

# Druhy koroze kovů

Novák P.

Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha

*Logické třídění koroze na různé druhy by mělo být vázáno na příčiny poškození a mechanismus jeho vzniku tak, aby mohl být určen vhodný způsob protikorozní ochrany. Příspěvek se zabývá možnými hledisky třídění na jednotlivé druhy koroze podle mechanismu, příčiny, místa vzniku, vzhledu, podmínek vzniku a rozsahu poškození. Příspěvek doporučuje používat osvědčené dělení koroze kovů v elektrolytech na plošnou korozi a osm druhů nerovnoměrné koroze (koroze působením galvanických makročlánků, šterbinová, bodová, mezikrystalová, selektivní, erozní, prostředím vyvolané praskání a poškození vodíkem). Toto dělení, které je vázáno na specifické mechanismy, pokrývá většinu technicky významných projevů koroze kovů v elektrolytech.*

## ÚVOD

Třídění koroze kovů na různé druhy, různé nemoci kovového materiálu, je významné jak pro identifikaci příčin poškození, tak z hlediska systematického a pedagogického. V naší a anglické literatuře lze najít více jak 100 termínů, které by bylo možno chápat jako druhy resp. typy koroze. Z anglických termínů jsem počítal jen ty, které nemají český ekvivalent. Třídění koroze podle druhů není vzdor existujícím terminologickým doporučením [1,2,3] ani v anglicky psané literatuře zcela ustálené především proto, že je mnoho různých hledisek pro možné třídění. Třídít lze podle vzhledu (makroskopického nebo mikroskopického), místa vzniku, podle prostředí, podle materiálu, podle produktů, podle příčiny nebo podle mechanismu.

Důležitá je jak znalost možných příčin koroze v daném technickém systému tak znalost příznaků koroze. Existuje určitá analogie s lékařstvím, neboť i v protikorozní ochraně volíme „léčebné“ postupy podle symptomů (příznaků) nebo kauzality (příčin). Termín léčba ale nemůže mít v korozi stejný význam, jako v medicíně, protože poškození kovu je nevratné a

protikorozní ochranou (léčbou) se kov neopraví ani nezacelí. Protikorozní ochrana má tedy význam preventivní a nikoli ve vlastním slova smyslu léčebný, příroda prostě s námi v případě interakce kov–prostředí nespolupracuje a tvrdohlavě směřuje k energeticky výhodnějšímu stavu a neuspořádanosti. Kov poškozený korozi se už samovolně neuzdraví.

Stejně příznaky mohou být jak v korozi tak v medicíně důsledkem zcela různých příčin a naopak jedna příčina může mít celou řadu příznaků.

Logický systém v druzích koroze by ale měl mít pokud možno jednoznačnou vazbu na příčinu poškození a mechanismus vzniku, které by mohly vést k volbě vhodné protikorozní ochrany, jež zajistí požadovanou životnost. Je také třeba si uvědomit, že třídění na druhy koroze se omezuje na korozní systémy a především kovové materiály, které mají praktický význam.

Podle mechanismu by bylo třídění koroze zdánlivě nejlepší, ale u většiny technicky významných korozních poškození se jedná o soubor následných a paralelních chemických, elektrochemických, transportních a dalších fyzikálních dějů, u některých druhů koroze mají svou roli i přeměny ve struktuře kovu. Každý druh koroze má specifickou sekvenci těchto jednotkových procesů a třídění podle takového blokového schématu na různé druhy koroze se zdá být pro praktické použití nepřehledné.

## Hlediska pro třídění koroze kovů

### Podle korozního systému

Terminologické dělení koroze **podle korodujícího materiálu** nemá většinou valný význam, neboť důkladný popis korozního systému (kombinace kov–prostředí) by měl být naprostou samozřejmostí a je tedy nadbytečné. Termíny jako *koroze mosazi (oceli, niklu, atd.)* jsou spíše vhodné pro názvy kapitol v korozní literatuře, než jako označení druhů koroze.

Časté je dělení **podle korozního prostředí** na *korozi v elektrolytech*, (nejčastěji vodných - *wet corro-*

sion) a na korozi v neelektrolytech nejčastěji plynech (*dry corrosion*). Dělení podle bližší specifikace korozního prostředí je blíže dominantnímu stimulatoru korozního děje a tedy mechanismu - *korozie chloridová, síranová, fenolová, sirovodíková, kyselinová, půdní, mořská, ve vodách, atmosférická, v plynech, roztavenými kovy, v organických látkách, v kondenzátu*, ale ani toto dělení nelze pokládat obecně za účelné a je často nadbytečné ze stejných důvodů jako dělení podle korodujícího kovu. Do této skupiny „druhů“ patří i anglické termíny *carbonic acid corrosion, oxygen attack, sulphur corrosion, ammonia corrosion, sulphide corrosion, sulphide attack, chelant corrosion, sour corrosion*. Některé z těchto druhů ospravedlňuje, že mají specifický mechanismus, stejně jako *korozie vanadová* a *korozie vodíková* pro plynná prostředí a např. *síranová korozie* betonu z oblasti *korozie nekovových materiálů*.

*Korozie mikrobiální (MIC - microbially influenced corrosion)*, nebo logicky širší *korozie biologická* nebo *bakteriální* vzniká v neutrálních prostředích, jako jsou vody a půdy, kdy dochází za přítomnosti nejrůznějších typů mikroorganismů ke stimulaci korozních procesů. Přítomnost mikroorganismů, sice ovlivňuje různým způsobem mechanismus korozního poškození kovů, ale nevede k novému druhu napadení.

