



واحد علوم و تحقیقات

خوردگی و اکسیداسیون

استاد: مهدی یاری

۱۳۸۸

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمات و اصول خوردگی

۶	۱-۱- تعریف خوردگی
۶	۲-۱- صنایع در معرض خوردگی
۶	۳-۱- اهمیت خوردگی
۶	۴-۱- واکنش الکتروشیمیایی
۶	۱-۴-۱- واکنش کاتدی
۶	۲-۴-۱- واکنش آنودی
۷	۵-۱- نیم پیل
۸	۶-۱- پتانسیل استاندارد
۸	۷-۱- قانون نرنست
۹	۸-۱- پیل دانیل
۱۰	۹-۱- دیاگرام پوربه
۱۱	۱۰-۱- پسیو یا روئین شدن
۱۱	۱۱-۱- مواد مهندسی در خوردگی

فصل دوم: انواع خوردگی

۱۳	۱-۲- خوردگی یکنواخت
۱۴	۲-۲- خوردگی گالوانیک
۱۷	۳-۲- خوردگی حفره ای

۲۳	۴-۲- خوردگی شیاری
۲۵	۵-۲- خوردگی فیلماتنی
۲۷	۶-۲- خوردگی سایشی
۳۳	۷-۲- خوردگی حبایی
۳۵	۸-۲- خوردگی فرسایشی
۳۹	۹-۲- خوردگی انتخابی
۳۹	۱-۹-۲- زدایش روی
۴۱	۲-۹-۲- گرافیت شدن
۴۲	۳-۹-۲- خوردگی انتخابی سایر سیستم های آلیاژی
۴۳	۱۰-۲- خوردگی مرزدانه ای
۴۴	۱-۱۰-۲- خوردگی تورقی
۴۴	۲-۱۰-۲- حساس شدن فولادهای زنگ نزن
۴۵	۳-۱۰-۲- فساد جوش
۴۶	۴-۱۰-۲- خوردگی شیار چاقو
۴۸	۱۱-۲- خسارات هیدروژنی
۴۹	۱-۱۱-۲- تردی هیدروژنی
۴۹	۲-۱۱-۲- تاول زدن هیدروژنی
۵۰	۱۲-۲- خوردگی اتمسفری
۵۲	۱-۱۲-۲- خوردگی تارنیشینگ
۵۲	۱۳-۲- خوردگی تنشی
۵۵	۱-۱۳-۲- تردی قلیایی
۵۶	۲-۱۳-۲- ترک خوردن فصلی
۵۷	۱۴-۲- خوردگی بیولوژیکی
۶۰	۱۵-۲- اکسیداسیون دمای بالا
۶۳	۱-۱۵-۲- خوردگی داغ
۶۳	۲-۱۵-۲- خوردگی خاکستر سوخت
۶۳	۱۶-۲- خوردگی در آب
۶۶	۱۷-۲- خوردگی توأم با خستگی

فصل سوم: روش های ارزیابی خوردگی

- ۶۸ ۱-۳- روش های میدانی
۶۸ ۲-۳- روش های آزمایشگاهی

فصل چهارم: روشهای کنترل خوردگی

- ۷۸ ۱-۴- بازدارنده های خوردگی
۷۸ ۱-۱-۴- بازدارنده های آندی
۷۹ ۲-۱-۴- بازدارنده های کاتدی
۷۹ ۳-۱-۴- بازدارنده های مختلط
۸۰ ۲-۴- حفاظت کاتدی
۸۳ ۳-۴- حفاظت آندی

۱- فصل اول: مقدمات و اصول خوردگی

۱-۱- تعریف خوردگی^۱:

عمل عکس متالورژی استخراجی [تعریف کاملی نیست] - تخریب مواد در اثر عواملی که صد در صد مکانیکی نیستند [تعریف کاملی نیست] - تخریب مواد در اثر واکنش های الکتروشیمیایی [کامل ترین تعریف].

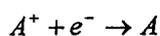
۱-۲- صنایع در معرض خوردگی: در واقع تمامی صنایع در معرض خوردگی هستند.

- صنایع استخراج و پالایش نفت
- صنایع پتروشیمی
- صنایع استخراج فلزات
- صنایع کاغذسازی
- نیروگاه ها

۱-۳- اهمیت خوردگی (منشأ هزینه های خوردگی):

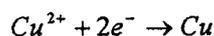
- خسارات ناشی از تخریب قطعه
- خسارات ناشی از توقف کار
- خسارات ناشی از ورود مواد آلاینده به محصولات
- خسارات ناشی از انفجار و آتش سوزی
- خسارات ناشی از افت راندمان تجهیزات

۱-۴- واکنش الکتروشیمیایی: واکنش هایی را که در آن تبادل الکترون اتفاق می افتد، واکنش الکتروشیمیایی می نامند.

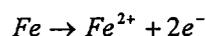


* پایه و اساس همه تخریب هایی که به عنوان خوردگی می شناسیم، یک واکنش الکتروشیمیایی است.

۱-۴-۱- واکنش کاتدی: واکنشی است که طی آن الکترون دریافت می شود.



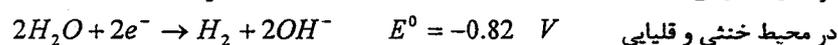
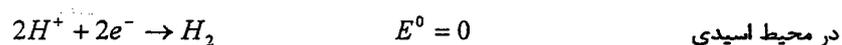
۱-۴-۲- واکنش آندی: واکنشی است که طی آن الکترون آزاد می شود.



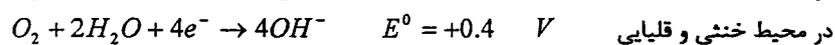
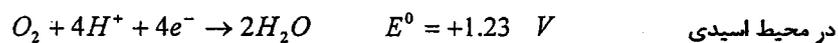
* طبق قانون بقای بار الکتریکی و انرژی، هرگز یک واکنش کاتدی یا آندی به تنهایی رخ نمی دهد و همواره این دو واکنش با هم انجام می گیرند؛ بدین صورت که الکترون های آندی در واکنش کاتدی مصرف می شود.

* واکنش های آندی همان واکنش های خوردگی هستند ($M \rightarrow M^{n+} + ne^{-}$) و واکنش های کاتدی در خوردگی از دو حالت خارج نیست:

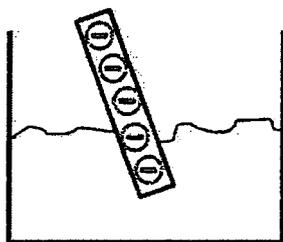
۱- تصاعد هیدروژن



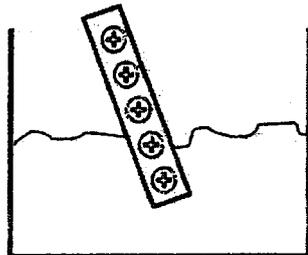
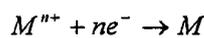
۲- احیا اکسیژن



۱-۵- نیم پیل: به مجموعه یک الکترود در الکترولیت نیم پیل گفته می شود. هرگاه الکترود وارد الکترولیت شود بر روی سطح الکترود تجمع بار بوجود می آید که باعث ایجاد پتانسیل الکتریکی می شود. در این صورت دو حالت ممکن است پیش آید:
حالت اول) بار الکتریکی منفی روی سطح تجمع کند.

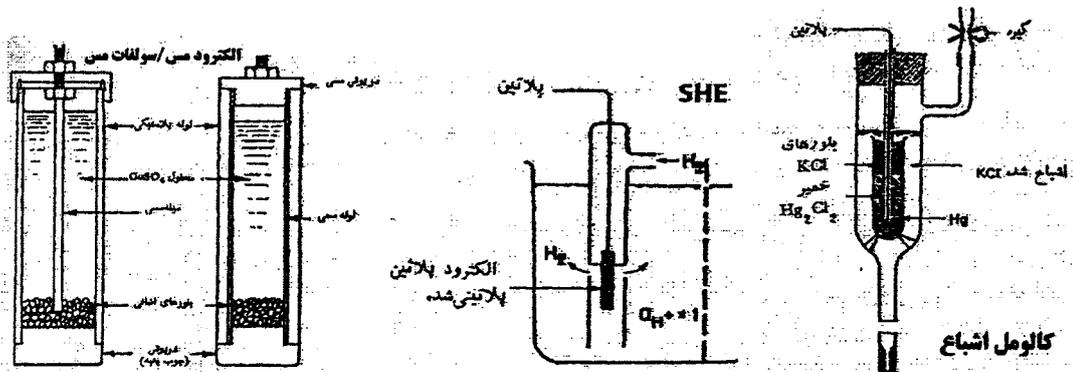


حالت دوم) بار الکتریکی مثبت روی سطح تجمع کند.



از آنجایی که پتانسیل الکتریکی معیاری نسبی است، برای اندازه گیری پتانسیل الکتریکی نیاز به یک مرجع داریم. بدین منظور واکنش تصاعد هیدروژن را به عنوان مبنا قرار داده اند و پتانسیل صفر را به آن نسبت می دهند.

اما از آن جایی که استفاده از الکترود استاندارد هیدروژن (SHE) دشوار است، از الکترود های مرجع^۲ دیگری مانند کالومل اشباع و یا الکترود مس/سولفات مس استفاده می شود.



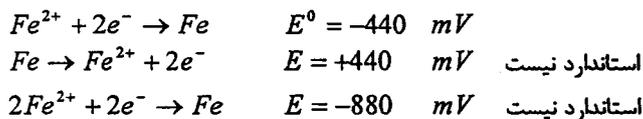
۱-۶- پتانسیل استاندارد E^0 : برای بدست آوردن E^0 باید شرایط زیر برقرار باشد:

• دما $\theta = 25$ سانتی گراد ($T = 298$ کلوین).

• فشار $P = 1 \text{ atm}$

• واکنش حتماً به صورت احیا (به صورت کاتدی) نوشته شود.

• موازنه واکنش برای تولید یک مول فلز انجام شده باشد (ضریب استوکیومتری فلز یک باشد).



۱-۷- قانون نرنست: بیانگر رابطه بین انرژی آزاد گیبس و پتانسیل الکتریکی می باشد.

$$\Delta G = -nFE$$

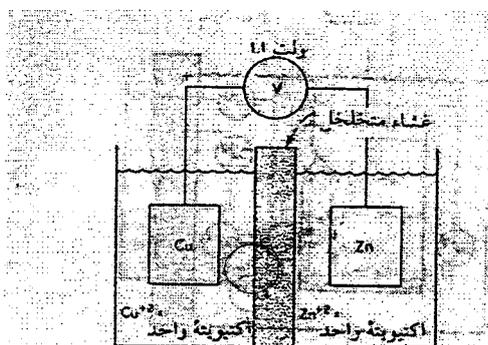
همانطور که از رابطه فوق قابل استنتاج است ماهیت پتانسیل الکتریکی همان انرژی آزاد است؛ بنابراین پتانسیل نماینده ترمودینامیک است و انجام پذیر بودن یا نبودن واکنش را پیش بینی می کند.

$$\Delta G < 0 \Rightarrow E > 0 \quad \text{واکنش انجام پذیر است}$$

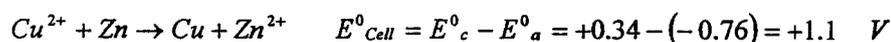
* جریان الکتریکی نماینده سینتیک است و سرعت واکنش را پیش بینی می کند.

۲. Reference Electrodes

۸-۱- پیل دانیل:



پیل رورنسیل مین و روی در حال تعادل با یونهای خود



* برای وقوع خوردگی چهار رکن لازم است که حذف هر یک از این ارکان باعث متوقف شدن خوردگی

می شود:

- واکنش آندی
- واکنش کاتدی
- اتصال بین کاتد و آند
- الکترولیت



$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{a_{\text{Fe}}}{a_{\text{Fe}^{2+}}}$$

$$-nFE = -nFE^0 + RT \ln \frac{a_{\text{Fe}}}{a_{\text{Fe}^{2+}}}$$

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{Fe}^{2+}}}{a_{\text{Fe}}}$$

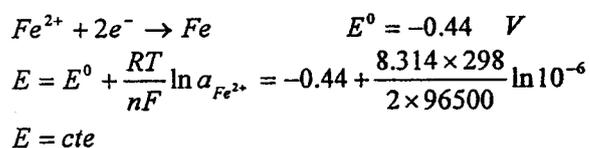
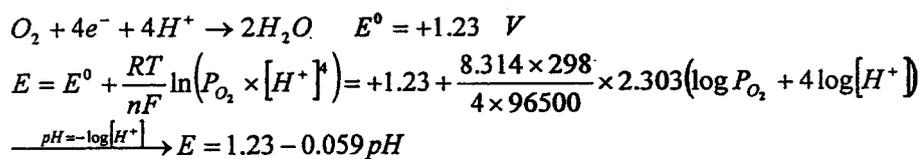
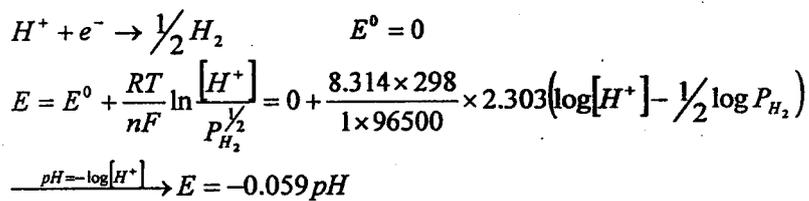
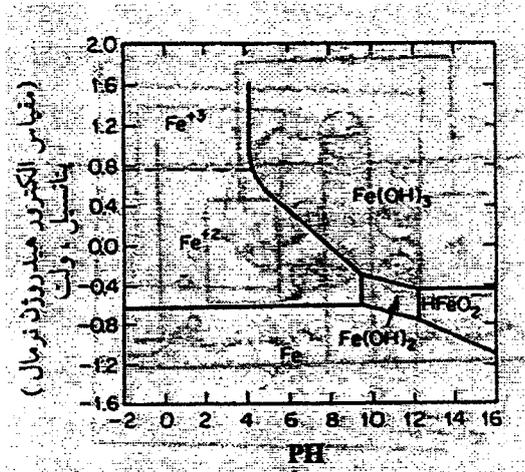
* اکتیویته مواد خالص را برابر یک در نظر می گیرند $a_{\text{Fe}} = 1$.

* در مورد گازها بجای اکتیویته از فشار و در مورد یون ها از غلظت استفاده می شود؛ و اگر غلظت را نداده

باشند، خودمان برابر $10^{-6} M$ در نظر می گیریم. فشار گاز هیدروژن برابر فشار هوا است و فشار گاز اکسیژن

طبق قانون دالتون 0.2 فشار هوا می باشد.

۹-۱- دیاگرام پوربه ۳:

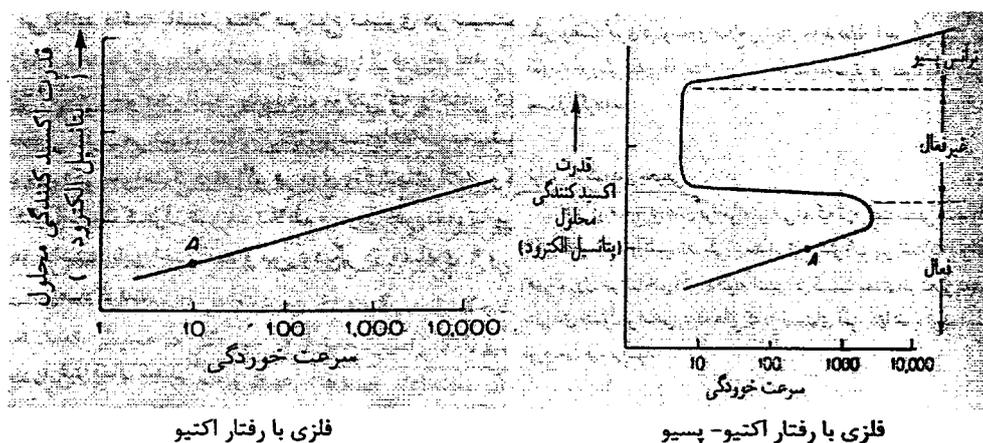


در دیاگرام فوق ناحیه Fe را ناحیه حفاظت، نواحی Fe^{2+} و Fe^{3+} را ناحیه خوردگی و ناحیه Fe_2O_3 را ناحیه پسیو می نامند.

