovat s vápnem v cementu obsaženým, ocel začne korodovat. Korozní produkty zpravidla mají větší objem než původní železo, to zapříčiní vznik napětí a namáhání okolního cementu na tah. Jelikož cement má malou pevnost v tahu, začnou vznikat trhliny, které se dále postupně šíří. V jakém směru trhliny vznikají a dále se šíří záleží na rozložení a relativní vzdálenosti výztuh od sebe. Pokud jsou relativně blízko u sebe, praskliny budou vznikat rovnoběžně s vnějším povrchem cementu (viz Obrázek 16 [8]), pokud jsou relativně daleko od sebe, praskliny budou vznikat kolmo k povrchu (viz Obrázek 16 [8]). V obou případech dojde k tzv. delaminaci (viz Obrázek 16 [8]) [8].



Obrázek 16 – vlevo – trhliny v betonu znečištěném ionty chlóru šířící se kolmo k povrchu; uprostřed – trhliny v betonu znečištěném ionty chlóru šířící se rovnoběžně s povrchem; vpravo - delaminace [8]

Jelikož je cement již kontaminovaný agresivními ionty, nelze ho jednoduše nahradit novým, protože by v jeho okolí mohlo naopak dojít k akceleraci koroze, a tak je třeba cement dekontaminovat. To se dá provést pomocí katodické ochrany. Na obrázku 17 [8] můžeme vidět příklad této dekontaminace; anoda z kovu elektrochemicky aktivnějšího než je železo (v tomto případě zinku) je přímo spojena s výztuží. Díky elektrochemickému potenciálu mezi anodou a katodou se vytvoří galvanický článek, a záporně nabití ionty chlóru se začnou pohybovat směrem k anodě, zatímco kladně nabití ionty vápníku se začnou pohybovat směrem ke katodě. Tím se sníží kontaminace cementu chlórem a zároveň se v okolí výztuže zvýší pH díky větší koncentraci iontů vápníku [8].