### Podle vzhledu

Při rozmanitosti důsledků koroze se často setkáváme s potřebou dělit korozi na různé druhy jen pro formální popis (slovní dokumentaci) poškození podle jeho vzhledu, aniž by to vedlo ke stanovení přímé příčiny. To je důležité pro dodatečné určení příčin v případě, že korozně kvalifikovaná osoba nebyla na místě události, ale fotografickou dokumentaci to nemůže nahradit.

S tímto dělením podle vzhledu se setkáme hlavně v normách pro metalografické vyhodnocování korozního napadení kovů [4]. Patří sem termíny jako *korozie rovnoměrná, plošná, celková, nerovnoměrná, skvrnitá, místní (lokalizovaná, lokální), strukturální, selektivní, extrakční, mezikrystalová (interkrystalová, interkrystalická), transkrystalová (transkrystalická), korozní lomy a trhliny, důlková korozie, (bodová, jamková, pitting corrosion), po vrstvách (lamelární korozie, exfoliace), nitková (filigránská)*. Podle vzhledu, i když ne z metalografického hodnocení, je *nožová korozie, fissure, grooving, puchýřovatení, (puchýřování), korozní praskání, spongióza, (zhoubovatení), ztráta lesku (tarnishing) a z vysokoteplotních metal dusting, vnitřní oxidace, vnitřní korozie*.

Někdy si autoři mimo obor vypomáhají volným popisem vzhledu korozního napadení jako kráterový, strupovitý, puchýřkový nebo vrstevnatý typ koroze a podobně.

### Podle místa vzniku

Specifické a pro volbu protikorozního opatření může také být také velmi důležité místo vzniku a tak se setkáváme se dělením koroze: *v rovině hladiny, pod povlakem, u svaru, (weld decay), štěrbinová, pod úsadami, pod těsněním, pod tepelnou izolací*.

### Podle fyzikálních podmínek vzniku

Např. *korozie za vysokých teplot, za mechanického namáhání, pod napětím (za napětí), za přestupu tepla, vibrační (třením), opotřebením, erozí, kavitační, bludnými (cizími) proudy, interferenčními proudy, střídavými proudy, korozie katodická*. Ani toto dělení nelze pokládat za zcela vhodné, jedná se často jen o popis okolností vzniku.

### Podle korozních produktů

Příkladem třídění koroze podle produktů je *rezivění železa, karbonylová korozie, hydridové napadení, možná i metal dusting*. Tato klasifikace už má blíže ke specifickému mechanismu.

### Podle rozsahu poškození

Podle rozsahu korozního poškození rozeznáváme, tzv. *korozí celkovou (general corrosion) resp. plošnou*, která probíhá po celém povrchu vystaveném koroznímu prostředí víceméně rovnoměrně, tj. se srovnatelným úbytkem po celém povrchu a *korozí místní, lokalizovanou*, která probíhá intenzivněji pouze v některých částech exponovaného povrchu kovu. K rovnoměrnému koroznímu napadení z praktického hlediska ale dochází v elektrolytech většinou pouze v případech, kdy je celý povrch kovu pokryt stabilní pasivní vrstvou, nebo intenzita aktivního rozpouštění kovu je velmi malá. Pokud je rychlost aktivního anodického rozpouštění vyšší, dochází také často k nerovnoměrnému napadení, ale tato forma napadení nebývá řazena mezi nerovnoměrné formy koroze, protože použití kovu již dostatečně diskvalifikují úbytky v místech nejmenšího plošného napadení. Většina technických kovů vděčí za svou korozní odolnost pasivitě, a proto dělení koroze kovů v elektrolytech na jednotlivé druhy se většinou omezuje na lokalizovanou korozi vznikající na zapasivovaném povrchu. Jednotlivé druhy koroze jsou tak většinou nemocemi pasivity.

*Katastrofická korozie* je poněkud citově zabarvený termín pro rozsah napadení, tento typ koroze ale má specifické podmínky vzniku za vysokých teplot, kdy místo ochranné oxidové vrstvy dochází ke vzniku korozních produktů (taveniny, těkavých solí), které nemají ochranné účinky (sem patří i *vanadová korozie*). V angličtině je pro tento typ napadení termín *hot corrosion*.

### Podle rychlosti vzniku

*Blesková koroze* není koroze bleskem, ale velmi rychlý vznik rzi po očištění povrchu oceli tryskáním vodou (water jetting) nebo po nanesení některých vodouředitelných hmot na povrch oceli.

### Podle druhu chemické reakce

Při základním dělení koroze podle mechanismu se potkáme s rozlišováním mezi *chemickou a elektrochemickou korozi*. Toto dělení má problém v tom, že i elektrochemická reakce je reakce chemická. Elektrochemické korozní reakce odlišuje od čistě chemické oxidačně-redukční reakce anonymita reagujících částic (konkrétní částice oxidovadla a konkrétní atom kovu se nemusí bezprostředně setkat a mohou si vyměňovat elektrony přes elektricky vodivou fázi, která je v kontaktu s elektrolyticky vodivou fází). Představa, že ke korozi chemické dochází, dáme-li zinek do kyseliny a k elektrochemické tehdy, když zinek v korozním prostředí spojíme s mědí, je zcela nesmyslná. Ani představa, že oxidace kovů za vysokých teplot v plynném prostředí je koroze chemická není přesná, i v tomto případě dochází ve většině případů k oxidaci a redukci na oddělených místech a jedná se tak o elektrochemický proces za přítomnosti tuhého elektrolytu (oxidová vrstva), který je zároveň vodičem elektronů.