۳. Pourbaix Diagram

۱-۱- پسیو^۴ یا روئین شدن: پسیو شدن خاصیتی است که در اثر آن لایه ای به نام لایه پسیو بر روی سطح فلز ایجاد می شود و مانع از خوردگی می شود. لایه پسیو بسیار بسیار نازک است، ضخامت آن در حدود آنگستروم و شامل تنها چهار یا پنج لایه اتمی می باشد. لایه پسیو هنوز کاملاً آنالیز نشده است و ساختاری آمورف یا شبه آمورف دارد. این خاصیت بیشتر در فلزات انتقالی (فلزات دارای اربیتال d خالی) مانند Fe و Ni و Cr و Ti و Mo اتفاق می افتد.

رفتار پسیو شدن در محیط های خاص بروز می کند و هر فلزی در هر محیطی رفتار پسیو شدن را از خود نشان نمی دهد.



فلزی با رفتار اکتیو

فلزی با رفتار اکتیو-پسیو

۱۱-۱- مواد مهندسی در خوردگی:

الف) فولادهای زنگ نزن^۵: فولاد آلیاژی که حاوی حداقل ۱۲٪ کروم به عنوان عنصر اصلی آلیاژی می باشد، فولاد زنگ نزن (SS) نامیده می شود. فولادهای زنگ نزن به علت تشکیل لایه پسیو اکسید کروم نسبت به فولادهای ساده کربنی مقاومت به خوردگی بهتری دارند. فولادهای زنگ نزن به طور کلی به چهار خانواده تقسیم می شوند:

۲××

۳××

۴××

۶××

از این میان خانواده ۳×× مهمترین خانواده فولادهای زنگ نزن محسوب می شود و زمینه آستنیتی دارند. آلیاژ معروف این خانواده، آلیاژ ۳۰۴ است که ۱۸٪ کروم و ۸٪ نیکل دارد. اگر این آلیاژ کربن زدایی شود، آلیاژهای ۳۰۴L و ۳۰۴EL بدست می آید. اگر به آلیاژ ۳۰۴ حدود ۲٪ مولیبدن اضافه گردد، آلیاژ ۳۱۶ حاصل می شود که در برابر خوردگی حفره ای مقاوم است. اگر ۲٪ تیتانیوم به ۳۰۴ اضافه کنند، حاصل آلیاژ

۴. Passive

۵. Stainless Steel

۳۲۱ خواهد بود یا اگر ۲٪ عنصر نئوبیم *Nb* (این عنصر به کلومبیم *Cb* نیز معروف است) به ۳۰۴ افزوده شود، آلیاژ ۳۴۷ بدست خواهد آمد. آلیاژهای ۳۲۱ و ۳۴۷ را آلیاژهای پایدارسازی شده می گویند. جایگزینی *Mn* بجای *Ni* خانواده ۲×× را بدست می دهد که این خانواده نیز زمینه آستنیتی دارند. خانواده ۴×× فقط حاوی *Cr* است و زمینه مارتنزیتی یا فریتی دارند. آلیاژ معروف این خانواده آلیاژ ۴۳۰ است که تقریباً ۱۸٪ کروم دارد و زمینه اش فریتی است. آلیاژهای این خانواده حساسیت کمتری به خوردگی مرزخانه ای دارند.

خانواده ۶×× زمینه دو فازی (فریت+مارتنزیت) دارند و از استحکام بالایی برخوردار هستند اما برای کاربردهای خوردگی پیشنهاد نمی شوند زیرا مقاومت به خوردگی بالایی ندارند. به آلیاژهای خانواده ۶×× به دلیل دو فازی بودن گاهاً فولادهای زنگ نزن دوبلکس نیز گفته می شود.

ب) برنج ها^۶: به آلیاژ *Cu-Zn*، برنج می گویند. با تغییر مقدار روی (حداکثر ۴۰٪) خواص برنج نیز تغییر می کند. برخی از معروف ترین برنج ها عبارتند از:

Cu-15%Zn برنج قرمز^۷

Cu-30%Zn برنج فشنگ یا کارتريج^۸

Cu-40%Zn فلز مونتز^۹

برنج های حاوی عناصری چون قلع، آلومینیم، سیلیسیم، منگنز، نیکل و سرب که مقدارشان به ندرت از ۴٪ تجاوز می کند، تحت عنوان برنج های آلیاژی شناخته می شوند. برای مثال اگر ۱٪ قلع به برنج فشنگ افزوده گردد، آلیاژی حاصل می شود که مقاومت به خوردگی خوبی در محیط آب دریا دارد و برنج دریایی یا آدمیرالتی^{۱۰} نامیده می شود. افزودن ۱٪ قلع به فلز مونتز آلیاژی به نام برنج کشتی را بدست می دهد. اگر به برنج فشنگ ۱ تا ۲ درصد *Al* اضافه گردد، برنج آلومینیم دار بدست می آید که در برابر خوردگی سایشی مقاوم است.

ج) برنزها^{۱۱}: هر آلیاژی از مس با عنصری غیر از روی را برنز می گویند. مثلاً *Cu-Be*؛ برنز قلع *Cu-Sn*؛ برنز آلومینیم *Cu-Al*؛ برنز سیلیسیم *Cu-Si*.

۶. Brass
۷. Red Brass
۸. Cartridge Brass
۹. Muntz Metal
۱۰. Admiralty Brass
۱۱. Bronze

۲- فصل دوم: انواع خوردگی

خوردگی را به طور کلی به دو دسته زیر تقسیم می کنند:

- خوردگی یکنواخت^۱
- خوردگی موضعی^۲

۲-۱- خوردگی یکنواخت: در این نوع خوردگی سطح قطعه بصورت یکنواخت و با آهنگ یکسانی خورده می شود. نیروی محرکه خوردگی یکنواخت این است که حالت اکسیدی فلز پایدارتر از خود فلز است. بنابراین در همه فلزات اتفاق می افتد. بیشترین تناژ و حجم محصولات خوردگی مربوط به خوردگی یکنواخت است اما در میان انواع خوردگی کمترین اهمیت را دارد چراکه قابل پیش بینی است.



معیارهای ارزیابی خوردگی یکنواخت:

۱- معیار کاهش وزن^۳: اشکال این معیار این است که عامل زمان و سطح مؤثر خوردگی را در نظر نگرفته است.

$$WL\% = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

۲- معیار *mdd*: ایراد این روش این است که فلزات مختلف را نمی توان با هم مقایسه کرد زیرا عامل جنس فلز را در نظر نگرفته است.

$$C.R. = \frac{W}{AT}$$

۳- معیار *mpy*^۴: پر کاربردترین معیار می باشد. اگر سرعت خوردگی بالا باشد بر حسب *ipy*^۵ نیز بیان می شود. گاهی از *mmpy (mm/yr)* استفاده می شود.

$$C.R. = \frac{534W}{DAT}$$

-
- ۱. Uniform Corrosion
 - ۲. Local Corrosion
 - ۳. Weight Loss
 - ۴. Mill Per Year
 - ۵. Inch Per Year

$inch = 2.54cm = 25.4mm$

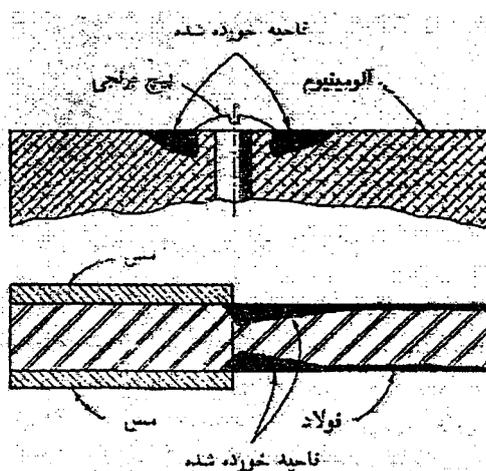
$inch = 1000mill$

$ipy = 1000mpy$

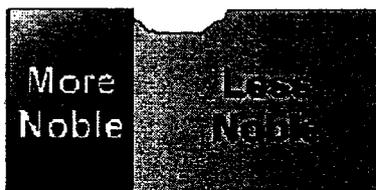
راهکارهای جلوگیری از خوردگی یکنواخت:

- حفاظت کاتدی
- حفاظت آنودی
- استفاده از پوشش ها
- استفاده از بازدارنده های خوردگی

۲-۲- خوردگی گالوانیک^۶ یا دو فلزی^۷: از انواع خوردگی های موضعی می باشد. هنگامی که دو فلز غیر هم جنس با هم در تماس الکتریکی قرار بگیرند، نسبت به زمانی که در تماس نیستند، خوردگی فلز فعال تر افزایش یافته و خوردگی فلز نجیب تر کاهش می یابد. نیروی محرکه این نوع خوردگی اختلاف پتانسیل بین دو فلز است.



مکانیزم: وقتی تماس الکتریکی بین دو فلز غیر هم جنس برقرار می شود، در واقع یک پیل گالوانیکی تشکیل می گردد.



- ۶. Galvanic Corrosion
- ۷. Bimetallic Corrosion

* یک فاکتور مهم در خوردگی گالوانیک اثر سطح و یا عبارتی نسبت سطح کاتد به سطح آند می باشد. هرچه نسبت سطح کاتد به سطح آند بیشتر باشد (کاتد بزرگ و آند کوچک باشد)، شدت خوردگی گالوانیک بیشتر می شود زیرا هنگامی که سطح کاتد بزرگ باشد، نتیجتاً سرعت واکنش کاتدی افزایش می یابد و به تبع آن سرعت واکنش آندی (خوردگی) افزایش پیدا می کند؛ چرا که به هنگام خوردگی سرعت واکنش کاتدی باید با سرعت واکنش آندی برابر باشد ($i_c = i_a$).

* واکنش کاتدی و سطح کاتد کنترل کننده سرعت خوردگی گالوانیک است.

* از اصول خوردگی گالوانیک در حفاظت کاتدی استفاده می شود. فولاد گالوانیزه مثال کلاسیک حفاظت کاتدی فولاد است.

* در خوردگی گالوانیک جدول سری الکتروشیمیایی عملاً پیش بینی دقیقی برای تعیین کاتد و آند بدست نمی دهد و بنابراین از جدول سری گالوانیکی (تانسیون) بدین منظور استفاده می شود. در این جدول هرچه دو فلز یا آلیاژ به یکدیگر نزدیک تر باشند، خوردگی گالوانیک آن دو کمتر می شود.

واکنش الکتروکود	پتانسیل استاندارد به وقت (۲۵ °C)	سری (کاتدی)	
$Au^{3+} + 3e^- = Au$	1.50	Platinum	Pt
$Pt^{2+} + 2e^- = Pt$	ca. 1.2	Carbon (graphite)	C
$Pd^{2+} + 2e^- = Pd$	0.987	316 stainless steel (passive)	(18Cr, 12Ni, 3Mo)
$Hg^{2+} + 2e^- = Hg$	0.854	Monel	(66Ni, 29Cu, 2.8Al, 0.3Fe, 0.4Mn)
$Ag^+ + e^- = Ag$	0.800	Hastelloy C	(59Ni, 17Mo, 16.5Co, 2.5Cu, 7Fe, 1Si, 1Mn, 0.3V, 0.06C)
$Hg_2^{2+} + 2e^- = 2Hg$	0.789	304 stainless steel (passive)	(18Cr, 8Ni)
$Cu^+ + e^- = Cu$	0.521	Titanium	Ti
$Cu^{2+} + 2e^- = Cu$	0.337	Silver	Ag
$2H^+ + 2e^- = H_2$	0.000	Nickel-aluminum bronze	(78/31Cu, 4.9/5.5Ni, 9/10Al, 3.5/5.5Fe, 0.5/1Mn, 0.01Pb)
$Pb^{2+} + 2e^- = Pb$	-0.126	Inconel	(78Ni, 13.3Co, 6Fe)
$Sn^{2+} + 2e^- = Sn$	-0.136	Nickel	Ni
$Mo^{3+} + 3e^- = Mo$	ca. -0.2	Cupronickel	(70Cu, 30Ni)
$Ni^{2+} + 2e^- = Ni$	-0.250	Cupronickel	(90Cu, 10Ni)
$Co^{2+} + 2e^- = Co$	-0.277	Admiralty brass	(70/30Cu, 26/28Zn, 0.9/1.2Sn, 0.07Pb, 0.06Fe, 0.02/0.1As, Sb-or P)
$Tl^+ + e^- = Tl$	-0.336	M. bronze	86.3Cu, 4.7Sn, 4.6Zn, 3.9Fe
$In^{3+} + 3e^- = In$	-0.342	G. bronze	88Cu, 10Sn, 2Zn
$Cd^{2+} + 2e^- = Cd$	-0.403	Aluminum brass	(76/79Cu, 18/22Zn, 1.5/2.5Al, 0.07Pb, 0.06Fe, 0.02/0.1As)
$Fe^{2+} + 2e^- = Fe$	-0.440	Red brass	(85Cu, 15Zn)
$Ga^{3+} + 3e^- = Ga$	-0.53	Silicon bronze	(85Cu, 5Si, 5Zn, 2.5Fe, 1.5Al, 1.5Mn, 1Sn, 0.5Pb)
$Cr^{3+} + 3e^- = Cr$	-0.74	Copper	Cu
$Cr^{2+} + 2e^- = Cr$	-0.91	Yellow brass	(65Cu, 35Zn)
$Zn^{2+} + 2e^- = Zn$	-0.763	Naval brass	(60Cu, 39Zn, 1Sn)
$Nb^{3+} + 3e^- = Nb$	ca. -1.1	Manganese bronze	(81/65Cu, 23/39Zn, 1.4/2Fe, 0.1/0.7Mn, 0/1Sn, 0/4.5Al)
$Mn^{2+} + 2e^- = Mn$	-1.18	Moniz metal	(59/63Cu, 36/40Zn, 0.3Pb, 0.07Fe)
$Zr^{4+} + 4e^- = Zr$	-1.53	Ti	Ti
$Tl^{2+} + 2e^- = Tl$	-1.63	Lead	Pb
$Al^{3+} + 3e^- = Al$	-1.66	Ni resist	(64/75Fe, 13.5/17.5Ni, 5.5/7.5Co, 3C, 1.0/2.8Si, 1.0/1.5Mn, 1.0/2.5Cr)
$Hf^{4+} + 4e^- = Hf$	-1.70	316 stainless steel (active)	(18Cr, 12Ni, 3Mo)
$U^{3+} + 3e^- = U$	-1.80	304 stainless steel (active)	(18Cr, 8Ni)
$Be^{2+} + 2e^- = Be$	-1.85	430 chromium steel	(17Cr)
$Mg^{2+} + 2e^- = Mg$	-2.37	410 chromium steel	(13Cr)
$Na^+ + e^- = Na$	-2.71	Cast iron	-
$Ca^{2+} + 2e^- = Ca$	-2.87	Wrought iron	-
$K^+ + e^- = K$	-2.93	Mild steel	-
$Li^+ + e^- = Li$	-3.05		

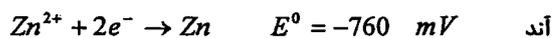
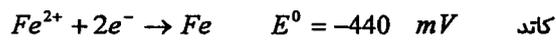
جدول سری الکتروشیمیایی

جدول سری گالوانیکی

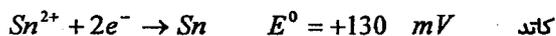
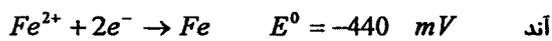
مثال هایی عملی از خوردگی گالوانیک:

۱. به منظور جلوگیری از رویش قارچ و جلبک [خوردگی بیولوژیکی] روی بدنه هواپیما در مناطق مرطوب از پارچه های آغشته به نمک های مس بر روی بدن هواپیما استفاده می کنند. مس و بدنه از جنس فولاد آلیاژی تشکیل زوج (کوپل) گالوانیکی می دهند و در نتیجه فولاد دچار خوردگی می شود.

۲. ورق گالوانیزه عبارتست از پوشش روی بر فولاد. هنگامی که خراشی ایجاد گردد، آهن توسط روی حفاظت می شود؛ ضمناً نسبت سطح کاتد به سطح آند بسیار کم است و پوشش روی به طور شدیدی خورده نمی شود.