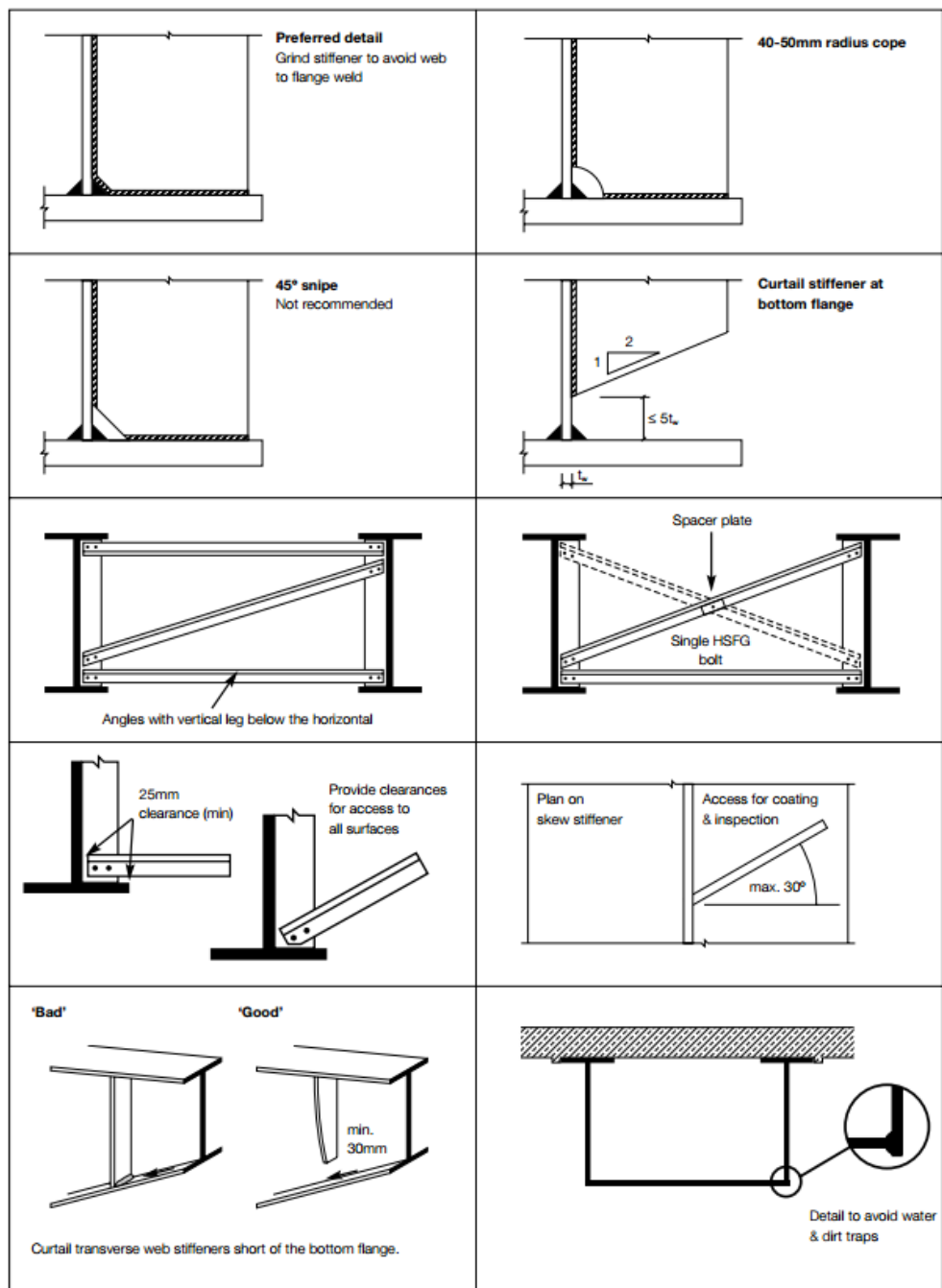
Obrázek 17 – vlevo – znázornění galvanického článku katodické ochrany; vpravo – znázornění pohybu iontů v cementu při aplikování katodické ochrany [8]

7.1.3 ČÁSTI MOSTU ZAPUŠTĚNÉ V ZEMI

Základy mostů a prvky zapuštěné v zemi jsou proti půdní korozi chráněny většinou polypropylenovými nebo polyethylenovými pláty, které tvoří bariéru mezi půdou a prvkem konstrukce uloženým v zemi [8].

7.1.4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ SNIŽUJÍCÍ PRAVDĚPODOBNOST LOKÁLNÍ KOROZE

Aby se co nejvíce snížilo riziko lokální koroze, je třeba konstrukci řešit tak, aby v částech konstrukce nedocházelo ke kumulaci vody, usazování nečistot a ke všem plochám, by měl být dostatečný přístup (z důvodu údržby a případného čištění). Voda by pokud možno z mostovky měla být odváděna tak, aby nepřišla do kontaktu s ocelovými částmi konstrukce. Výztuhy ocelových nosníků by měly být provedeny tak, aby nebránily odtoku vody atd. Další příklady doporučených řešení některých částí konstrukce jsou uvedeny na obrázku 18 [7].



Obrázek 18 – Některá doporučená konstrukční řešení zohledňující protikorozi ochranu [7]

Svarové spoje – Plochy okolo svaru, který bude proveden až na místě stavby, musí být překryty maskovací páskou. Po svaření je důležité, aby plochy svarem spojené (i svar samotný) byly náležitě připraveny na aplikaci protikorozi ochrany. To znamená, že povrch by měl vykazovat stupeň čistoty Sa 2,5 až Sa 3. Broušení svaru se vyžaduje pouze v případě vzniku nerovností na profilu svaru. Poté by měla být aplikována protikorozi ochrana [7].