Za neelektrochemickou a na první pohled také nechemickou lze pokládat *korozí roztavenými kovy* (ty nejsou iontově vodivé, proto konstrukční kov není ve styku s elektrolytem, ale s prostředím elektronově vodivým). Korozí v roztavených kovech není kov oxidován, ale zůstává v oxidačním stupni nula. Koroze je pak způsobena buď rozpouštěním konstrukčního kovu v tavenině, nebo vznikem fází, které vedou ke ztrátě soudržnosti konstrukčního kovu. Pokud ale budeme pokládat i „fyzikální“ rozpouštění za chemickou přeměnu (dochází ke změně vazby), pak i koroze roztavenými kovy je koroze chemická. *Koroze organickými látkami*, které nejsou elektrolyty, nebo v plynech při absenci povrchových vrstev má koroze charakter čistě chemické přeměny. Dalším příkladem je tzv. *karbonylová koroze*. Nežádoucí vznik nitridů nebo hydridů lze také pokládat za neelektrochemickou chemickou (korozní) přeměnu. *Vibrační koroze (koroze třením)* je také chemická interakce kovu a prostředí. Většinou čistě fyzikální podstatu má kavitace. Pokud je ale významnější součástí poškození i anodické rozpouštění (vyvolané kavitacím poškozením ochranné vrstvy) pak se jedná o *kavitační korozi*.

### Podle dominantního typu článku

V reálných korozních systémech se běžně vyskytují nebo vznikají heterogenity, které vedou k tomu, že

pro reakce v korozním procesu je výhodné probíhat alespoň částečně odděleně na různých místech. Dochází k tomu v případě katodické reakce na místech s nižším přepětím a v případě anodické reakce tam, kde je kov snadněji ionizovatelný. Ve struktuře většiny kovových materiálů jsou obsaženy heterogenity, které vedou při kontaktu povrchu kovu k činnosti tzv. mikročlánků. Vedle činnosti mikročlánků vznikají v korozním systému často články s většími vzdálenostmi anodického a katodického místa než jsou pouhé desítky mikrometrů, jako je tomu u mikročlánků. Takové články již označujeme jako makročlánky a ovlivnění potenciálu kovu jejich činností může dosahovat i mnoha metrů (např. u liniových úložných zařízení - potrubí a kabelů). Články jsou velmi častou příčinou lokalizovaného urychlení koroze anodického povrchu a naopak potlačení koroze na povrchu katodickém. Odtud také celá řada nerovnoměrných druhů koroze jako je *koroze galvanická, bimetalická, kontaktní, koroze v důsledku článku s různým provzdušňováním, článku koncentračního, článku aktivní/pasivní, článku termogalvanického (termogalvanická koroze)*. Třídění koroze podle typu makročlánku už přímo směřuje k mechanismu koroze.

**Galvanické články** lze dělit na články vyvolané heterogenitou materiálu (**bimetalický článek**), kdy jsou galvanicky spojeny alespoň dva různé elektricky vodivé materiály v tomtéž elektrolytu a na články volané heterogenitou podmínek, kdy elektrody článku jsou z téhož materiálu. **Koncentrační článek** vzniká v případě, kdy je kovový materiál v elektrolytu s gradientem koncentrací složek, které rozhodují o korozní agresivitě (např. články s různým ovzdušněním). **Termogalvanický článek** vzniká v případě, kdy kovový materiál s gradientem povrchové teploty je v tomtéž elektrolytu. **Článek aktivní - pasivní** vzniká v případě kovového materiálu v tomtéž elektrolytu za podmínek, která jsou hraniční pro pasivovatelnost tohoto kovu (týká se např. koroze bodové a štěrbínové). Na vzniku tohoto článku se může podílet i heterogenita materiálu. **Článek elektrolytický** je narozdíl od galvanického, samovolně fungujícího článku, vynucen průchodem proudu. V terminologii elektrochemického inženýrství se jedná o elektrolyzér. Tento typ článku vzniká v případě, že na kovovém materiálu, který je v kontaktu s týmž elektrolytem dochází průchodem stejnosměrného proudu z vnějšího zdroje ke gradientu potenciálu (týká se koroze bludnými (cizími) nebo interferenčními proudy).

Za podmínek omezené konvekce (míchání) vznikají činnosti všech článků, hlavně v přibližně neutrálních zředěných elektrolytech, okludované roztoky. Nejvýznamnějším důsledkem je lokální aktivace původně pasivního kovu. U nejrozšířenějšího koncentračního článku s různým ovzdušněním vyvolává primární heterogenita v přístupu kyslíku k povrchu

oceli sekundární změny ve složení korozního prostředí. V blízkosti neovzdušňovaného - anodického (zápornějšího) povrchu klesá hydrolyzou hodnota *pH* a vzrůstá koncentrace aniontů migrací. V blízkosti katodického (zápornějšího) povrchu (s lepším přístupem vzduchu) vzrůstá v důsledku redukce kyslíku hodnota *pH* a klesá koncentrace aniontů solí migrací. Sekundární změny chemického složení vedou k zesílení anodického rozpouštění na anodickém povrchu a k pasivaci povrchu katodického.

### Podle hlavního poškozovacího děje

Hlavním poškozovacím dějem při korozi je nejčastěji anodické (oxidativní) rozpouštění kovu. To se sice týká většiny druhů koroze kovů v elektrolytech včetně erozní koroze a katodické koroze, nikoli však všech technicky významných druhů koroze.