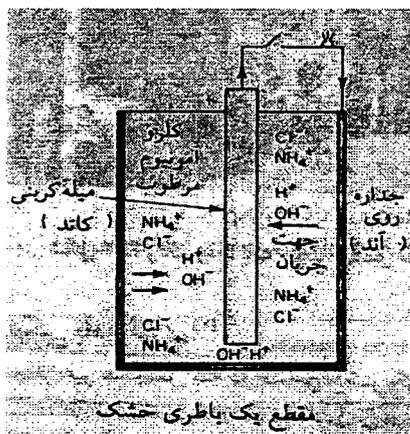
۳. به پوشش قلع بر فولاد حلبی می گویند. اگر خراشی ایجاد شود، از آنجایی که نسبت سطح کاتد به سطح آند بسیار زیاد است، آهن به شدت خورده می شود.



۴. اگر بدنه قایقی را از جنس مس با میخ پرچ هایی فولادی اتصال دهیم و بار دیگر بالعکس، بدنه فولادی و میخ پرچ ها از مس باشد، حالت نخست خطرناک تر است زیرا نسبت سطح کاتد به سطح آند زیادتر است.

کاربرد های مفید خوردگی گالوانیک:

- باطری های خشک
- حفاظت کاتدی
- تمیز کردن نقره



راهکارهای جلوگیری از خوردگی گالوانیک:

- جدا کردن دو فلز غیر هم جنس از هم.
- کاهش نسبت سطح کاتد به سطح آند.
- استفاده از فلزاتی که در جدول تانسینون به هم نزدیک باشند.
- متصل کردن فلز سومی به زوج های گالوانیکی که نسبت به دو فلز قبلی آند باشد.
- استفاده از بازدارنده های خوردگی.

۲-۳- خوردگی حفره ای یا حفره دار شدن^۸: حفره دار شدن از انواع خوردگی های موضعی به شمار می رود. در قطعه ای که دچار این خوردگی شده است، حفراتی ایجاد می شود که گاهی باعث بروز نشتی در سیستم می شود. هنگامی که این خوردگی شروع شود، حفره ها با سرعت زیادی بداخل نفوذ می کنند. این حفرات ممکن است به صورت منفرد^۹ و یا مجتمع^{۱۰} باشند.

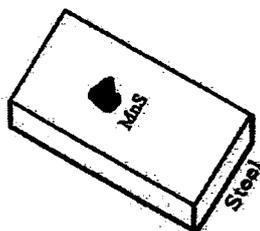


مکانیزم: مکانیزم خوردگی حفره ای دو مرحله دارد:

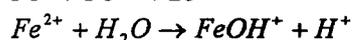
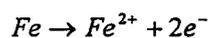
۱. مرحله اول: جوانه زنی حفره
 ۲. مرحله دوم: رشد (اشاعه) حفره
- نقاطی از سطح وجود دارند که برای جوانه زنی حفره بسیار مناسب هستند و عبارتند از:
- آخال ها^{۱۱} و ناخالصی ها
 - خراش ها و شیارها
 - عیوب کریستالی همانند نابجایی ها
 - بخش هایی از لایه پسیو که دچار آسیب و صدمه شده است
 - مرزدانه ها (زیراکه سطح انرژی بالاتری دارند و یکنواختی لایه پسیو کمتر است) و رسوبات ثانویه در دانه ها
- * هر چه سطح صاف تر باشد، محل جوانه زنی حفره کمتر است و اغلب حفرات ایزوله دیده می شود.
- * هر چه کار سرد بیشتری انجام شود، عیوب کریستالی در سطح افزایش می یابد و محل جوانه زنی حفره نیز بیشتر می شود.

۸. Pitting Corrosion
 ۹. Isolated
 ۱۰. Complex
 ۱۱. Inclusions

مرحله رشد حفره را برای نمونه ای از جنس فولاد که آخال MnS بر روی سطح آن قرار دارد بررسی می کنیم:

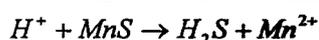


از آنجایی که آخال محل مناسبی برای جوانه زنی حفره می باشد و نیز در فصل مشترک آخال و سطح فلز پیوستگی لایه پسیو از بین می رود، خوردگی در این محل با هیدرولیز شدن یون آهن اتفاق می افتد.



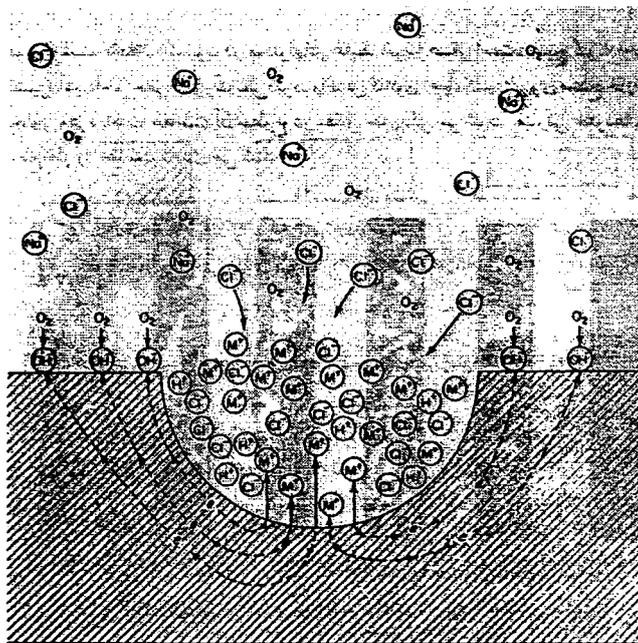
(یادآوری: یون های فلزی به استثنای K^{+} و Na^{+} در آب هیدرولیز می شوند به این صورت که به هیدروکسید تبدیل شده و رسوب می کنند).

به این ترتیب غلظت H^{+} در اطراف آخال افزایش می یابد و به یون های هیدروژن به آخال حمله می کنند.



بنابراین pH داخل حفره اسیدی تر می گردد و نتیجتاً خوردگی فلز زیادتر می شود و بدنبال آن هیدرولیز یون فلزی ادامه می یابد و این چرخه مرتباً تکرار می شود.

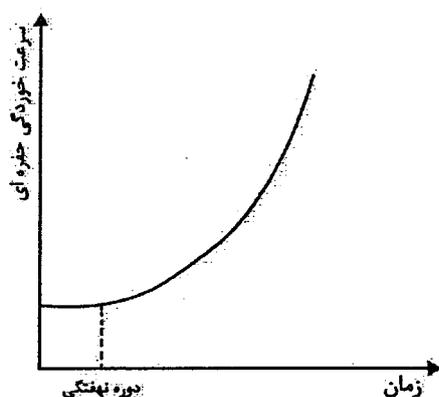
این پدیده را اثر اتوکاتالیتیک یا خودفزاینده می گویند. یعنی واکنش های خوردگی در داخل حفره شرایطی را بوجود می آورند که محرک ادامه خودشان است.



پراکنده های اتوکاتالیتیک در داخل یک حفره

* حفره ها معمولاً در جهت نیروی جاذبه رشد می کنند. اکثر حفره ها روی سطوح افقی بوجود آمده و به پایین رشد می کنند.

• نمودار تغییرات سرعت خوردگی حفره ای نسبت به زمان به صورت زیر است:



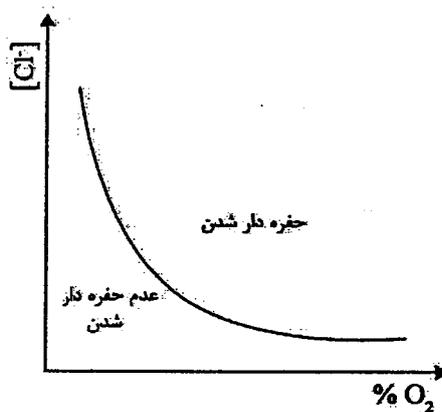
مدت زمان دوره نهفتگی^{۱۲} بر ما مشخص نیست؛ بعبارت دیگر برای ما مشخص نیست که چه هنگام خوردگی حفره ای اتفاق می افتد و بدین دلیل از سایر انواع دیگر خوردگی خطرناکتر است.

در خوردگی حفره ای دو عامل از اهمیت زیادی برخوردار است:

۱. سکون محلول: شرط لازم برای حفره دارشدن، سکون محلول است. حرکت محلول pH را افزایش می دهد و در نتیجه میزان اسیدی بودن محلول کاهش می یابد.
۲. آنیون مهاجم: هر جا آنیون های Br^- و I^- و ClO_4^- و SCN^- و مخصوصاً Cl^- وجود داشته باشد، امکان وقوع خوردگی حفره ای وجود دارد.

نکاتی درباره آنیون مهاجم Cl^- :

- هرچه درصد اکسیژن محلول بیشتر باشد، به حداقل کلرور لازم کمتری برای حفره دار شدن نیاز است.

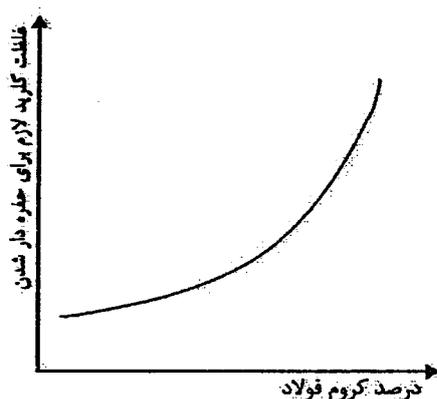


- یون Cl^- در لایه پسیو نفوذ می کند و باعث ترک خوردن آن می شود که این ترک محل مناسبی برای جوانه زنی حفره است.
- نفوذ کلرور بستگی به ساختار لایه پسیو دارد. هرچه بلورینگی (کریستالین بودن) لایه پسیو بیشتر باشد، نفوذ کلرور هم بیشتر می گردد. زیرا بطور کلی هرچه ساختاری منظم تر باشد، نفوذ راحت تر انجام می شود.

فلزات مستعد خوردگی حفره ای، فلزات اکتیو- پسیو همانند فولاد های زنگ نزن، Ti و آلیاژهایش، Al و آلیاژهایش، Cu و آلیاژهایش هستند.

عناصر آلیاژی گوناگونی به منظور افزایش مقاومت نسبت به حفره دار شدن بکار برده می شود. برخی از عناصر آلیاژی که برای فولادهای زنگ نزن مورد استفاده قرار می گیرد، عبارتند از:

- خود Cr به عنوان عنصر آلیاژی اصلی فولادهای زنگ نزن با کاهش بلورینگی لایه پسیو تأثیر قابل ملاحظه ای دارد. اگر درصد کروم به بیش از ۲۳٪ برسد، ساختار لایه پسیو کاملاً آمورف می گردد.



- می توان از نیکل نیز نام برد که البته تأثیر کم و ناچیزی دارد.
- نیتروژن به عنوان عنصر حل شونده با غلظت ۰/۰۰۸٪ به خانواده های ۳×× و ۴×× اضافه می گردد که تأثیر زیادی دارد.
- از همه مهمتر عنصر مولیبدن است که اگر به میزان ۲٪ به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ اضافه گردد، فولاد ۳۱۶ بدست می آید که در برابر خوردگی حفره ای بسیار مقاوم است.

در مورد عنصر آلیاژی Mo باید به دو نکته ذیل توجه داشت:

۱. مولیبدن اثر خود را در حضور کروم نشان می دهد.
۲. اثر مولیبدن در افزایش مقاومت به خوردگی حفره ای در دمای بالاتر از $50^{\circ}C$ عکس می شود.

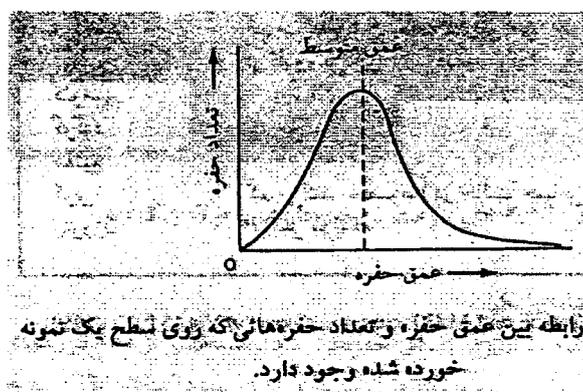
معیارهای ارزیابی خوردگی حفره ای:

معیار کاهش وزن برای ارزیابی خوردگی حفره ای، معیار مناسبی نیست؛ چراکه حفرات معمولاً کوچک می باشند و تقلیل وزن ناشی از آن ها ناچیز است در حالیکه عمق آن ها باعث تخریب و انهدام قطعه می شود.



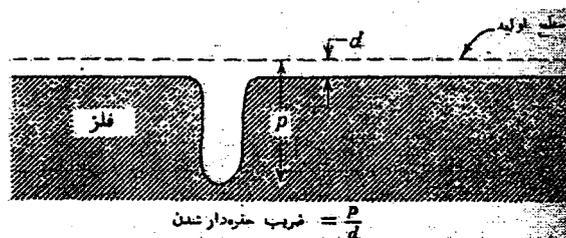
۱. دانسیته حفرات: عبارتست از تعداد حفرات در واحد سطح. این معیار مناسب نمی باشد زیرا عمق حفره اهمیت دارد.

۲. متوسط عمق حفره:



۳. معیار *Pitting Factor*: بهترین معیار این است که عمق عمیق ترین حفره در نظر گرفته شود؛ زیرا عمیق ترین حفره باعث تخریب نهایی می شود.

$$P.F. = \frac{p}{d}$$

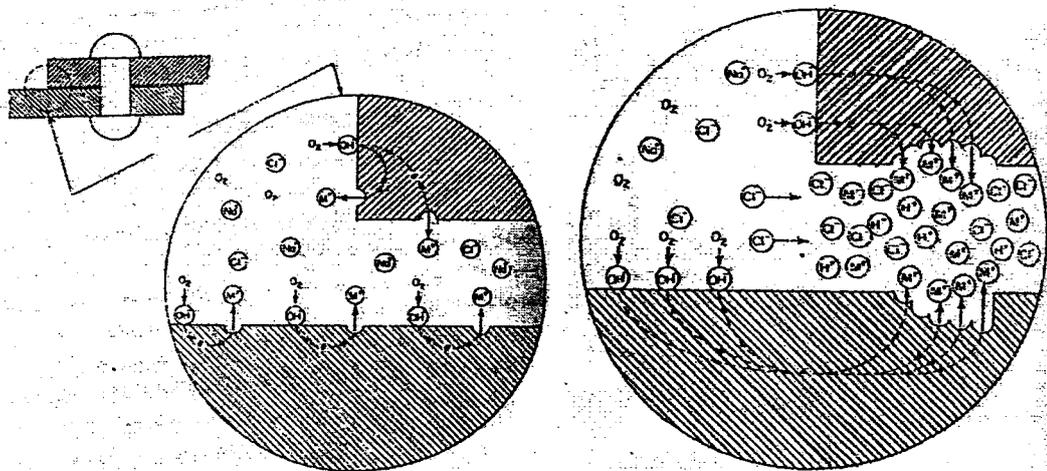


اگر $P.F. = 1$ باشد، یعنی فقط خوردگی یکنواخت اتفاق افتاده است و همواره $P.F. > 1$ است.

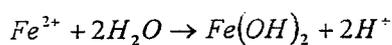
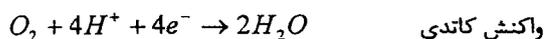
۴. غلظت بحرانی کلرور: عبارتست از حداقل غلظت کلرور لازم برای حفره دارشدن. هر چه $[Cl^-]_{crit}$ بیشتر باشد، مقاومت به خوردگی حفره ای بیشتر است.

۵. دمای بحرانی: عبارتست از حداقل دمای لازم برای حفره دارشدن. هر چه T_{crit} بیشتر باشد، مقاومت به خوردگی حفره ای بیشتر است.