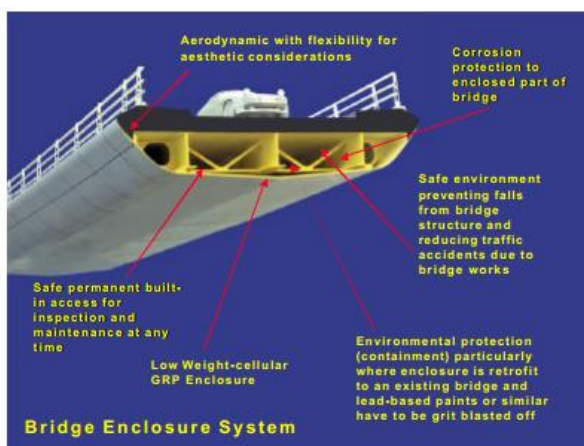
Šroubové spoje – Třecí plochy šroubových spojů jsou většinou povlakované pouze metalicky bez organického povlaku. Do té doby, než jsou příslušné součásti sešroubovány, jsou tyto plochy chráněny maskovací páskou [7].

Šrouby, matice a podložky – Jelikož jsou náchylné ke štěrbinové korozi, měly by být chráněny alespoň stejně dobře jako hlavní části konstrukce. Měly by být pozinkované a po dokončení montáže by na ně měl být aplikován organický povlak [7].

7.1.5 SYSTÉM UZAVŘENÍ NOSNÉ KONSTRUKCE

Jedná se o alternativní způsob ochrany mostních konstrukcí proti korozi, kdy je nosná konstrukce obklopena další konstrukcí z kompozitních materiálů, která má za úkol nosnou konstrukci částečně izolovat od vnějších atmosférických vlivů a zabránit přístup nečistot, soli a znečišťujících látek z atmosféry (viz obrázek 19 [7]). Dá se použít také jako platforma pro inspekci a údržbu nosné konstrukce [7].

Bylo prokázáno, že ocel v prostředí bez přítomnosti znečišťujících prvků nekoroduje významnou rychlostí a to i za relativní vlhkosti až 99%, proto bylo toto konstrukční řešení navrženo. Testy prokázaly, že tyto systémy vytvářejí daleko méně agresivní korozní prostředí (o 89-98%), než které panuje mimo tento systém. Uvedený systém ochrany je možno aplikovat jak na natřenou ocelovou konstrukci, tak i na konstrukci z patinující oceli [7].



Obrázek 19 – Příklad systému uzavření mostní konstrukce [7]

7.2 OCHRANNÉ POVLAKY OCELOVÝCH KONSTRUKČNÍCH ČÁSTÍ

Z důvodů snížení cenových nákladů je většina konstrukcí z uhlíkových ocelí, které se nevyznačují vysokou odolností proti korozi, a tak musí být na jejich ochranu použity ochranné povlaky [7].

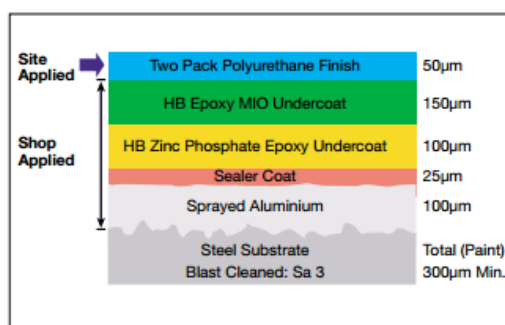
7.2.1 ORGANICKÉ POVLAKY

Zpravidla se nejedná pouze o jeden povlak, ale o systém několika (3 až 4) vrstev (viz obrázek 20 [7]). Tyto nátěrové systémy se většinou skládají ze základu (primeru), mezivrstev a dokončující vrstvy (finishe). Tyto vrstvy se nanášejí postupně a každá má svou vlastní specifickou funkci. Dle normy ISO 8501-1 by povrchy, na které je nanášena jakákoliv forma protikorozní ochrany, měly vykazovat stupeň čistoty Sa 2,5 nebo Sa 3 [7].