Mezi korozní procesy, při kterých není hlavním poškozovacím mechanismem oxidace kovu, patří druhy související se vstupem atomárního vodíku do mřížky kovu. Vlastní poškozovací mechanismus může být pak zcela fyzikální. Patří sem z anglické terminologie *hydrogen damage*, *hydrogen induced cracking (HIC)*, *hydrogen stress cracking (HSC)*, *hydrogen affected cracking (HAC)*, *hydrogen embrittlement (HE)*, *hydride embrittlement*, *hydrogen blistering*, *sulfide stress cracking* a z české terminologie *vodíkem vyvolané praskání*, *vodíková křehkost*, *vodíkové puchýře a vodíková koroze* (odpovídá anglickému *hydrogen attack*). Vznik atomárního vodíku katodickou redukcí vodíkových iontů či vody nebo termickou disociací molekuly vodíku, uhlovodíků, resp. vody, jsou chemické reakce, podobně jako vznik hydridů, vznik methanu nebo vodní páry při vysokoteplotní *vodíkové korozi*. Proto je poškozování kovů vlivem atomárního vodíku také řazeno mezi korozní děje. Vznik trhlin a lomů je nejdůležitější také v případě praskání vyvolaného prostředím. Pokud v poškozovacím mechanismu hraje významnou roli tahová pnutí nebo plastické deformace kovu, pak se jedná o skupinu korozních druhů označovaných někdy termínem *Corrosion - Stress/Deformation Interactions (CDI)*. Sem patří nejen celá skupina *praskání vyvolaného prostředím (korozní praskání pod napětím, sezónní praskání mosazi, louhová křehkost oceli, korozní únava, praskání vyvolané vodíkem)*, ale například i urychlení koroze po tváření za studena bez vzniku trhlin.

„Fyzikální“ rozpouštění je rozhodující pro korozi roztavenými kovy, ztráta celistvosti původního kovu pro *metal dusting*, odzinkování, mezikrystalovou korozi a nemoc bronzů. Neelektrochemický (chemický) vznik sloučenin je významný pro hydridovou křehkost nebo karbonylovou korozi. Mechanické poškození je dominantní u koroze třením nebo u kavitace.

Mezi druhy koroze, při kterých dochází ke kombinovaným chemickým a fyzikálním účinkům prostředí na kovový výrobek, patří termíny *erozní koroze*, *rázové napadení*, *nárazová koroze (impingement)*, *wear corrosion*. V novější literatuře se také někdy objevuje termín *tribokoroze*.

### Podle stavu, ve kterém se kov nachází

*Koroze v aktivním stavu, koroze v pasivním stavu a koroze v transpasivním stavu* jsou svým způsobem dělení elektrochemické koroze podle mechanismu. Problém je v tom, že právě nerovnoměrné druhy koroze se velmi často projevují paralelním průběhem koroze v aktivním a pasivním stavu. Souběžně mohou probíhat i v případě plošné koroze. Při korozi v aktivním stavu nebývají většinou nerovnoměrné formy koroze omezujícím faktorem použití kovu. Důležitá je aktivace pasivního kovu.

### Chybějící česká terminologie

Existuje řada dosti významných druhů koroze, které nemají české ekvivalenty k anglickým výrazům a řadu z nich jsem už v předchozím textu uvedl. Jsou například *metal dusting* (snad „zprachovatění kovu“ v silně nauhličujících atmosférách za zvýšených teplot), *blooming (vykvétání)*, *fissure (puklina, pukát, praskat v blízkosti svaru)*, *interdendritic a crystallographic corrosion* (koroze vázaná na krystalovou strukturu kovu), *poultice (obklad) corrosion* - na automobilech pod vrstvou usazenin, *steam blanketing* (nadměrný růst oxidů při přehřátí v důsledku blánového varu), *grooving* (snad rýhování v blízkosti svaru uhlíkové oceli), *ringworm corrosion* (napadení oceli v silně tvářených místech trubek při těžbě ropy), *sweet corrosion* (doslova „sladká koroze“ v prostředí uhlovodíků s obsahem oxidu uhličitého), *sour corrosion* (doslova „kyselá koroze“ v prostředí uhlovodíků s obsahem sulfanu a oxidu uhličitého vedoucí k prostředím vyvolanému praskání).

Poslední dva termíny (*sweet a sour corrosion*) jsou jen zdánlivě výsledkem třídění z hlediska chuti korozního prostředí. K doplnění této chuťové série máme ještě *salt corrosion*. Hořkou korozi jsem v literatuře nenašel, snad proto, že důsledky všech druhů koroze vedou k „hořkým koncům“.

### Neodborná terminologie

Některé z dalších „druhů koroze“ jsou z korozní hantýrky, jiné z dílny terminologických kutilů, kteří vzdor oborovým zvyklostem si vytvářejí vlastní

terminologii nebo nesprávně překládají cizí termíny. Za hantýrku lze považovat *korozí krupičkovou* pro korozí mezikrystalovou a *korozí poletovou* snad pro korozí atmosférickou, nebo i podivný termín *elektrokoroze* (někdy je to korozí bludnými (cizími) proudy, jindy korozí elektrochemická, ale může to být i odjiskření při elektroabrazivním řezání. *Stress korozí* má být termín pro korozí pod napětím. Ze skupiny amatérských termínů je i *korozí iontová*, zřejmě pro korozí v elektrolytech, nebo *korozí papírová* pro korozí plošnou s následkem značného ztenčení kovu.