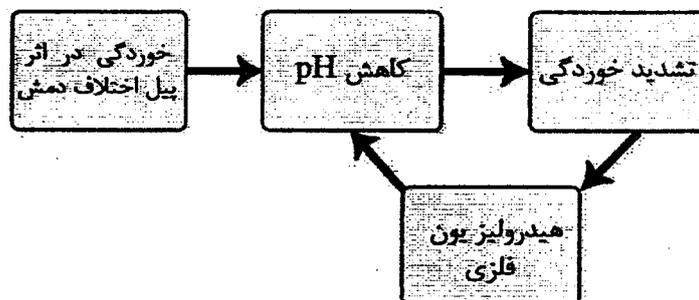
۲-۴- خوردگی شیاری^{۱۳} یا شکافی یا واشری: یکی از انواع خوردگی های موضعی محسوب می شود که اکثراً در شیارها و شکاف ها اتفاق می افتد و با سرعت زیاد پیش می رود. این شکاف باید بقدری باریک باشد تا الکترولیت داخل آن ساکن باشد و یک منطقه اصطلاحاً مرده بوجود آید و از طرف دیگر باید بقدری پهن باشد که ارتباط الکتریکی با محیط خارج برقرار شود. نیروی محرکه خوردگی شیاری، پیل اختلاف دماست.



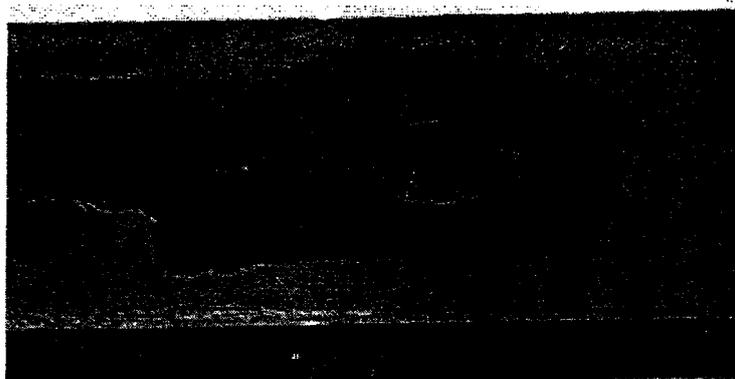
مکانیزم: یک اختلاف فشار اکسیژن بین شکاف و محیط خارج وجود دارد؛ به این ترتیب که درون شکاف فشار اکسیژن کمتر است زیرا که مولکول های اکسیژن نمی توانند به شکاف نفوذ کنند. بنابراین یک پیل اختلاف دماست بوجود می آید بدین صورت که شکاف که فشار اکسیژن کمتری دارد، نقش آند و محیط خارج نقش کاتد را بازی می کنند و خوردگی در آند اتفاق می افتد؛ بعبارت دیگر واکنش آندی درون شکاف و واکنش کاتدی در محیط خارج انجام می شود.
به عنوان نمونه قطعه ای فولادی را در نظر می گیریم:



حال با هیدرولیز شدن یون فلزی pH درون شکاف اسیدی تر می گردد (گاهاً pH شکاف به کمتر از ۳ نیز می رسد) که این امر افزایش خوردگی را منجر می شود. به بیان دیگر خوردگی شیاری طبیعت اتوکاتالیتیکی دارد.



- * فلزات اکتیو- پسیو خصوصاً فولاد های زنگ نزن مستعد خوردگی شیاری هستند.
- * یون کلرور باعث تشدید خوردگی شیاری می شود. این یون ها تحرک بالایی دارند و برای خنثی کردن بار الکتریکی مثبت وارد شکاف می شوند و موجبات افزایش خوردگی را فراهم می آورند. همچنین می دانیم که کلرور موجب از بین رفتن لایه پسیو می شود.
- * خوردگی شیاری در محل فلانچ ها، پیچ و مهره و در محل واشر بین پیچ و مهره شایع تر است.



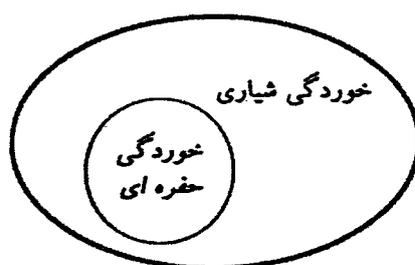
- * نوع خاصی از خوردگی شیاری وجود دارد که خوردگی زیر رسوبی نامیده می شود و بعنوان مثال بر اثر چسبیدن گل و نمک در گل گیر اتومبیل ایجاد می شود. آلودگی^۴ حالتی از خوردگی زیر رسوبی می باشد که در اثر چسبیدن جلبک ها به بدنه کشتی بوجود می آید.

تفاوت خوردگی زیر رسوبی و خوردگی شیاری:

♦ در خوردگی زیر رسوبی اثر اتوکاتالیتیک ظاهر نمی شود.

تفاوت خوردگی حفره ای و خوردگی شیاری:

♦ فلزاتی که دچار خوردگی حفره ای می شوند، حتماً دچار خوردگی شیاری نیز می شوند. اما عکس آن صادق نیست. بعبارت دیگر خوردگی حفره ای زیرمجموعه خوردگی شیاری است.



شبهات خوردگی حفره ای و خوردگی شیاری:

- ♦ هر دو خوردگی، اثر اتوکاتالیتیک دارند.
- ♦ در هر دو خوردگی باید محلول ساکن باشد.
- ♦ کلرور بعنوان آنیون مهاجم در هر دو خوردگی عمل می کند.
- ♦ فلزات اکتیو- پسیو مستعد هر دو خوردگی هستند.

۲-۵- خوردگی فیلمانی یا رشته ای^{۱۵}: یکی از انواع خوردگی های موضعی محسوب می شود که اکثراً در پوشش ها بوجود می آید. قطعه ممکن است از جنس فولاد، منیزیم یا آلومینیم باشد و پوشش می تواند فلزی مانند طلا، نقره، قلع، یا غیر فلزی مانند اپوکسی، لعاب، فسفات، باشد. این نوع خوردگی آسیب های مکانیکی بدنبال ندارد و تنها به کیفیت ظاهری صدمه می زند. خوردگی فیلمانی مشکل عمده ای در صنایع بسته بندی مواد غذایی به شمار می رود. در ابتدا تصور می شد که این خوردگی منشأ بیولوژیکی دارد چراکه در ارتباط با صنایع غذایی اتفاق می افتد. اما مشاهده شد که وجود سموم^{۱۶} تأثیری بر این خوردگی ندارد. در نتیجه حضور عوامل بیولوژیکی، عامل این نوع خوردگی نیست.

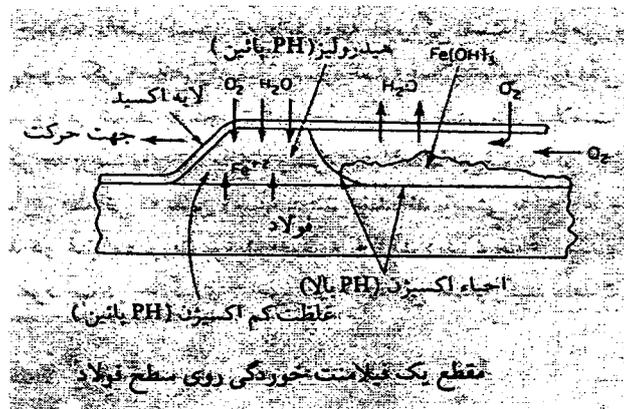
۱۵. Filiform or Underfilm Corrosion
۱۶. Toxin

- * رطوبت نقش بسیار مهمی در خوردگی فیلمانی دارد.
- تعریف رطوبت نسبی $RH\%$: نسبت غلظت رطوبت هوا به غلظت اشباع رطوبت هوا در یک دمای معین.
- تأثیر رطوبت نسبی بر خوردگی فیلمانی به شرح زیر است:
- الف) اگر رطوبت نسبی کمتر از ۶۰٪ باشد، خوردگی اتفاق نمی افتد.
- ب) اگر رطوبت نسبی بین ۶۰٪-۸۰٪ باشد، خوردگی بصورت رشته های نازک خواهد بود.
- ج) اگر رطوبت نسبی بین ۸۰٪-۹۰٪ باشد، خوردگی بصورت رشته های ضخیم خواهد بود.
- د) اگر رطوبت نسبی به بیش از ۹۰٪ برسد، خوردگی بصورت تاول ظاهر خواهد شد.

تأثیر رطوبت نسبی بر خوردگی فیلمانی فولاد آنتیلار

ظرف رطوبت نسبی	ظهور خوردگی
۶۰-۶۵	خطوط خوردگی
۶۵-۸۰	فیلامنتهای خیلی نازک
۸۰-۹۰	فیلامنتهای پهن خوردگی
۹۰-۹۵	فیلامنتهای خیلی پهن خوردگی
۹۵-۱۰۰	تاولهای سطحی، تاولهای پراکنده، تاولهای سطحی

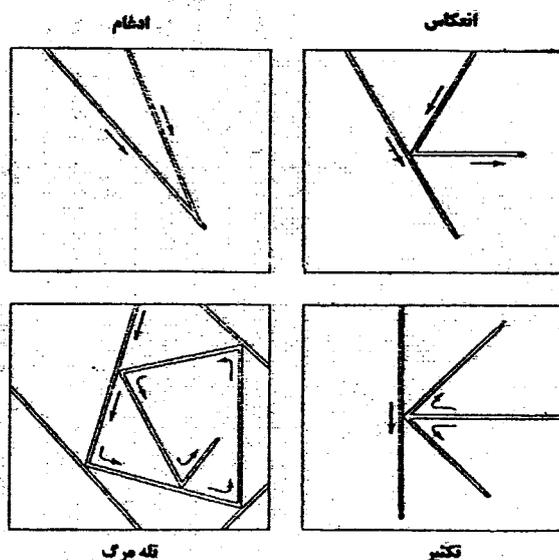
مکانیزم: هنگامی که بخشی از پوشش بلند شود، در فصل مشترک پوشش و قطعه، شکاف بوجود می آید و در نتیجه یک پیل اختلاف دمش ایجاد می شود و بدین ترتیب خوردگی اتفاق می افتد. سپس بنا بر خواص اسمزی، رشته به سمت رطوبت (به جلو) حرکت می کند.



ویژگی های یک فیلمانت خوردگی روی سطح فولاد را بررسی می کنیم:

این رشته از دو قسمت تشکیل یافته است:

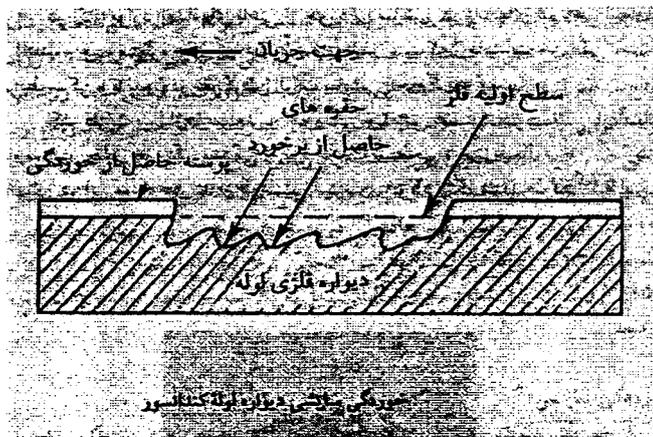
۱. نوک فعال که سبز رنگ و حاوی Fe^{2+} است.
 ۲. دنباله غیر فعال که به رنگ قهوه ای مایل به قرمز و حاوی Fe_3O_4 می باشد که در واقع همان محصولات خوردگی است.
- قطر رشته در حدود ۲ میلی متر است و با سرعت رشدی تقریباً برابر ۰/۴ میلی متر در روز از نوک فعال به جلو پیشروی می کند.
- نحوه حرکت رشته ها و تأثیرشان بر یکدیگر بسیار جالب است. رشته ها دنباله غیر فعال همدیگر را قطع نمی کنند و یک رشته پس از برخورد با دنباله غیر فعال رشته دیگر منعکس می شود که زاویه انعکاس معمولاً با زاویه برخورد برابر است. اگر رشته ای بصورت عمود به مانعی برخورد کند، تکثیر می شود. گاهی ممکن است دو رشته به یکدیگر بپیوندند و ادغام شوند. همچنین ممکن است رشته ای در "تله مرگ" به دام افتد.



راهکارهای جلوگیری از خوردگی فیلمانتی:

- کاهش رطوبت نسبی به کمتر از ۶۰٪
- استفاده از پوشش هایی با نفوذپذیری کم.
- استفاده از بازدارنده های خوردگی.

۲-۶- خوردگی سایشی^{۱۸}: نوعی خوردگی موضعی است که بر اثر حرکت نسبی سیال خورنده و قطعه بوجود می آید مانند خوردگی پروانه پمپ، پره توربین و پروانه کشتی که قطعه متحرک است و یا خوردگی سیستم های لوله کشی که سیال متحرک است.



خوردگی سایشی بدلیل شکل سطح خورده شده، به خوردگی پاشنه کفش نیز معروف است.

شاخصه خوردگی سایشی این است که حرکت [سیال یا قطعه] موجب تشدید خوردگی شود. در مواردی که حرکت باعث کاهش یا حتی توقف خوردگی شود، نمی توان آن را خوردگی سایشی به حساب آورد. به عنوان مثال هنگامی که فولاد زنگ نزن در تماس با اسید نیتریک (HNO_3) قرار می گیرد، در اثر واکنش های کاتدی، اسید نیتریک به اسید نیترو (HNO_2) تبدیل می شود که اسیدی بسیار خورنده است و موجب خوردگی فولاد می شود. حال اگر حرکت در محلول بوجود آید، اسید نیترو از سطح فولاد جدا گشته و در نتیجه خوردگی کاهش می یابد. بنابراین این مورد خوردگی سایشی محسوب نمی شود. البته استثنایی هم وجود دارد بدین صورت که اگر در خوردگی سایشی از مواد بازدارنده خوردگی استفاده شده باشد، حرکت محلول باعث می شود رسیدن بازدارنده ها به سطح قطعه آسان تر شده و در نتیجه سرعت خوردگی کمتر می شود.

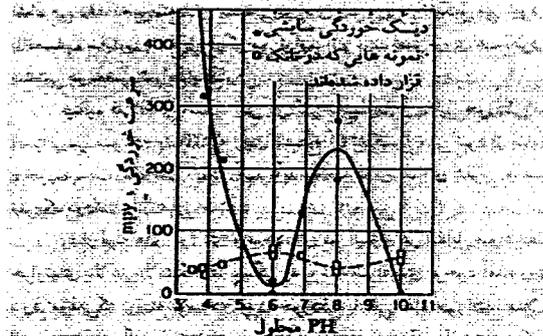
فاکتورهای مؤثر بر خوردگی سایشی:

۱. لایه های سطحی در خوردگی سایشی پارامتر کنترل کننده خوردگی محسوب می شوند. هرچه این لایه های سطحی سخت تر باشند، مقاومت به خوردگی سایشی بیشتر می شود. خصوصیات این لایه های سطحی متأثر از ترکیب شیمیایی فلز یا آلیاژ می باشد. برای مثال وقتی برنج و مس در محیط آب دریا (آب دریا را می توان با تقریب خوبی آب نمک ۳/۵٪ در نظر گرفت) قرار می گیرند، لایه ای که روی سطح مس تشکیل می شود، $CuCl_2$ است که نمی تواند سطح را در برابر خوردگی سایشی محافظت

۱۸. Erosion Corrosion

کند؛ در حالی که روی سطح برنج لایه CuO تشکیل می شود که چسبنده و متراکم است و حفاظت مناسبی در برابر خوردگی سایشی ایجاد می نماید.

۲. pH و نوع محلول نیز در خوردگی سایشی مؤثر است. به عنوان مثال سرعت خوردگی سایشی فولاد کربنی در آب در pH برابر ۶ و ۱۰ پایین است اما در pH برابر ۸ و pH های کمتر از ۶ بالاست.



اثر pH آب مقطر بر خوردگی سایشی فولاد کربنی در $50 \pm 0.5^\circ C$ (سرعت 3.9 mm/yr)

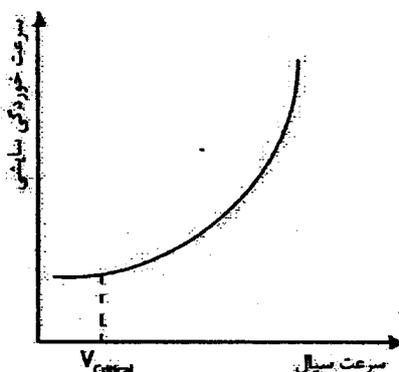
۳. افزایش سرعت حرکت سیال معمولاً باعث افزایش خوردگی سایشی می گردد. اثر سرعت سیال تا رسیدن به یک مقدار بحرانی کم است ولیکن به محض رسیدن به سرعت بحرانی شدیداً افزایش می یابد. تعریف سرعت بحرانی سیال V_{crit} حداقل سرعت سیال که در بیش از آن خوردگی سایشی اتفاق می افتد.