Primer – Je aplikován na čistý předpřipravený povrch oceli a má za úkol zprostředkovat dobrou adhezi dalších nanášených vrstev k základnímu materiálu [7].

Mezivrstvy – Tyto vrstvy mají za úkol navýšit tloušťku celkové ochranné vrstvy. Obecně platí, že čím větší je celková tloušťka povlaku, tím delší je efektivní ochrana základního materiálu. Bývají vysoce pigmentované, aby se co nejvíce snížila propustnost kyslíku a vody. Moderní systémy obsahují například skleněné vločky [7].

Finish – Poskytuje ochranu proti vnějším vlivům, jako je počasí, UV záření a kondenzace vody a dodává povlaku určitý požadovaný estetický vzhled [7].



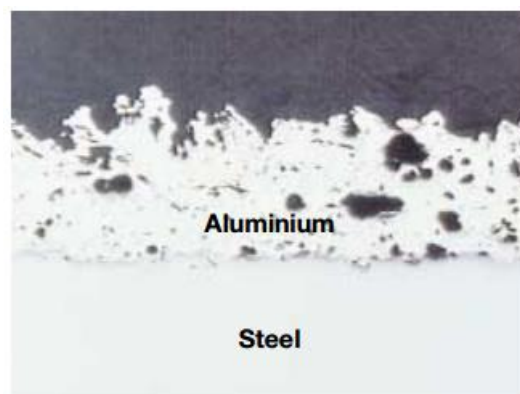
Obrázek 20 – Schéma řezu typickým nátěrovým systémem [7]

7.2.2 METALICKÉ POVLAKY

Nejčastěji se metalické povlaky nanášejí žárově nástřikem nebo ponorem. Metoda nanášení obecně nemá na efektivitu korozní ochrany vliv. Efektivitu korozní ochrany ovlivňuje volba kovu tvořícího povlak a tloušťka povlaku [7].

METODA ŽÁROVÉHO POVLAKOVÁNÍ NÁSTŘIKEM

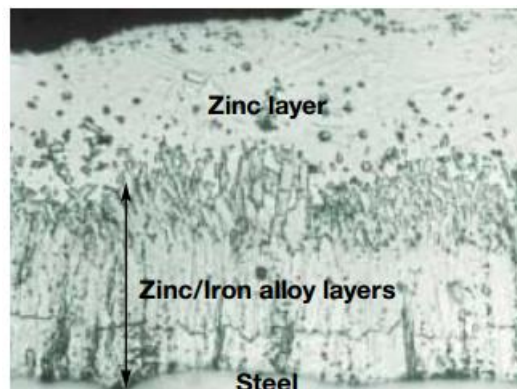
Nástřikem je nejčastěji nanášen zinek nebo hliník. Nanášení se provádí tak, že je kov ve formě prášku nebo drátu vháněn do stříkací pistole obsahující zdroj tepla (kyslíkový plamen nebo elektrický oblouk). Kapky roztaveného kovu jsou pak tryskou pistole nanášeny na povrch oceli. Jelikož při tomto druhu nanášení neprobíhá proces legování, je přilnavost metalického povlaku mechanického původu (viz obrázek 21 [7]). Výsledkem je metalický pórovitý povlak, který by měl být překryt organickým povlakem a tak utěsněn [7].



Obrázek 21 – Řez žárovým povlakem hliníku nanášeného nástřikem [7]

METODA ŽÁROVÉHO POVLAČOVÁNÍ PONOREM

Při této metodě je součást ponořena do vany s roztaveným kovem (například zinkem) a poté vytáhnutá. Výsledkem je rovnoměrný metalický povlak na všech ponořených plochách součásti. Jelikož se při tomto procesu zahřívá i povrch součásti a ne jen nanášený materiál, nastane proces legování a povlak se chemicky spojí s povrchem materiálu (viz obrázek 22 [7]). Tloušťka povlaku závisí na předpřipraveném povrchu součásti a jejím chemickém složení. I když to není vždy nutné, opět by měl být metalický povlak překryt organickým povlakem. Nevýhody této metody jsou v nákladech na transport takto povlakovaných součástí a dostupnost dostatečně velkých van pro větší mostní součásti [7].