Mezi neodbornou terminologií lze také zařadit častý termín *chloridová korozí* (a další analogické termíny). Chloridy jsou běžným a významným stimulatorem korozí kovů, jejich účinek se projevuje podle různých mechanismů a podílí se na mnoha různých druzích korozí.

### Doporučené dělení korozí kovů v elektrolytech

Obecná představa o korozí (ve smyslu „rezavění“) zahrnuje většinou druh korozního napadení, které označujeme jako plošná (rovnoměrná, obecná) korozí. Je charakterizována tím, že na kovovém povrchu probíhá korozí plošně, to znamená, že na jakémkoli místě povrchu ubude za stejnou dobu přibližně stejné množství kovu. Místní fluktuace v úbytku kovu korozí jsou ve srovnání s celkovým korozním úbytkem malé. Plošná korozí se vyskytuje v korozních systémech, v nichž je kovový povrch i okolní prostředí víceméně homogenní. Znamená to, že teploty a koncentrace všech složek jak prostředí, tak kovu jsou na jejich vzájemném rozhraní vyrovnané. Dochází k tomu v případech, kdy konvektivní přenos hmoty je přiměřený. Příklady rovnoměrné plošné korozí lze nalézt v podmínkách atmosféry nebo pro zapasivované kovy v oblasti stabilní pasivity.

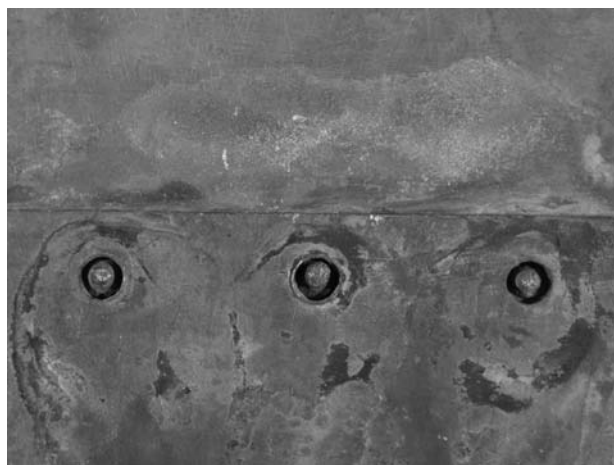
Za účelné lze pokládat dělení korozí kovů v elektrolytech na korozí plošnou a osm nerovnoměrných druhů, což je modifikované rozdělení, které lze nalézt v učebnici Fontany a Greena [5]. Podle tohoto dělení patří mezi nerovnoměrné korozní druhy korozí působením galvanických makročlanků, korozí štěrbinová, korozí bodová, korozí mezikrystalová, korozí selektivní a erozní korozí, dále pak praskání vyvolané prostředím a poškození vodíkem.

**Korozí působením galvanických makročlanků** je druh korozí jehož míra nerovnoměrnosti závisí na geometrickém uspořádání a vodivosti elektrolytu. Pokud by vzdálenosti anodického a katodického povrchu byly všude stejné, byl by účinek pro každý z povrchů članku rovnoměrný. Pokud nedochází v korozním systému k dostatečnému konvektivnímu přenosu hmoty, pak při činnosti članků dochází ke vzniku okludovaných

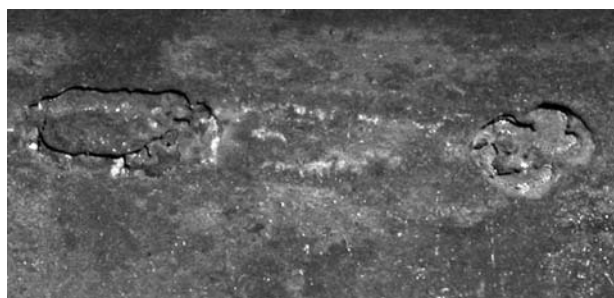
roztoků. Korozí působením galvanických članků můžeme dělit na *bimetalickou korozí* a *korozí v důsledku koncentračních članků*.

**Bimetalická korozí** (obr. 1) je urychlení korozí kovu v důsledku elektrického kontaktu s ušlechtilějším kovem nebo i nekovovým vodičem (nejčastěji uhlíkem) v elektrolytu. Nejintenzivněji probíhá bimetalická korozí v těsné blízkosti spojení. Směrem od místa kontaktu na povrchu se rychlost anodické reakce snižuje díky elektrickému odporu prostředí, který roste se vzdáleností. Malá vodivost elektrolytu omezuje často zvýšenou korozí na oblast blízkou místu kontaktu.

**Korozí v důsledku koncentračních članků** (obr. 2) vzniká, pokud je povrch kovu v kontaktu s nehomogenním korozním prostředím. Nejčastější jsou članky v důsledku různého přístupu vzdušného kyslíku k povrchu oceli, který je v kontaktu s neutrálními vodnými roztoky. Činnost tohoto članku, podobně jako bimetalického, vede při nedostatečném míchání ke změnám ve složení roztoku, v oblasti snadného přístupu kyslíku se alkalizuje (jeho agresivita pro železo klesá), v oblasti bez kyslíku se naopak okyseluje (jeho agresivita roste). Koncentrační članky se často podílí i na dalších druzích korozí, při kterých vznikají okludované roztoky (korozí štěrbinová, bodová, selektivní, korozní praskání).



Obr.1. Bimetalická korozí (ocelové šrouby - měděný plech).



Obr.2. Korozí v důsledku koncentračních članků - nejčastěji se jedná o članky s různým ovzdušněním (diferenční aeraci).