خوردگی ناشی از تندی به وسیله تپ دریا با سرعت های مختلف

در هر ساعت خوردگی (mm)			تپ	تولاد کربن
۱۵۴	۷۱	۳۳		
۱۷۰	-	۲۵	جلد	
۲۱۳	۲	۱	برنج سلیسیم	
۱۷۰	۲۰	۴	برنج آلومینوم	
۳۳۳	۱	۱	برنج منگنز	
۲۸۰	۲	۲	برنج G	
۲۱۲	-	۵	برنج آلومینوم (۱۰۰٪ آلومینوم)	
۱۰۵	-	۳	برنج آلومینوم	
۹۹	-	۵	۹۰ مس - ۱۰ نیکل (۸۰٪ مس)	
۱۹۹	-	۲	۷۰ مس - ۳۰ نیکل (۴۰٪ مس)	
۳۴	< ۱	< ۱	۷۰ مس - ۳۰ نیکل (۱۵٪ مس)	
۳	< ۱	< ۱	موتل	
< ۱	-	۱	فولاد کربنی درون سوراخ ۳/۱۶	
۳	-	۱	ماتریس C	
-	-	-	تپ	

- ۱- سیالی گرم بر دسی ستر مربع فولاد
 - ۲- حوضه وزی در منطقه جزر و مد
 - ۳- حوضه وزی در جزیره آن لوردا
 - ۴- متصل به دیسک فولاد حوضه وزی شده
- منبع: شرکت بین المللی نیکل (INCO)

سرعت بحرانی سیال می تواند به عنوان یک معیار ارزیابی خوردگی سایشی به شمار رود؛ به این ترتیب که هر چه V_{crit} بیشتر باشد، مقاومت به خوردگی سایشی بیشتر است.



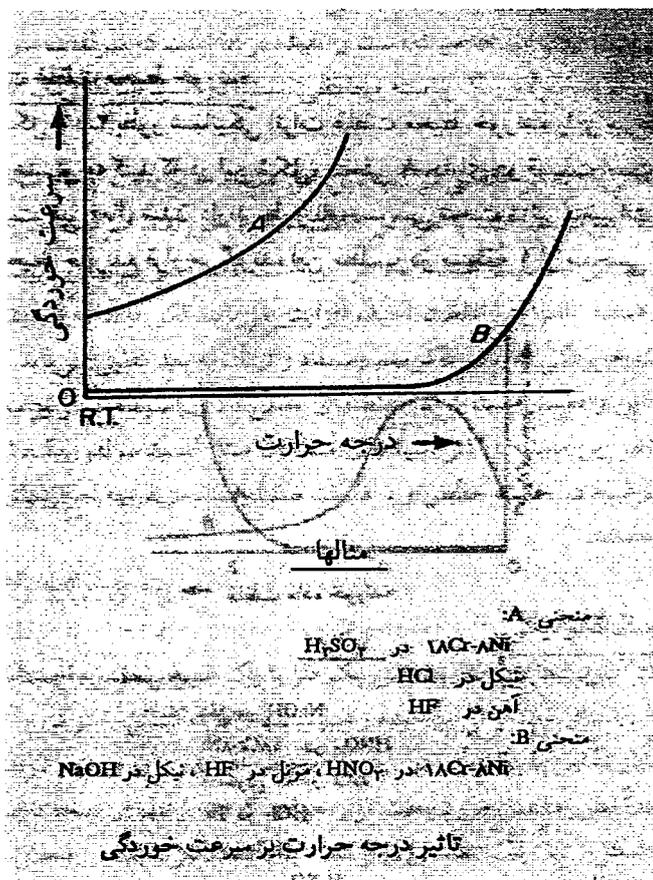
۴. برخورد [سیال با سطح فلز] موجب تشدید خوردگی سایشی می شود. منظور از برخورد این است که سیال پس از آن تغییر مسیر دهد. در زانویی ها و لوله های سه راهی (شکل T) بدلیل اثر برخورد، خوردگی زیاد است؛ زیرا سیال خورنده با شدت بیشتری به سطح برخورد می کند. این نوع خاص از خوردگی سایشی که اثر برخورد در آن نقش بسزایی دارد، خوردگی برخوردی یا تصادمی^{۱۹} نامیده می شود.

۵. اگر تلاطم یا توربولانس^{۲۰} بنا به دلایلی مانند اختلاف ناگهانی و تغییر سریع سطح مقطع، سرعت یا فشار زیاد سیال و وجود برآمدگی یا مانع در مسیر سیال بوجود آید، باعث تشدید خوردگی سایشی می شود؛ زیرا که توربولانس نسبت به جریان لامینار (جریان مستقیم و خطی) موجب تماس بیشتر سیال با سطح قطعه می گردد.

بدنبال تخریب سطحی در اثر سایش، تلاطم روی سطح بیشتر شده و نتیجتاً خوردگی سایشی بیشتر می شود. بنابراین می توان گفت تلاطم عامل افزایشنده ای در خوردگی سایشی می باشد. حجم سیال، سرعت سیال و طراحی سیستم (شکل هندسی) سه عاملی هستند که بر تلاطم یک سیال تأثیرگذار می باشند. انهدام لوله های کندانسورها و مبدل های حرارتی در اثر تلاطم ناشی از تغییر ناگهانی سطح مقطع لوله رخ می دهد که نوع خاصی از خوردگی سایشی است و اصطلاحاً خوردگی مدخل ورودی لوله^{۲۱} نامیده می شود.

۱۹. Impingement Corrosion
۲۰. Turbulance
۲۱. Inlet-Tube Corrosion

۶. دما در تمامی انواع خوردگی از جمله خوردگی سایشی با افزایش سرعت واکنش های شیمیایی، سبب افزایش سرعت خوردگی می شود.

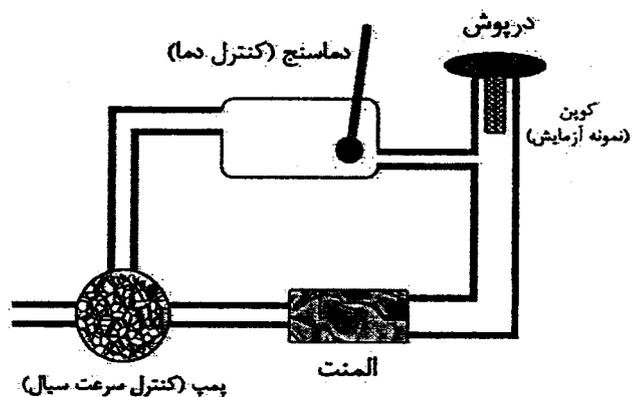


* خوردگی سایشی ناشی از تأثیر همزمان خوردگی (سیال خورنده) [عامل شیمیایی] و سایشی [عامل مکانیکی] می باشد.

* فلزاتی که سختی پایینی دارند یا به طریق مکانیکی به سهولت ساییده می شوند، همانند مس و سرب، بسیار مستعد به خوردگی سایشی هستند.

ارزیابی خوردگی سایشی:

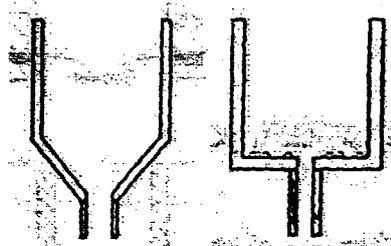
برای ارزیابی خوردگی سایشی از روشی به نام **تست حلقه^{۲۲}** که به صورت شماتیک در زیر نشان داده شده است، استفاده می کنند.



راهکارهای جلوگیری از خوردگی سایشی:

روش ها و راه حل های کنترل خوردگی سایشی اکثراً بر پایه طراحی سیستم و انتخاب مواد با مقاومت به خوردگی سایشی بهتر قرار دارد:

- اصلاح و بهبود طراحی سیستم.



- انتخاب مواد مهندسی مناسب برای خوردگی سایشی:

الف) برنج آلومینیم دار $Cu-29\%Zn-1\%Al$ و برنزهای آلومینیم

ب) کوپرونیکل حاوی آهن $Cu-Ni-1\%Fe$

ج) تیتانیم بدلیل لایه سطحی TiO_2 در محیط های آب دریا، محلول های حاوی کلرور و اسید نیتریک دودزا^{۲۳} مقاومت به خوردگی سایشی بالایی دارد.

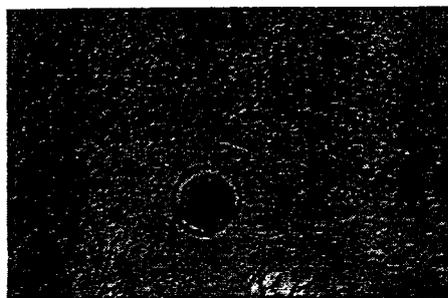
د) چدن پر سیلیسیم (حاوی ۱۴/۵٪ سیلیسیم)

و) فولادهای زنگ نزن دوبلکس (کلمه دوبلکس اشاره به دو فاز بودن زمینه فولاد دارد و منظور آلیاژهای خانواده ۶×× است).

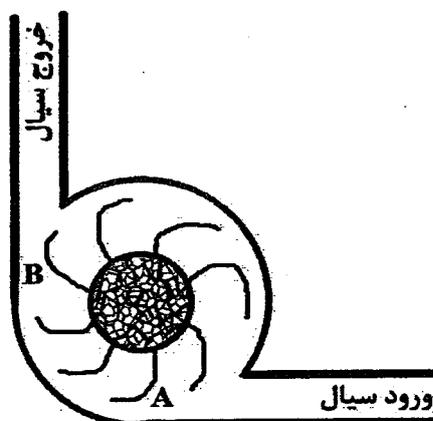
۲۲. Loop Test

۲۳. Fuming Nitric Acid

۲-۷- خوردگی حبابی یا حبابی شدن^{۲۴}: نوعی خوردگی موضعی است که در آن تغییر متناوب (نوسانات) فشار سیال موجب تشکیل مکرر حباب های بخار می شود که ترکیدن انفجاری آن ها باعث تخریب سطح قطعه می گردد. در توربین های هیدرولیکی، پره پمپ، پروانه کشتی و سطوح دیگری که در تماس با مایعات متحرکی هستند که جریان آشفته و متلاطم دارند، خوردگی حبابی شایع می باشد.

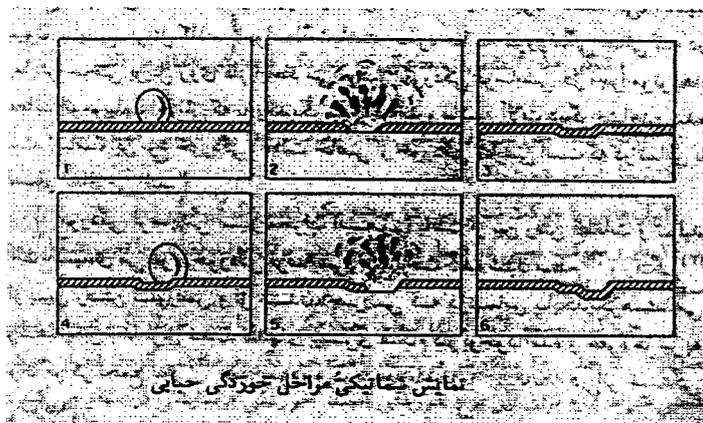


مکانیزم: قطعه مورد نظر را یک پره پمپ به صورت زیر در نظر می گیریم:



در ابتدای امر یک لایه اکسیدی روی پره های پمپ وجود دارد. در نقطه A در ناحیه پشت پره کاهش شدید فشار بوجود می آید که موجب تبخیر سیال و تشکیل حباب بخار می گردد. در نقطه B فشار به منظور خارج کردن سیال افزایش یافته و نتیجتاً حباب بخار می ترکد. نیروی حاصل از ترکیدن حباب ها بسیار زیاد است و موجب کنده شدن بخشی از لایه اکسیدی می شود. لذا سطح فاقد لایه اکسیدی در تماس با محیط خورنده قرار می گیرد و لایه اکسیدی جدیدی روی آن قسمت تشکیل می شود.

این روند مجدداً تکرار می شود با این تفاوت که حباب های بعدی در لبه کنده شده لایه سطحی تشکیل می شود؛ زیرا که جوانه زنی حباب در لبه ها آسان تر است.



* حبابی شدن ناشی از تأثیر همزمان خوردگی (سیال خورنده) [عامل شیمیایی] و شوک های مکانیکی (ترکیدن حباب های بخار) [عامل مکانیکی] است.

راهکارهای جلوگیری از حبابی شدن:

- استفاده از مواد نرم مانند چدن.
- استفاده از پوشش های نرم مانند لاستیک.
- هرچه سطوح صاف تر و صیقلی تر باشند، محل جوانه زنی حباب کمتر می شود.
- با طراحی مناسب می توان اختلاف فشار هیدرودینامیکی را به حداقل رساند.
- حباب های هیدروژن ایجاد شده بر اثر حفاظت کاتدی همانند بالشتک هوا شوک های مکانیکی را جذب می کند.

شباهت خوردگی حفره ای و حبابی شدن:

- ♦ ظاهر خسارات ناشی از حبابی شدن تا حدودی شبیه حفره دار شدن است. در خوردگی حبابی ظاهر سطح خورده شده اسفنجی و حفره دار به نظر می رسد.

تفاوت خوردگی حفره ای و حبابی شدن:

- ♦ حفره های حاصل از خوردگی حفره ای عمق بیشتری نسبت به قطر حفره دارند در حالی که در حبابی شدن برعکس می باشد.

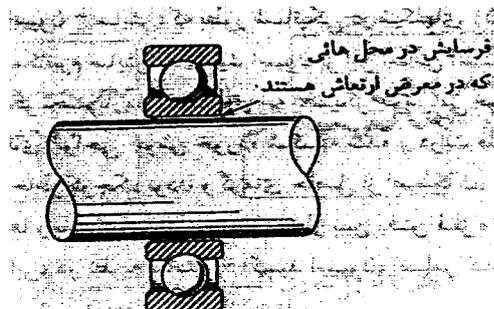
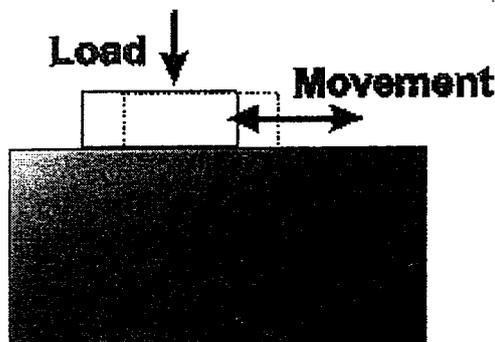
شباهت خوردگی سایشی و حبایی شدن:

♦ در هر دو، حرکت باعث بروز خوردگی می شود.

تفاوت خوردگی سایشی و حبایی شدن:

♦ در خوردگی سایشی هر چه ماده سخت تر باشد، مقاومت به خوردگی سایشی بیشتر می شود در حالیکه در خوردگی حبایی هر چه ماده نرم تر باشد، مقاومت به حبایی شدن بیشتر می شود. زیرا ماده نرم انعطاف پذیرتر است و قابلیت جذب شوک مکانیکی بیشتری دارد. بنابراین احتمال شکست لایه اکسیدی روی سطح کاهش می یابد.

۲-۸- خوردگی فرسایشی^{۲۵} یا خراشیدگی یا اصطکاک^{۲۶} و یا اکسیداسیون سایشی^{۲۷}: در اثر اصطکاک یا مالش مکرر دو سطح جامد- حداقل یکی از آن ها فلز باشد- که حرکت نسبی و نوسانی (رفت و برگشتی) در یک محیط خورنده دارند، بوجود می آید. شرط لازم برای وقوع خوردگی فرسایشی این است که دو سطح بر روی هم نیرو وارد کنند. بیشتر منظور از محیط خورنده، اتمسفر است.



خوردگی فرسایشی در قطعات اتومبیل، اجزای موتورها و قطعاتی که به هم پیچ شده اند، شایع تر است. به عنوان مثال بر اثر لرزش و ارتعاش ریل های راه آهن و چوب های ریل^{۲۸}، خصوصاً اگر پین ها یا بست ها سفت نباشند، خوردگی فرسایشی رخ می دهد. از آن جایی که سطح اثر خوردگی فرسایشی شبیه به نقطه اثر سختی سنجی برینل^{۲۹} است، خوردگی فرسایشی اصطلاحاً برینل کاذب نیز نامیده می شود.