Obrázek 22 – Řez žárovým povlakem zinku nanášeného ponorem [7]

8 KOROZNÍ MONITORING

Slouží k diagnóze korozního problému, varování, stanovení času kdy bude třeba provést údržbu, stanovení životnosti [3].

8.1 KUPÓNOVÉ TESTOVÁNÍ

Tato metoda se provádí za pomoci vzorků umístěných v systému, u nichž se pravidelně kontroluje ztráta hmotnosti. Jde o jednoduchý způsob testování, metoda je spolehlivá a poskytuje důkaz a informace o probíhajících korozních dějích a informace o produktech korozních reakcí. Tato metoda je ovšem zdlouhavá a v některých případech není možné vzorky odebrat ze systému za provozu [3].

8.2 SONDY ELEKTRICKÉHO ODPORU

Tyto sondy měří změnu elektrického odporu čidla sondy, který se mění v průběhu jeho koroze díky změnám v jeho průřezu. Poskytují nám informace o rychlosti průběhu koroze, nikoliv však o jakou korozi jde. Čidla jsou náchylné na teplotu, což se musí být nějakým způsobem kompenzováno [3].

8.3 SONDY INDUKTIVNÍHO ODPORU

Tyto sondy měří změnu tloušťky čidla sondy a to měřením změny induktivního odporu cívky v sondě. Čidla jsou z materiálu s vysokou magnetickou permeabilitou, tím se zesiluje magnetické pole okolo cívky. Jakákoli změna v tloušťce čidla pak vyústí ve změnu magnetického pole. Z těchto změn jsme pak schopni odvodit rychlost korozních procesů. Tyto sondy jsou stejně jako sondy elektrického odporu citlivé na teplo [3].

8.4 ELEKTROCHEMICKÝ ŠUM

Jde o elektrochemickou metodu, kdy se pomocí tří elektrod měří fluktuace potenciálu a proudu vznikajících při korozi kovu. Jde o komplexní metodu a vyhodnocování je složité, pro každý korozní proces jsou specifické jiné fluktuace těchto veličin. Tato metoda může pomoci odhalit například iniciaci důlkové koroze ještě předtím, než je viditelná [3].

8.5 CHEMICKÁ ANALÝZA

Jde o chemickou analýzu nejčastěji kapalin z námi zkoumaného systému, a to z důvodu možného abnormálního výskytu produktů korozních reakcí [3].

8.6 KOROZNÍ POTENCIÁL

Tato metoda zjišťuje korozní potenciál jako hnací sílu elektrochemické koroze. Pokud potenciál známe, můžeme zjistit, s jakou rychlostí v daném systému koroze probíhá. Potenciál materiálu se měří vzhledem k referenční elektrodě [3].

8.7 METODA ELEKTRICKÉHO POLE

Tato metoda spočívá v tom, že se nechá zkoumanou strukturou procházet elektrický proud a následně se měří distribuce napětí na struktuře. Napětí je měřeno speciálními sondami, které jsou rozmístěny po struktuře. Čím menší je počet sond na zkoumané struktuře, tím se zmenšuje šance zjištění lokální koroze [3].

8.8 AKUSTICKÉ EMISE

Jedná se o nepřímou metodu, kdy se monitorují akustické emise emitované materiálem při procesech doprovázející korozi, jako jsou například změna napětí povrchu materiálu, uvolňující se dislokace, praskající oxidická a solná víčka uzavírající korozní body atd. Tyto emise se pak vyhodnocují statistickými metodami. Tato metoda slouží k odhalení korozního praskání a bodové koroze [9].

9 ZÁVĚR

Slitiny železa jsou v dnešní době nejčastěji používaným konstrukčním materiálem a nic nenasvědčuje tomu, že by se v blízké budoucnosti mělo v tomto směru něco zásadně změnit. Proto je důležité, aby problematice koroze těchto slitin byla věnována dostatečná pozornost.