**Štěrbínová koroze** (obr. 3) je druh korozního napadení, ke kterému dochází v místech, kde je malé množství elektrolytu částečně odděleno od velkého objemu vnějšího elektrolytu. Tyto polouzavřené prostory resp. štěrbin, jsou například mezi dvěma plechy spojenými nýty, nespojitými svary, ve šroubových spojích, pod podložkami, pod těsněním, pod úsadami atd. Výchozím stavem vnitřního i vnějšího kovového povrchu je před vznikem štěrbinové koroze pasivita.

Kyslík rozpuštěný v neutrálním vodném elektrolytu uvnitř štěrbin je spotřebován katodickou reakcí a přísun dalšího je omezen tím, že roztok uvnitř štěrbin je obtížněji vyměňován. Vzhledem k nedostatku oxidačního činidla se vnitřní povrch štěrbin stává anodou, na níž převládá oxidace složek kovu. Elektrony uvolňované touto reakcí jsou odváděny kovem mimo štěrbinu, na místo, kde není omezen přístup rozpuštěného kyslíku k rozhraní kov/elektrolyt. Okolí ústí štěrbin se tak stává katodou, na které se soustřeďuje průběh katodické reakce. Náboj kovových kationtů ve štěrbině je obvykle kompenzován migrací chloridových aniontů z objemu roztoku do štěrbin a hydrolýzou iontů kovu se roztok uvnitř štěrbin dále okyseluje. Agresivita roztoku uvnitř vzrůstá a vede k poškození původní pasivní vrstvy a tím i k aktivaci kovu na vnitřním povrchu a vzniku článku aktivní-pasivní.

Korozi štěrbinovou je třeba z hlediska mechanismu odlišit od koroze ve štěrbině, k níž dochází i bez nutnosti elektrolytického kontaktu s vnějším velkým objemem elektrolytu. Koroze ve štěrbině bývá zvýšena už jen v důsledku delší doby expozice např. v atmosférických podmínkách, zkoncentrováním stimulatorů odparem, nebo stimulačními účinky vyluhovatelných složek úsad či těsnění.

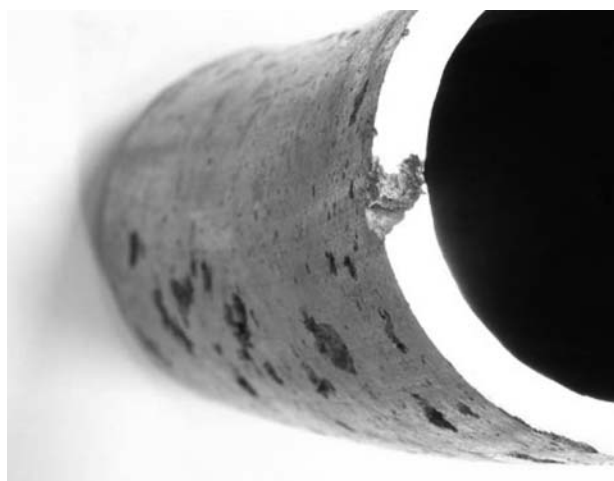


Obr.3. Štěrbínová koroze korozivzdorné oceli.

**Bodová koroze** (obr. 4) je lokální napadení jinak odolného pasivního povrchu korozivzdorných ocelí nebo hliníku a jeho slitin vznikající za přítomnosti látek lokálně porušujících pasivní vrstvu. Touto formou koroze vznikají v povrchu různé hluboké důlky často s velice úzkým hrdlem. Lokálním porušením pasivní vrstvy dochází k bodovému napadení. Mechanismus bodové koroze je v podstatě shodný s mechanismem štěrbinové koroze, s tím rozdílem, že zárodek „štěrbiny“ vzniká samovolně na volném povrchu pasivního kovu - nejčastěji v důsledku konkurenčního účinku hydroxylových (pasivační účinek) a chloridových (depasivační účinek) iontů. K iniciaci bodové koroze je zapotřebí dostatečná oxidační schopnost prostředí a přítomnost depasivujících iontů, nejčastěji chloridových.

Je třeba zdůraznit, že vztah termínu bodová a důlková koroze není v literatuře zcela jednoznačný. *Důlková koroze* je místní koroze, jejíž důsledkem jsou důlky, tj. dutiny v kovu počínající na povrchu, což může být jakékoli korozní napadení, při kterém vznikají důlky, třeba v místě porušeného povlaku, nebo v důsledku článku s různým ovzdušněním. Bodová koroze je ale spíše chápána jako ekvivalent anglického pitting corrosion, což je obvykle extrémně lokalizované napadení korozivzdorných ocelí nebo slitin hliníku a dalších kovů s výše popsaným specifickým mechanismem.