۲۵. Fretting Corrosion

۲۶. Friction Corrosion

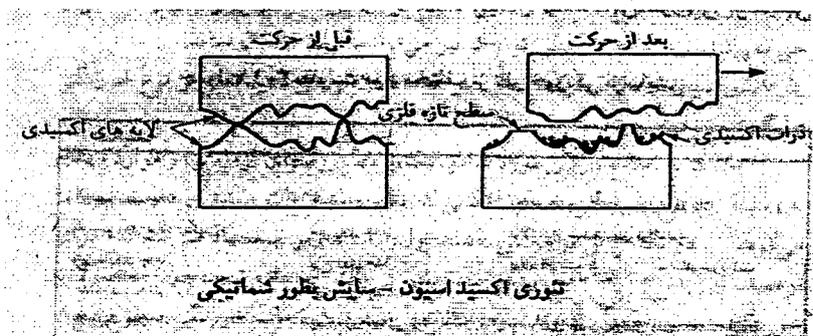
۲۷. Wear Oxidation

۲۸. Traverse

۲۹. Brinell

مکانیزم: دو مکانیزم برای خوردگی فرسایشی پیشنهاد شده است:

۱. اکسیداسیون- فرسایش: روی سطح فلز لایه ای اکسیدی وجود دارد. بر اثر حرکت دو سطح بر روی هم، لایه اکسیدی کنده شده و ذرات اکسیدی بین سطوح در تماس قرار می گیرند. این ذرات اکسیدی خود به عنوان عامل ساینده عمل می کنند.



۲. فرسایش- اکسیداسیون: روی سطح دسته ای از ناهمواری ها وجود دارد. بر اثر نیروی عمودی این برجستگی ها و فرورفتگی ها در هم وارد می شوند (جوش سرد^۳). سپس بدنبال حرکت دو سطح بر روی هم، جوش های سرد شکسته شده و بین سطوح در تماس قرار می گیرند. ذرات ایجاد شده بدلیل گرمای حاصل از اصطکاک به سرعت اکسید می شوند. این ذرات اکسیدی به تسریع فرسایش کمک می کنند.



- * پیامد هر دو مکانیزم فوق یکسان است: تولید و تجمع ذرات اکسیدی و تخریب سطوح فلزی. مطالعات اخیر نشان می دهد که در عمل هر دو مکانیزم اتفاق می افتد.

فاکتورهای مؤثر بر خوردگی فرسایشی:

۱- پارامترهای مکانیکی:

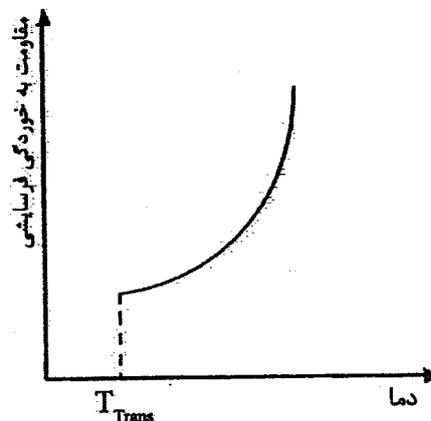
الف) فرکانس: هرچه فرکانس بیشتر باشد، خوردگی فرسایشی بیشتر می شود.

ب) نیروی عمود بر سطح: اگر فرکانس ثابت باشد با افزایش نیروی عمودی خوردگی فرسایشی بیشتر می شود. اما اگر فرکانس ثابت نباشد با افزایش نیروی عمودی، فرکانس کاهش یافته و در نتیجه نرخ فرسایش کمتر می شود.

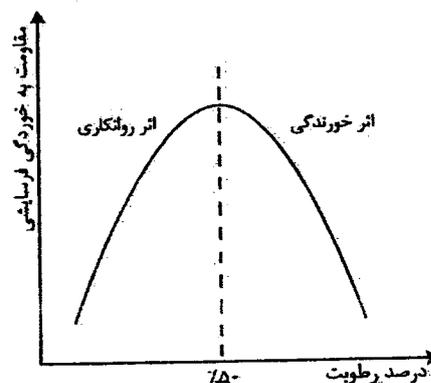
۲- پارامترهای محیطی:

الف) دما: افزایش دما موجب می گردد که خوردگی فرسایشی بیشتر شود.

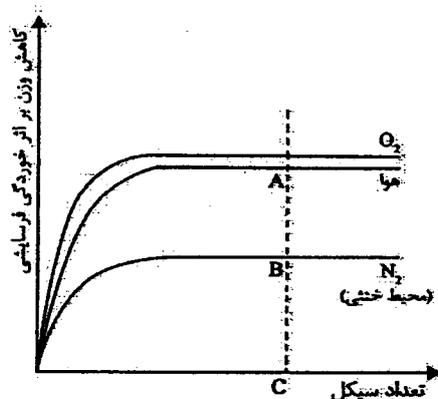
دمای انتقالی T_{Trans} : به دمایی گفته می شود که در دماهای بالاتر از آن مقاومت به خوردگی فرسایشی بیشتر می گردد.



ب) رطوبت: رطوبت دو رفتار متضاد از خود نشان می دهد. یکی اثر روانکاری است که با کاهش اصطکاک، خوردگی فرسایشی را کاهش می دهد و دیگری اثر خوردگی است که موجب افزایش خوردگی فرسایشی می شود. معمولاً در رطوبت های کمتر از ۵۰٪ اثر روانکاری غالب است و در رطوبت های بیشتر از ۵۰٪ اثر خوردگی غالب است.



ج) اتمسفر: خوردگی فرسایشی را در سه محیط O_2 و N_2 و هوا بررسی می کنیم: از روی نمودار قابل مشاهده است که منحنی های O_2 و هوا تقریباً بر هم منطبق هستند و بنابراین می توان نتیجه گرفت که همان میزان اکسیژن موجود در هوا (حدوداً ۲۰٪) برای وقوع خوردگی فرسایشی کافی است.



$$\text{نقش عامل خوردگی در خوردگی فرسایشی} = \frac{AB}{AC} \times 100$$

$$\text{نقش عامل مکانیکی در خوردگی فرسایشی} = \frac{BC}{AC} \times 100$$

خوردگی فرسایشی ناشی از تأثیر همزمان خوردگی (محیط خورنده: اتمسفر) [عامل شیمیایی] و فرسایش [عامل مکانیکی] می باشد.

۳- پارامترهای متالورژیکی:

الف) سختی: هرچه سختی قطعه بیشتر باشد، خوردگی فرسایشی کمتر می شود.
ب) پرداخت سطحی: هرچه سطح بهتر پرداخت شده باشد (یعنی صاف تر و صیقلی تر باشد)، نرخ خوردگی فرسایشی کاهش می یابد.

راهکارهای جلوگیری از خوردگی فرسایشی:

- استفاده از مواد با سختی بالا. ساچمه زنی^{۳۱} یا کار سرد نیز با افزایش سختی سطحی، مقاومت به خوردگی فرسایشی را افزایش می دهد.
- استفاده از مواد یا وسایل جاذب ارتعاش از جمله واشر فنری.
- استفاده از مواد روان ساز^{۳۲} مانند روغن و گریس. روان سازها از طریق کاهش اصطکاک، جدا ساختن سطح فلز از محیط خورنده و خارج کردن ذرات اکسیدی ساییده از سطوح در تماس، باعث کاهش خوردگی فرسایشی می شوند.

۳۱. Shot-peening

۳۲. Lubricants

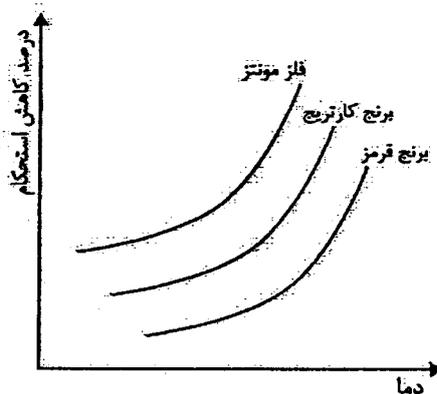
- افزایش نیروی عمودی به منظور جلوگیری از حرکت سطوح در تماس بر روی هم [کاهش فرکانس].
- افزایش زبری سطح (درگیری مکانیکی). اصطکاک را آنقدر بالا می‌بریم که دو سطح نتوانند بر روی هم حرکت داشته باشند [کاهش فرکانس].

۲-۹- خوردگی انتخابی^{۳۳} و یا زدایش آلیاژی^{۳۴} و یا جدایش^{۳۵}: این نوع خوردگی در آلیاژها اتفاق می‌افتد و عبارتست از خارج شدن ترجیحی یکی از عناصر آلیاژی از آلیاژ جامد طی فرآیند خوردگی. زدایش آلیاژی ممکن است در آلیاژهای تک فاز و یا همچنین در آلیاژهای دو فاز رخ دهد (آلیاژهای دو فاز مستعدتر می‌باشند)؛ ولیکن در هر صورت معمولاً عنصر یا فاز فعال تر حل شده و از آلیاژ خارج می‌گردد و لذا باقیمانده ای متخلخل از عنصر یا فاز نجیب تر بجا می‌ماند. سطح خورده شده متخلخل است و کاهش ضخامت قابل ملاحظه ای به چشم نمی‌خورد. تخریب به صورت افت استحکام و خواص مکانیکی است؛ بنابراین معیار ارزیابی خوردگی انتخابی کاهش استحکام می‌باشد. هرچه دما بیشتر شود، سرعت خوردگی انتخابی افزایش می‌یابد. متداول ترین انواع خوردگی انتخابی عبارتند از زدایش روی و گرافیته شدن.

۲-۹-۱- زدایش روی^{۳۶}: نوع خاصی از خوردگی انتخابی است بدین گونه که روی (Zn) از آلیاژ برنج خارج می‌گردد. زدایش روی با چشم غیر مسلح به سهولت قابل تشخیص است. مس فلزی تقریباً قرمز رنگ است و برنج بسته به میزان روی موجود در آن، آلیاژی متمایل به زرد یا طلایی می‌باشد (هرچه درصد روی بیشتر باشد، برنج زردتر به نظر می‌رسد). اما پس از زدایش روی، رنگ برنج دوباره به قرمز می‌گراید. زدایش روی بیشتر در محلول‌های آبی حاوی کلرور مانند آب دریا و آب‌های شور و یا در آب شیرین حاوی CO₂ اتفاق می‌افتد. شرایط ساکن برای زدایش روی بسیار مناسب تر است. معمولاً شیرفلکه‌ها و لوله‌های برنجی بیشتر در معرض زدایش روی قرار دارند.

۳۳. Selective Corrosion
 ۳۴. Dealloying
 ۳۵. Parting
 ۳۶. Dezincification

هرچه درصد Zn در برنج بیشتر باشد، میزان تخریب بیشتر می شود.



زدایش روی بر دو نوع است:

- موضعی^{۲۷}: اگر میزان روی برنج کم و محیط نزدیک به خنثی باشد.
- لایه ای^{۲۸} و یا یکنواخت^{۲۹}: اگر میزان روی برنج زیاد و محیط اسیدی باشد.



* اگر لوله ای برنجی شدیداً دچار زدایش روی به صورت موضعی شود، از آن جایی که نواحی دچار خوردگی استحکام کمی دارند، ممکن است در اثر فشار زیاد آب در آن نواحی سوراخ ایجاد شود که موجب نشت آب و یا انهدام لوله گردد.

راهکارهای جلوگیری از زدایش روی:

- تغییر شرایط محیطی:
 - الف) کاهش $[Cl^-]$ به کمتر از $500 ppm$
 - ب) حذف اکسیژن
 - ج) حذف CO_2
 - د) حذف سکون

۲۷.Plug
۲۸.Layer
۲۹.Uniform

• انتخاب مواد:

الف) استفاده از برنج قرمز ($Cu-15\%Zn$) که تقریباً نسبت به زدایش روی مصونیت دارد (بدلیل مقدار کمتر روی موجود در آن).

ب) استفاده از کوپرونیکل ها (۱۰ تا ۳۰ درصد نیکل) که البته به دلیل قیمت گران این آلیاژ تنها برای قطعاتی که از اهمیت بالایی برخوردارند، به کار گرفته می شود.

• اصلاح آلیاژ برنج:

افزودن مقدار کمی آرسنیک (As)، آنتی موان (Sb) یا فسفر (P) به عنوان ممانعت کننده به برنج آدمیرالتی (برنج فشنگ حاوی یک درصد قلع) مقاومت به زدایش روی را افزایش می دهد که از این میان آرسنیک اثر بهتری دارد. آرسنیک را می توان به برنج آلومینیم دار نیز اضافه کرد.

۲-۹-۲- گرافیت شدن^{۴۰} و یا خوردگی گرافیتی^{۴۱}: نوع خاصی از خوردگی انتخابی است که در چدن های گرافیتی رخ می دهد.

* یادآوری: انواع چدن غیر آلیاژی را می توان با توجه به توزیع کربن در ریزساختار آن ها به چهار نوع دسته بندی کرد:

▪ چدن سفید: کربن آزاد ندارد.

▪ چدن خاکستری: گرافیت ورقه ای (بولکی شکل) دارد.

▪ چدن نشکن (چدن داکتیل): گرافیت کروی دارد.

▪ چدن چکش خوار (چدن مالیبل): گرافیت برفکی دارد.

گرافیت شدن در چدن های خاکستری رخ می دهد زیرا که شبکه پیوسته ای از گرافیت دارند.

مکانیزم گرافیت شدن: گرافیت بسیار نجیب^{۴۲} و آهن فلزی فعال^{۴۳} می باشد. بنابراین گرافیت سطحی کاتدی برای خوردگی آهن ایجاد می کند (یک پیل گالوانیکی ایجاد می شود) و آهن تدریجاً خورده می شود و توده ای متخلخل از گرافیت و محصولات خوردگی بجا می ماند.

* به عنوان یادآوری از آن جایی که گرافیت و محصولات خوردگی بر روی سطح باقی می ماند، کاهش ضخامت در اثر وقوع این خوردگی مشاهده نمی شود ولیکن مقاومت مکانیکی (استحکام) به شدت کاهش می یابد.

* گرافیت شدن در محیط خاک های حاوی یون سولفات، یون کلرید، باکتری SRB و آب های حاوی Cl^- اتفاق می افتد.

* گرافیت شدن فرآیندی کند است.

۴۰. Graphitization

۴۱. Graphitic Corrosion

۴۲. Noble

۴۳. Active

راهکارهای جلوگیری از گرافیته شدن:

- افزودن ۲ تا ۳ درصد نیکل به چدن خاکستری.

۲-۹-۳- خوردگی انتخابی سایر سیستم های آلیاژی: به طور کلی معمولاً خوردگی انتخابی را بر اساس عنصری که از آلیاژ خارج می گردد، نام گذاری می کنند؛ همانند خوردگی انتخابی برنج که چون Zn از آلیاژ خارج می شود، به زدایش روی معروف است.

- خارج شدن Al از برنز آلومینیم (Cu-Al)، زدایش آلومینیم نامیده می شود که در محیط اسید فلئوریدریک اتفاق می افتد. اگر محلول دارای مقداری یون کلرید باشد، زدایش شدیدتر خواهد شد. زدایش آلومینیم خیلی کندتر از زدایش روی است.
 - خارج شدن Si از برنز سیلیسیم (Cu-Si)، زدایش سیلیسیم نام دارد.
 - خارج شدن Mn از برنز منگنز (Cu-Mn) به زدایش منگنز شهرت دارد.
 - خارج شدن نیکل از آلیاژ Cu-Ni به نام زدایش نیکل معروف است.
 - خارج شدن مس از آلیاژ Cu-Ag، زدایش مس^{۲۴} نامیده می شود.
 - خارج شدن نقره از آلیاژ Ag-Au و کبالت از آلیاژ Co-W-Cr نیز مشاهده شده است.
- باید متذکر شویم که برخلاف زدایش روی و گرافیته شدن که بسیار متداول هستند، خوردگی انتخابی سایر سیستم های آلیاژی نادر است.