V atmosféře, půdě a vodě podléhají konstrukce ze slitin železa degradačním procesům elektrochemické koroze. Degradace materiálu konstrukce se projevuje různě podle mechanismu korozního napadení. Nejčastěji se jedná o rovnoměrnou korozi, toto napadení je nejméně nebezpečné, jelikož se dá lehce předpovědět a účinně se proti ní bránit. Zákeřnější jsou pak tzv. lokální formy napadení, které jsou v některých případech v raných stádiích obtížně rozpoznatelné. Jedná se například o bodovou, mezikrystalovou, štěrbinovou korozi, korozní praskání a korozní únavu. K lokálním formám napadení jsou náchylné i rovnoměrné korozi odolné legované tzv. korozivzdorné oceli.

Elektrochemické korozi konstrukce se dá účinně předejít mnoha způsoby. Počínaje vhodnou volbou materiálu (nelegované/legované oceli), dále pak vhodným navržením konstrukce, což by mělo zabránit například akumulaci vody v určitých místech a snížit tak riziko lokálního korozního napadení, poté je třeba zvolit (pokud je to nutné) vhodnou protikorozní ochranu ve formě například povlaku (ať už metalického, nebo organického). V poslední řadě by konstrukce měla být pravidelně kontrolována metodami tzv. korozního monitoringu, to pomůže odhalit korozi v raném stádiu a tím stanovit nutný termín údržby. Minimalizují se tak náklady na opravu a pomůže to zvýšit životnost celkové konstrukce.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Revie, R. W., Uhlig, H. H.: Inhibitors and Passivators, in Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA, 2008. ISBN: 9780471732792
- [2] Craig.B.D., Lane.R.A., Rose, D.H.:Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials. Ammtiac, U.S.A., 2006.
http://ammtiac.alionscience.com/pdf/Corrosion_Hdbk_S2.pdf, 26.2.2013.
- [3] Davis,J.R.: Corrosion: Understanding the Basics. ASM, U.S.A., 2000. ISBN: 978-0-87170-641-6
- [4] Protikorozi ochrana volbou materiálu. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z:
http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/o_volmat.htm#obr12
- [5] Federal Highway Administration. [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z:
<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/steel/pubs/if12052/volume19.pdf>
- [6] National Physical Laboratory. [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z:
http://resource.npl.co.uk/docs/science_technology/materials/life_management_of_materials/publications/online_guides/pdf/protection_of_steel_bridges.pdf
- [7] NACE International - The Corrosion Society. [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z:
http://www.nace.org/uploadedFiles/Corrosion_Central/Corrosion_101/White_Papers/CorrosionControlPlanForBridges.pdf
- [8] BRE projects website. [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z:
<http://projects.bre.co.uk/composites/bridgeenclosures/bridgeenclosures.pdf>
- [9] David Varner - www.davar.cz. [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z:
http://www.davar.cz/corfat/pdf/Sledovani_koroze_kovu_merenim.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

(ox)	[mol.m ⁻³]	koncentrace oxidovaných elementů
(red)	[mol.m ⁻³]	koncentrace redukovaných elementů
E	[V]	elektrochemický potenciál
E ⁰	[V]	standartní elektrodový potenciál
F	[C.mol ⁻¹]	Faradayova konstanta
i	[A]	proud v korozním článku
n	[-]	počet elektronů
R	[J.K ⁻¹ mol ⁻¹]	plynová konstanta
T	[K]	absolutní teplota
α_a	[-]	Tafelova konstanta anodické reakce
α_c	[-]	Tafelova konstanta katodické reakce
α_c	[-]	Tafelova konstanta katodické reakce
β_a	[-]	Tafelova konstanta anodické reakce
η	[V]	přepětí
η_a	[V]	přepětí anodické reakce
η_c	[V]	přepětí katodické reakce