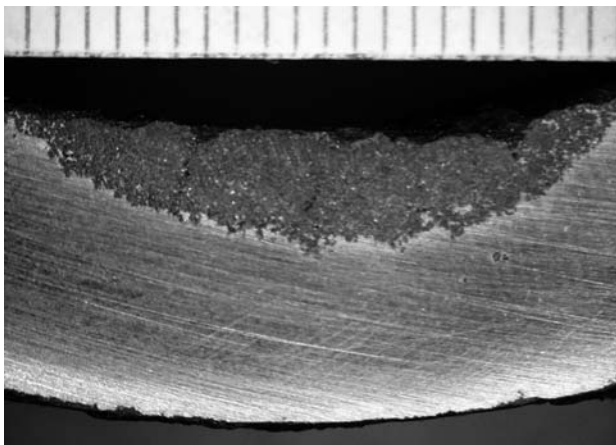
**Mezikrystalová koroze** je formou nerovnoměrného korozního napadení způsobeného u korozivzdorných ocelí snížením obsahu chromu v bezprostřední blízkosti hranic zrn, pod hranici snadné pasivovatelnosti. Lokální snížení obsahu chromu v korozivzdorných ocelích pod hranici snadné pasivovatelnosti 12 % vzniká precipitací karbidů s vysokým obsahem chromu na hranicích zrn při ohřevu v kritické teplotní oblasti, např. při svařo-



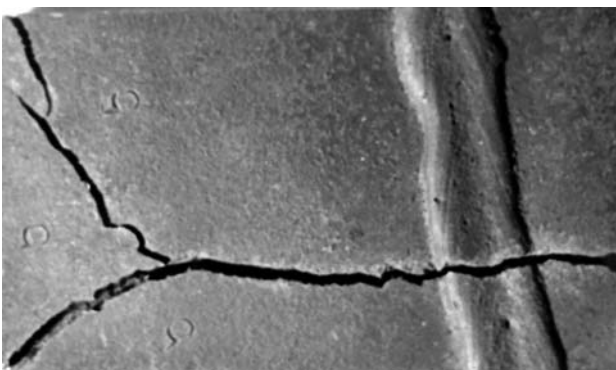
Obr.4. Bodová koroze hliníku.

vání. Oblasti ochuzené o chrom korodují v agresivním prostředí přednostně. Zrna ztrácejí soudržnost a materiál mechanickou pevnost, aniž by došlo k pozorovatelné vzhledové změně. Karbidy a ochuzené oblasti vzniklé při zcitlivění lze vhodným tepelným zpracováním opět odstranit. Nožová koroze je druhem mezikrystalové koroze stabilizovaných korozivzdorných ocelí. Koroze po vrstvách (exfoliace) je mezikrystalovou korozi hliníkových slitin.

**Selektivní koroze** je přednostní rozpouštění některé ze složek slitiny jejíž přítomnost je v kovu žádoucí. Častým příkladem selektivní koroze je odzinkování mosazi. Zinek, jakožto méně ušlechtilý kov slitiny, je více náchylný ke korozi a přechází do roztoku jak hydroxidovým, tak chloridovým mechanismem, zatímco měď rozpouštěná chloridovým mechanismem je vyloučena zpět hydroxidovým mechanismem v nekompaktním („houbovitým“) stavu. Selektivní koroze je pozorovatelná také u dalších slitin mědi např. s niklem, křemíkem nebo hliníkem. Vážné problémy způsobuje selektivní rozpouštění železa v šedé litině (spongióza, grafitická koroze, viz obr. 5), jehož výsledkem je pórovitá struktura grafitu s podstatně horšími mechanickými vlastnostmi.



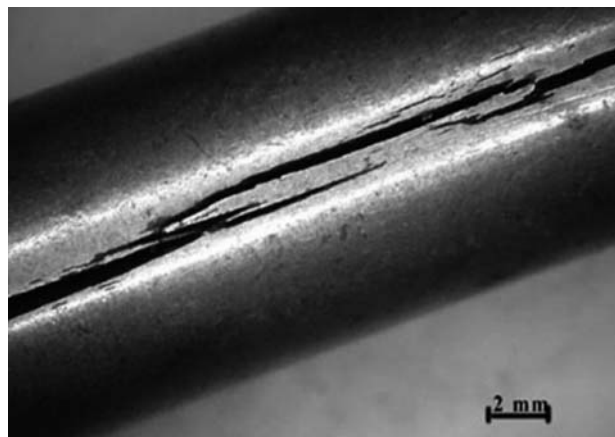
Obr.5. Grafitická koroze (spongióza) šedé litiny.



Obr.6. Korozní praskání uhlíkové oceli.

**Praskání vyvolané prostředím** (obr. 6, 7, 8) je kombinované působení tahového namáhání a korozního prostředí na kov. **Korozní praskání** vzniká při statickém zatížení (i v důsledku vnitřního pnutí) ve specifickém korozním prostředí a je charakterizováno snížením deformační práce nutné k porušení materiálu oproti namáhání v inertním prostředí. Trhliny často vycházejí z místa lokálního porušení pasivní vrstvy (např. bodové koroze) a šíří se ve struktuře kovu buď po hranicích zrn (interkrystalicky) nebo napříč zrny (transkrystalicky). Pokud dochází k cyklickému namáhání s tahovou složkou vzniká tzv. **korozní únava**. Ta nevyžaduje specifické prostředí. Mezi praskání vyvolané prostředím řadíme i vznik trhlin a lomů na zatíženém materiálu při **praskání vyvolaném vodíkem**. K rozlišení mezi druhy praskání vyvolaného prostředím přispívá hodnocení trhlin a lomové plochy i podmínek vzniku.

**Erozní koroze** (obr. 9) vzniká v rychle proudícím prostředí a příčinou je velmi často zvýšení korozní rychlosti erozním porušováním pasivní nebo jiné ochranné vrstvy, která v mírně proudícím prostředí chrání kovový povrch před intenzivním aktivním rozpouštěním. Účinek erozního působení je zvyšován přítomností pevné nebo plynné fáze v proudící kapalině.