مکانیزم: دو مکانیزم برای خوردگی انتخابی پیشنهاد شده است:

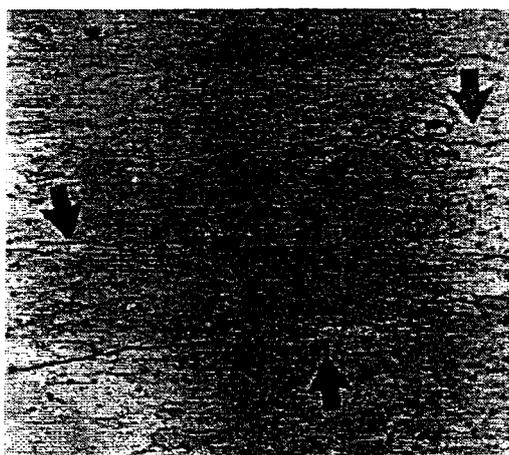
۱. اتم های عنصر فعال تر در سطح آلیاژ حل می شوند و متعاقب این انحلال جاهای خالی در شبکه آلیاژ بوجود می آید و سایر اتم های عنصر فعال تر با نفوذ به جاهای خالی خود را به سطح می رسانند و از آن جا حل می شوند که در نتیجه توده ای متخلخل در سطح آلیاژ بجا می ماند. از آنجایی که نفوذ (دیفوزیون) از طریق شبکه ای مشتمل بر جاهای خالی مشکل بوده و نیاز به زمان زیادی دارد، زدایش آلیاژی از طریق این مکانیزم تا عمق های زیاد غیرممکن یا بسیار بسیار آهسته خواهد بود.

۲. آلیاژ به صورت سطحی حل می شود اما یون های عنصر نجیب تر از آنجایی که پتانسیل احیای بزرگتری دارد، رسوب می کنند در حالی که یون های عنصر فعال تر در محلول باقی می ماند. ولیکن این رسوب برفکی و متخلخل است که تخلخل رسوبات باعث تسهیل تماس محلول با آلیاژ می گردد.

این مکانیزم سینتیک جدایش را بهتر توجیه می کند (از نظر زمان قابل قبول تر است) و همچنین با شرط ساکن بودن نیز سازگار است زیرا تنها در صورت سکون امکان تشکیل رسوب وجود دارد.

۲-۱۰- خوردگی مرزدانه ای یا بین دانه ای^{۴۵} (IGC): همان طور که از نام این خوردگی بر می آید، نواحی مرزدانه و اطراف مرزدانه مستعد این نوع خوردگی هستند. مرزدانه ها نسبت به خود دانه ها از سطح انرژی بالاتری برخوردار بوده و بنابراین از نظر شیمیایی فعال تر می باشند و لذا نسبت به خوردگی مستعدترند.

خوردگی موضعی متمرکز در مرزدانه ها و یا نواحی اطراف مرزدانه را در حالی که خود دانه ها یا اصلاً خورده نشده اند یا کم خورده شده اند، خوردگی مرزدانه ای می گویند. در این حالت آلیاژ پودر می شود (دانه ها یا کریستال ها از هم جدا می شوند) یا استحکام خود را از دست می دهد.



خوردگی بین دانه ای بدلیل ناخالصی های موجود در مرزدانه ها و یا غنی یا فقیر شدن مرزدانه ها از یک عنصر آلیاژی رخ می دهد.

عوامل مؤثر بر خوردگی مرزدانه ای:

۱. جدایش^{۴۶}: درحین انجماد غیر تعادلی، غلظت یکی از عناصر آلیاژی در اطراف مرزدانه ها افزایش پیدا می کند. این پدیده به جدایش موسوم است.
۲. ناخالصی ها^{۴۷}: برای مثال مقادیر جزئی Fe که ناخالصی برای آلیاژهای Al محسوب می شود، با تشکیل ترکیب بین فلزی $FeAl_3$ در مرزدانه ها موجب بروز خوردگی بین دانه ای می شود.
۳. عملیات حرارتی^{۴۸}: عملیات حرارتی باعث حساس شدن فولادهای زنگ نزن می شود.
۴. کار سرد^{۴۹}: برای مثال در آلیاژهای برنج با انجام کار سرد، Zn به مرزدانه ها نفوذ کرده و غلظت آن در اطراف مرزدانه ها بیشتر می شود.

۴۵. Intergranular Corrosion

۴۶. Segregation

۴۷. Inclusions

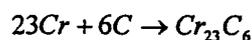
۴۸. Heat Treatment

۴۹. Cold-Work

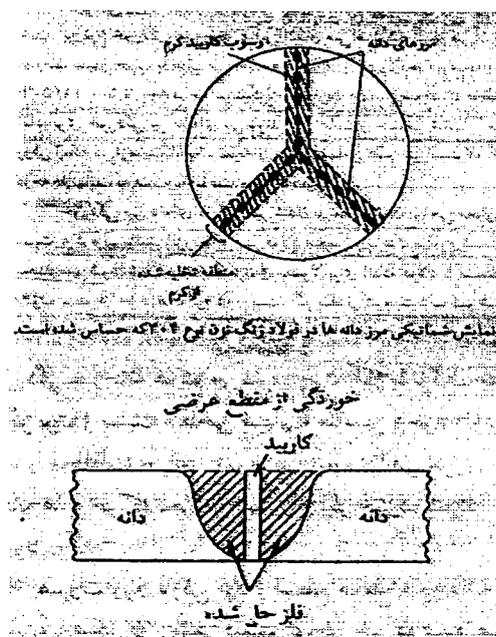
همچنین در آلیاژهای $Al-Mg$ پس از کار سرد رسوبات پیوسته Mg_2Al_3 در مرزدانه ها تشکیل می شود.

۲-۱۰-۱- خوردگی تورقی^{۵۰}: نوع خاصی از خوردگی مرزدانه ای است که در آلیاژهای Al که شدیداً کار سرد شده اند و دانه های آن جهت دار شده اند، رخ می دهد. در این حالت آلیاژ به صورت ورق ورق و پوسته پوسته می شود.

۲-۱۰-۲- پدیده حساس شدن^{۵۱} فولادهای زنگ نزن: حساس شدن یعنی مستعد و آماده برای خوردگی بین دانه ای شدن. فولادهای زنگ نزن آستنیتی به حساس شدن مستعدتر می باشند. اگر فولاد زنگ نزن به مدت طولانی (۳۰ ثانیه تا یک دقیقه) در محدوده دمایی ۵۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد قرار بگیرد، پدیده حساس شدن اتفاق می افتد. در این محدوده دمایی کاربید کروم پایدار است.



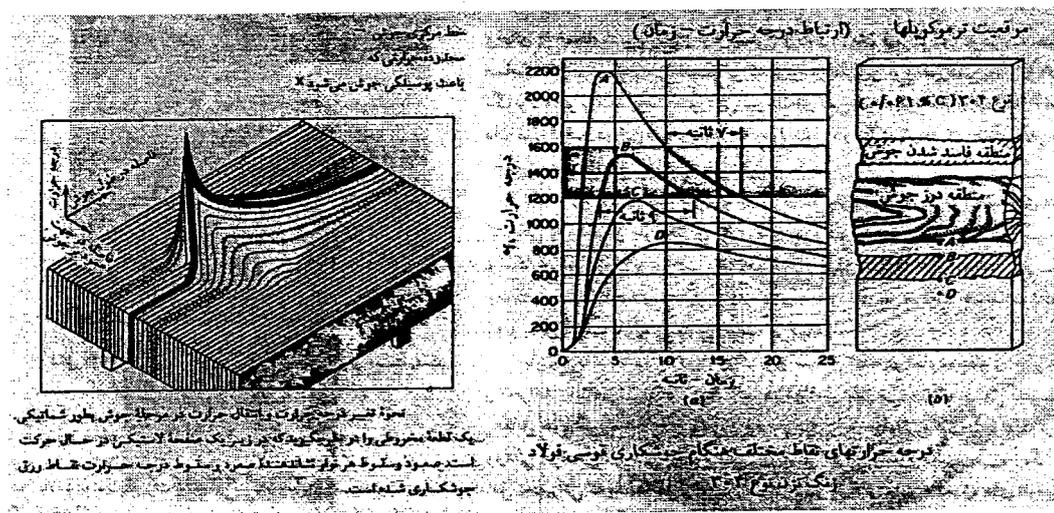
تشکیل کاربید کروم تابع فرآیند نفوذ است و در این محدوده دمایی نفوذ در مرزدانه ها غالب است. بنابراین کاربید کروم به عنوان فاز پیوسته در مرزدانه ها تشکیل می شود و نواحی اطراف مرزدانه ها از کروم فقیر یا تخلیه می شود. از آنجایی که خاصیت زنگ نزن بودن این فولادها بدلیل حضور کروم می باشد، با فقیر شدن نواحی مجاور مرزدانه ها از کروم، مقاومت به خوردگی این نواحی به شدت افت می کند و در یک محیط خورنده دچار خوردگی خواهد شد.



- ۵۰. Exfoliation Corrosion
- ۵۱. Sensitization

۲-۱۰-۳- فساد جوش^{۵۲}: حالت خاصی از خوردگی مرزدانه ای می باشد که در فولادهای زنگ نزن در اثر پدیده حساس شدن در سیستم های جوشکاری شده مشاهده می شود.

اگر ترموکوپل هایی در نقاط A ، B ، C و D قرار دهیم، نحوه تغییر دمای این نقاط بر حسب زمان درحین جوشکاری این قطعه فولاد زنگ نزن بدست می آید. مشاهده می شود که فولاد در نقطه C به مدت طولانی در محدوده دمایی حساس شدن قرار می گیرد. بنابراین نوار باریکی به موازات خط جوش وجود دارد که خوردگی مرزدانه ای در آن ایجاد خواهد شد.

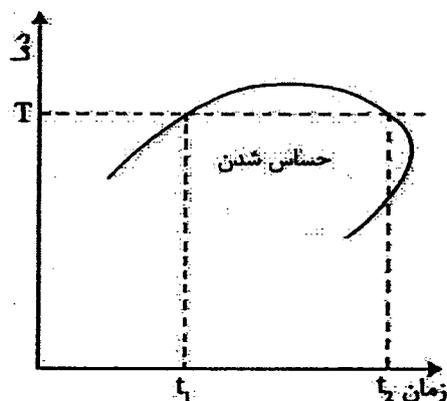


راهکارهای جلوگیری از حساس شدن فولادهای زنگ نزن:

○ روش های درمان:

الف) کاربید های کروم تشکیل شده در مرزدانه ها را حل کنیم. بدین منظور فولاد را تا دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد حرارت می دهیم. در این دما کاربید ها حل می شوند سپس در محدوده دمایی ۵۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد فولاد را سریع سرد می کنیم تا فرصت تشکیل مجدد کاربید کروم وجود نداشته باشد.

ب) غلظت کروم را در نواحی فقیر از کروم مجدداً افزایش دهیم. بدین منظور فولاد را به مدت طولانی تری در محدوده دمایی حساس شدن قرار می دهیم تا کروم سایر مناطق به نواحی فقیر از کروم نفوذ کند.



○ روش های پیشگیری:

الف) کاهش درصد کربن موجود در فولاد زنگ نزن تا کاربید کروم کمتری در مرزدانه ها رسوب کند. بدین منظور می توان بجای فولاد زنگ نزن ۳۰۴ از فولادهای زنگ نزن ۳۰۴L و ۳۰۴EL استفاده نمود که البته قیمت این فولاد های کربن زدایی شده بسیار زیاد است.

ب) استفاده از فولادهای زنگ نزن پایدارسازی شده. با افزودن عناصر کاربیدزای قوی همانند Ti (فولاد ۳۲۱) و یا Nb (فولاد ۳۴۷)، کربن جذب این عناصر شده و دیگر با کروم وارد واکنش نمی شود.

کاربید تیتانیم و کاربید نئوبیم دمای تشکیل بالایی (در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد) دارند و در مرزدانه ها نیز تشکیل نمی شوند؛ زیرا در دمای بالا نفوذ در خود دانه ها انجام می گیرد.

۲-۱۰-۴- خوردگی شیار چاقو^{۵۳}: تحت برخی شرایط فولادهای زنگ نزن پایدارسازی شده به صورت بین دانه ای خورده می شوند. این حالت هنگامی رخ می دهد که Ti یا Nb نتوانسته اند با کربن ترکیب شده و کاربید کروم تشکیل شده باشد.

در دماهای بالاتر از ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد کاربیدهای تیتانیم و نئوبیم حل می شوند. اگر فولاد پایدارسازی شده از دماهای بالا در محدوده دمایی ۸۰۰-۱۲۰۰ درجه سانتی گراد سریعاً سرد شود، فرصت تشکیل مجدد کاربیدهای Ti یا Nb وجود نخواهد داشت. سپس اگر به مدت طولانی در محدوده دمایی ۵۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد قرار بگیرد، کاربید کروم تشکیل شده و فولاد حساس خواهد شد؛ گویی فولاد زنگ نزن معمولی است.

^{۵۳}.Knife-Line Attack

درجه حرارت ذوب	
کاربنیل کلورید حل می شود	۲۰
کاربنیل کربن حل می شود	۲۳۰
کاربنیل کلوریدم واسط می شود	۱۲۳۰
کاربنیل کربن حل می شود	۱۲۵۰
کاربنیل کربن واسط می شود	۷۹۰
واکنش انجام نمی گیرد	۹۵۰
	۵۱۰
	۷۰
	۲۸۰

دیاگرام شتابی برای نشان دادن عملیات حل شدن و واسط شدن در فولادهای زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۰۴L و ۳۰۴V

شباهت خوردگی شیار چاقو و فساد جوش:

- ◆ هر دو در نواری به موازات خط جوش اتفاق می افتد.
- ◆ هر دو در اثر خوردگی بین دانه ای ناشی از حساس شدن در سیستم های جوشکاری شده رخ می دهد.

تفاوت خوردگی شیار چاقو با فساد جوش:

- ◆ خوردگی شیار چاقو در فولادهای زنگ نزن پایدارسازی شده اتفاق می افتد در حالیکه فساد جوش در فولادهای زنگ نزن معمولی رخ می دهد.
- ◆ خوردگی شیار چاقو در مقایسه با فساد جوش در نوار باریک تر و نزدیک تری به خط جوش رخ می دهد.
- ◆ تاریخچه حرارتی فلز در خوردگی شیار چاقو با فساد جوش متفاوت است.

* برای ارزیابی فولادهای زنگ نزن نسبت به پدیده حساس شدن سه آزمایش وجود دارد:

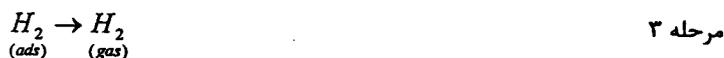
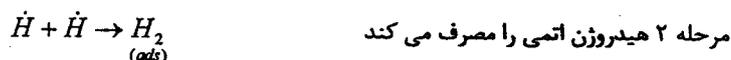
- هیوئی
- استرایچر (استرایچر نیز تلفظ می شود)
- اسید نیتریک جوشان غلیظ

۲-۱۱- خسارات هیدروژنی^{۵۴}: هر خسارت یا مشکلی را که در اثر نفوذ هیدروژن اتمی به داخل فلز پدید آید، خسارت هیدروژنی می گویند.

منشأ تولید هیدروژن اتمی:

۱. واکنش های کاتدی خوردگی:

واکنش تصاعد هیدروژن ($H^+ + e^- \rightarrow \frac{1}{2}H_2$) از سه مرحله زیر تشکیل شده است:



در صورتی که سرعت مرحله ۲ کند شود، غلظت هیدروژن اتمی افزایش می یابد. یون هایی مانند Sb^{2+} ، As^+ ، S^{2-} باعث کند شدن سرعت مرحله ۲ می شوند. به این یون ها اصطلاحاً سموم هیدروژنی^{۵۵} گفته می شود.

۲. آبکاری فلزات:

در آبکاری فلزات بر روی سطح کاتد علاوه بر واکنش احیای یون فلزی، واکنش ناخواسته تصاعد هیدروژن نیز رخ می دهد که می تواند منشأ تولید هیدروژن اتمی باشد.

۳. جوشکاری فلزات:

الکتروود جوشکاری از دو قسمت مغزه فلزی و روکش معمولاً از جنس ترکیبات سلولزی تشکیل شده است. در اثر گرمای حاصل از جوشکاری، سلولز تجزیه شده و ۴۰۰ برابر حجم خود هیدروژن تولید می کند که می تواند منشأ تولید هیدروژن اتمی باشد. دلیل استفاده از سلولز این است که گاز هیدروژن یک اتمسفر احیایی روی مذاب ایجاد می کند تا نگذارد مذاب اکسید شود.