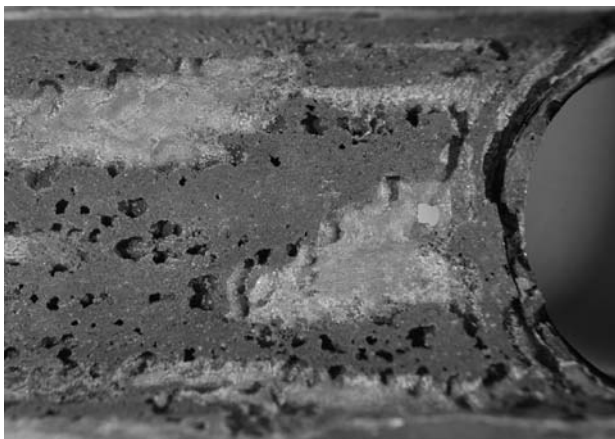
Obr.7. Korozní praskání mosazi



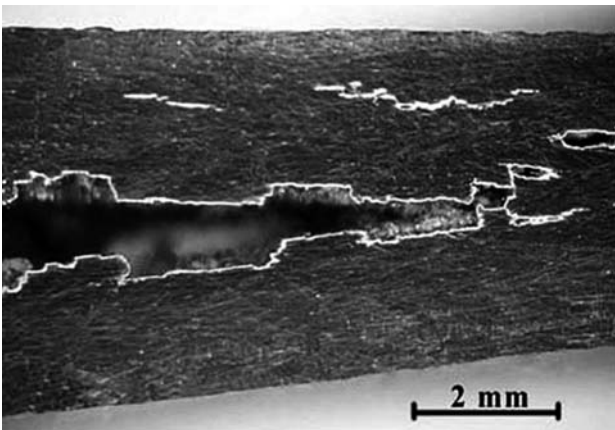
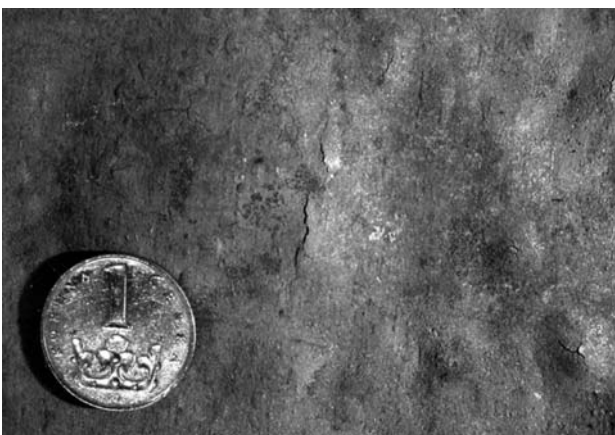
Obr.8. Korozní praskání korozivzdorné oceli.



Při erozní korozi musí být významný podíl anodického rozpouštění na celkovém úbytku kovu. Korozně-erozní účinky prostředí jsou závislé na geometrii korozního systému. Projevem erozní koroze jsou rýhy, vlnky, kapkovité a podkovovité důlky (horse shoe patterns) v povrchu kovu. Do této skupiny patří tzv. rázové napadení i kavitační koroze, bývá sem řazena poněkud nepatříčně i koroze třením.



Obr.9. Erozní koroze uhlíkové oceli.



Obr.10. Vodíkové puchýře.

**Poškození vodíkem** (obr. 10) je významným korozním druhem v chemických a petrochemických provozech, kdy dochází ke kontaktu kovového konstrukčního materiálu s vodíkem. Při teplotách pod 100 °C vzniká vodík na povrchu kovu hlavně katodickou korozní reakcí a vstupuje do oceli v atomární formě. Vznik atomárního vodíku na povrchu kovu je také možný ve vodných elektrolytech při katodické polarizaci povrchu. Rekombinace difundujícího atomárního vodíku v místech poruch struktury kovu, nejčastěji oceli, má za následek vznik velkých vnitřních tlaků (desítky až stovky MPa), které i bez přítomnosti vnějšího napětového namáhání vedou k mechanickému porušení (tzv. *vodíkové puchýře*). Negativní účinky atomárního vodíku se také projevují *vodíkovou křehkostí*, tj. ztrátou pevnosti mechanicky nezátížených kovových materiálů.

## ZÁVĚR

Uvedený přehled české terminologie související s druhy koroze není rozhodně možno pokládat za vyčerpávající. Uvádí doporučené dělení koroze kovů v elektrolytech na jednotlivé druhy, podobný návrh na třídění koroze v plynech nepodává. Velké množství nepřesně vymezených termínů, které lze, byť vzdáleně, pokládat za druhy koroze, svědčí o nutnosti širšího vzdělávání v oboru korozního inženýrství. Bylo by dobré, aby v oblasti nemoci kovů, zvané koroze, nerozhodovali o terminologii přírodní léčitelé, ale vzdělání odborníci tak, jako je tomu v medicíně.

## Literatura

1. G15-02 Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion testing. ASTM Book of Standards, Vol. 03.02, Wear and Erosion; Metal Corrosion, August 2002.
2. ČSN EN ISO 8044 (03 8001) *Koroze kovů a slitin - Základní termíny a definice* (1999).
3. Korozní terminologie na internetu:  
[http://www.corrosionsource.com/handbook/glossary/c\\_glos.htm](http://www.corrosionsource.com/handbook/glossary/c_glos.htm)  
<http://www.ntu.edu.sg/home/asjqiu/corrosion/TERMS.HTM>  
<http://home.swbell.net/walkerrd/corrosio.htm>
4. ČSN 03 81 37 *Metalografické vyhodnocování korozního napadení kovů* (1969).
5. Fontana M.G., Greene N.D.: *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill Book Company 1967.