انواع خسارات هیدروژنی:

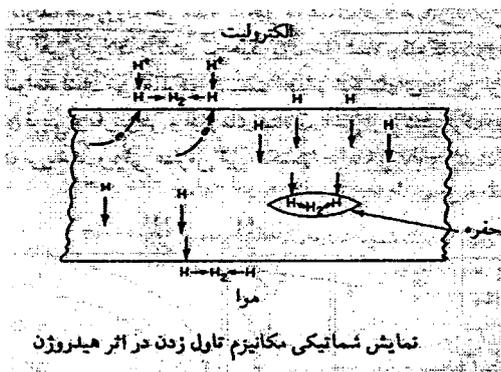
- تردی هیدروژنی
- تاول زدن هیدروژنی

۵۴. Hydrogen Damage

۵۵. Hydrogen Poisons

۲-۱۱-۱- تردی هیدروژنی^{۵۶}: تیتانیم و آلیاژهایش، زیرکونیم و آلیاژهایش و فولادهای پر استحکام و کم آلیاژی که سختی بیش از ۳۵۰ ویکرز دارند به تردی هیدروژنی مستعدترند. در Zr و Ti و آلیاژهایشان با نفوذ هیدروژن اتمی به داخل فلز، در مرز دانه ها هیدرید فلزی تشکیل می شود که موجب تردی فلز می گردد. این مکانیزم هم آنالیز شده و هم زیر میکروسکوپ دیده شده است. اما در مورد فولادها مکانیزم صحیح و دقیق، هنوز معلوم نیست. مکانیزم احتمالی به این صورت است که هیدروژن اتمی پس از نفوذ به داخل شبکه فلز در اتمسفر نابجایی ها قرار می گیرد و باعث قفل شدن نابجایی ها می شود. تردی هیدروژنی، مخصوصاً در فولادها، پدیده ای برگشت پذیر است. با حرارت دادن در محدوده دمایی ۲۰۰-۳۰۰ درجه فارنهایت به مدت چند ساعت، هیدروژن اتمی از شبکه فلزی خارج شده و باعث رفع تردی هیدروژنی می شود. این فرآیند به پختن^{۵۷} معروف است.

۲-۱۱-۲- تاول زدن هیدروژنی^{۵۸}: هنگامی که هیدروژن اتمی شروع به نفوذ در یک قطعه فلزی دارای حفره گازی می کند، اگر به حفره ای گازی برسد، با ترکیب هیدروژن های اتمی و تشکیل هیدروژن مولکولی، از آنجایی که هیدروژن مولکولی توانایی حرکت در شبکه فلزی را ندارد، حتی مقادیر کم گاز هیدروژن فشار زیادی در داخل حفره ایجاد می نماید. این فشار ممکن است به حدی باشد که باعث تغییر شکل^{۵۹} قطعه شود.



در اثر تاول زدن هیدروژنی قطعه فلزی بمانند کاغذ پاره می شود. برخلاف تردی هیدروژنی، تاول زدن هیدروژنی برگشت پذیر نیست. فولادهای جوشان^{۶۰} که دارای نقص متداول حفرات گازی هستند به تاول زدن هیدروژنی مستعدتر می باشند.

- ۵۶. Hydrogen Embrittlement
- ۵۷. Baking
- ۵۸. Hydrogen Blistering
- ۵۹. Deformation
- ۶۰. Rimmed Steels

راهکارهای جلوگیری از خسارات هیدروژنی:

- جلوگیری از منشأ تولید هیدروژن اتمی [تردی و تاول زدن هیدروژنی]:
- الف) استفاده از فلزاتی با سرعت خوردگی کم؛ به این ترتیب سرعت واکنش کاتدی کم شده و نتیجتاً هیدروژن اتمی کمتری تولید می شود.
- ب) حذف سموم هیدروژنی.
- ج) استفاده از الکترودهای جوشکاری با روکش قلیایی یا روتیل.
- انتخاب مواد [تردی و تاول زدن هیدروژنی]:
- الف) استفاده از فلزات با ساختار بلوری متراکم مانند *fcc* یا *bcc*؛ مثل استفاده از فولادهای آستنیتی یا مارتنزیتی. فولادهای مارتنزیتی که دارای ساختار بلوری *bcc* هستند، اصلاً مشکل تاول زدن ندارند.
- ب) استفاده از فولادهای نیکل دار.
- ج) استفاده از نیکل و آلیاژهایش.
- استفاده از پوشش های آلی یا معدنی [تردی و تاول زدن هیدروژنی]
- فرآیند پختن [تردی هیدروژنی]
- استفاده از فولادهای تمیز یا کشته^{۶۱}. اگر به مذاب فولاد پیش از ریخته گری مقادیر کمی از *Al* یا *Si* اضافه کنیم، با اکسیژن ترکیب شده و Al_2O_3 یا SiO_2 تشکیل می شود که خود به عنوان جوانه زا عمل می کند. [تاول زدن هیدروژنی]

۲-۱۲- خوردگی اتمسفری^{۶۲}: هر نوع خوردگی را که در محیط اتمسفر رخ می دهد، خوردگی اتمسفری می گویند. ۵۰٪ هزینه های ناشی از خوردگی مربوط به خوردگی اتمسفری است و این هزینه معمولاً صرف ایجاد پوشش می شود.

اتمسفرها را بسته به نوع آلاینده های موجود در آن به چهار دسته تقسیم بندی می کنند:

۱. اتمسفر شهری^{۶۳}: به علت احتراق سوخت های فسیلی غلظت آلاینده های CO_x ، NO_x ، SO_2 ، زیاد است. غلظت گاز SO_2 در اتمسفر شهری در حدود 80 mg/m^3 است. این گاز در صورت ترکیب با رطوبت، باران اسیدی (اسید سولفوریک H_2SO_4) تولید می کند.
۲. اتمسفر صنعتی^{۶۴}: مهمترین آلاینده در اتمسفر صنعتی گاز SO_2 حاصل از سوخت های فسیلی با غلظتی در حدود 200 mg/m^3 است. غلظت آلاینده ها در اتمسفر صنعتی بستگی به ارتفاع دودکش دارد. اگر دودکش بلند باشد، آلاینده ها در مناطق دورتر و به صورت یکنواخت توزیع می

۶۱. Killed Steels

۶۲. Atmospheric Corrosion

۶۳. Urban Atmosphere

۶۴. Industrial Atmosphere

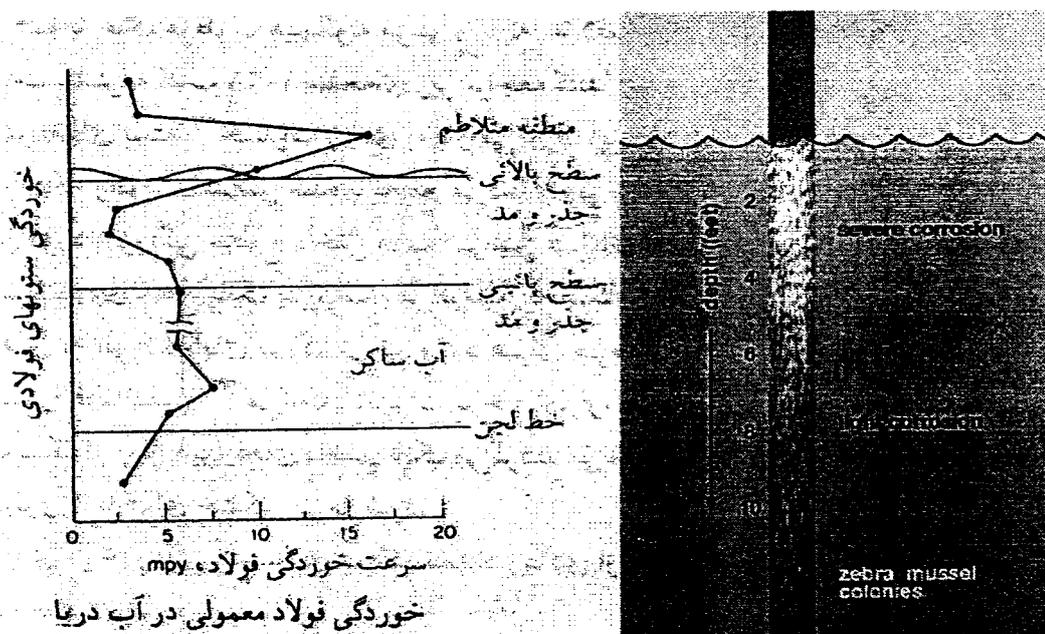
شوند. اگر دودکش کوتاه باشد، غلظت آلاینده ها در اطراف دودکش بیشتر است و توزیع غیریکنواختی دارد.

وزش باد در غلظت و توزیع آلاینده ها مؤثر می باشد.

۳. اتمسفر دریایی^{۶۵}: به دلیل وزش باد و پاشش قطرات آب دریا در نوار باریکی از ساحل به پهنای

۵-۶ کیلومتر غلظت Cl^- بسیار بالا و بین $500-5$ mg/m^3 است.

پهنای این نوار بستگی به شدت وزش باد و موانع چه طبیعی همانند درخت، کوه، و چه مصنوعی همانند ساختمان ها و آسمان خراش ها، دارد.



۴. اتمسفر روستایی^{۶۶}: بدلیل وجود انواع کودها و فضولات حیوانی غلظت ترکیبات آمونیاک دار و آمین ها و اوره زیاد است و سایر آلاینده ها غلظت نزدیک به صفر دارند.

نقش رطوبت در خوردگی اتمسفری: رطوبت هوا نقش الکترولیت را در خوردگی اتمسفری ایفا می کند. رطوبت به صورت لایه نازکی روی سطح فلز کندانس می شود. ضخامت لایه رطوبت کم است اما قابلیت انحلال اکسیژن را نیز در خودش دارد. بنابراین واکنش کاتدی هم می تواند تصاعد هیدروژن و هم احیای اکسیژن باشد.

۶۵. Marine Atmosphere

۶۶. Rural Atmosphere

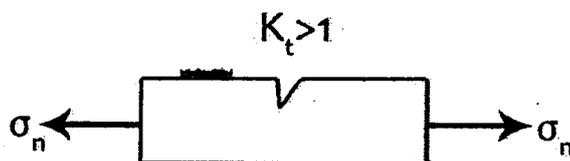
هرچه دما بیشتر باشد، غلظت اکسیژن در رطوبت کندانس شده کمتر خواهد بود و در نتیجه سرعت خوردگی کاهش می یابد؛ مگر این که رطوبت نسبی به اندازه کافی بالا باشد.

راهکارهای جلوگیری از خوردگی اتمسفری:

- انتخاب مواد:
- الف) استفاده از فولادهای مس دار (حدود ۰/۲-۰/۱ درصد مس). فولادهای مس دار خاص کاربرد خوردگی اتمسفری هستند.
- ب) استفاده از فولادهای زنگ نزن
- ج) استفاده از Al یا Ni
- استفاده از پوشش های پلیمری مانند رنگ و یا پوشش های فلزی مانند گالوانیزه. پوشش های گالوانیزه خاص کاربرد خوردگی اتمسفری هستند [بهترین روش].
- جذب رطوبت در صورت بسته بودن اتمسفر. برای مثال استفاده از مواد جاذب رطوبت مانند سیلیکاژل.
- استفاده از بازدارنده های فاز بخار در صورت بسته بودن اتمسفر.

۱-۱۲-۲- خوردگی تارنیشینگ^{۶۷}: نوع خاصی از خوردگی اتمسفری است به این صورت که برخی فلزات همانند نقره و مس در مجاورت با اتمسفر سطحی کدر پیدا می کنند و جلای فلزی خود را از دست می دهند. این نوع خوردگی آسیب های مکانیکی بدنبال ندارد و تخریب به صورت کاهش کیفیت ظاهری است.

۲-۱۳- خوردگی تنش^{۶۸} و یا ترک خوردن در اثر خوردگی توأم با تنش^{۶۹} (SCC): این نوع خوردگی موضعی ناشی از تأثیر همزمان خوردگی (محیط خورنده) [عامل شیمیایی] و تنش کششی [عامل مکانیکی] می باشد.



بنابراین برای وقوع SCC دو شرط لازم است:

۱. تنش کششی (تنش فشاری موجب بروز این نوع خوردگی نمی گردد)
۲. محیط خورنده

۶۷. Tarnishing Corrosion

۶۸. Stress Corrosion

۶۹. Stress Corrosion Cracking

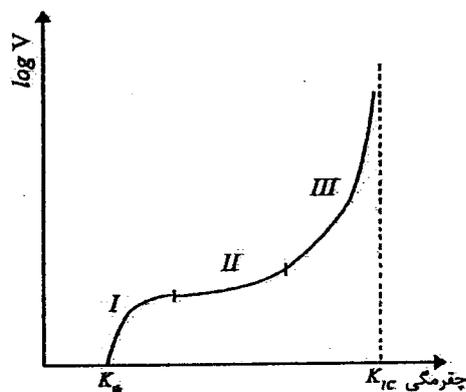
تنش کششی:

۱. تنش داخلی:

- تنش پسماند ناشی از باقی ماندن تنش های الاستیک در قطعه مثلاً در اثر کار سرد.
- تنش ناشی از انقباض حرارتی قطعات جوشکاری شده.
- تنش ناشی از تجمع محصولات خوردگی. در فصل مشترک پیچ و مهره شکل زیر محصولات خوردگی تشکیل می شوند که وزن مخصوص کمی دارند؛ بعبارت دیگر حجم محصولات خوردگی بسیار بیشتر از فلز اولیه است. بنابراین سبب ایجاد تنش می شود.

۲. تنش خارجی (اعمالی):

- به عنوان مثال آرماتورهای بتون مسلح 70% بکار رفته در یک سازه، تحت تنش قرار دارند.
- * مقدار تنش لازم برای بروز SCC معمولاً $70-10\%$ درصد σ_r یا $\frac{1}{3}\sigma_r$ می باشد.
- * هرچه مقدار تنش بیشتر باشد، سرعت اشاعه (رشد) ترک نیز بیشتر می شود. بعبارت دیگر با افزایش مقدار تنش، زمان ترک خوردن کاهش می یابد.

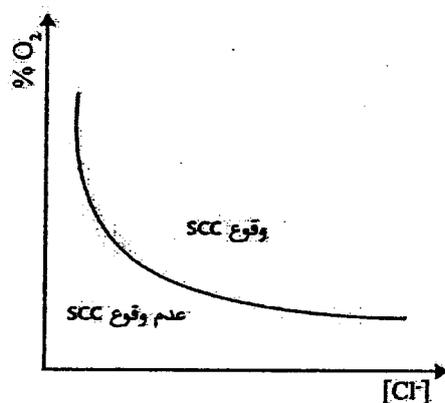


محیط خورنده:

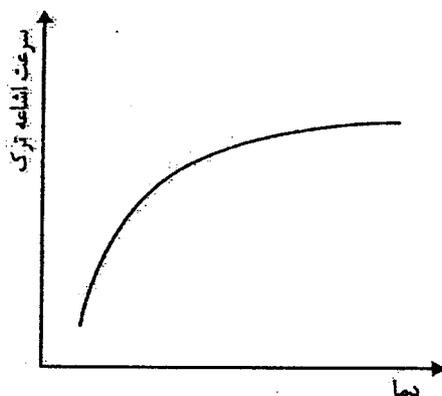
هر آلیاژی در یک محیط خاص دچار SCC می شود. برای مثال فولادهای ساده کربنی در محیط های حاوی سود، کربنات، نیترات، و برنج ها در محیط های حاوی آمونیاک، آمین ها، و فولادهای زنگ نزن در محیط های حاوی کلرور، اسید پلی تیونیک ($H_2S_2O_7$)، و آلیاژهای آلومینیم در محیط های کلریدی، دچار SCC می شوند.

در گذشته تصور می شد تنها آلیاژها دچار SCC می شوند ولیکن در ادامه مشخص گردید که طلای خالص در محیط های سیانیدی و مس خالص در محیط های آمونیاکی حاوی یون های کمپلکس $Cu(NH_3)_5^{2+}$ نیز دچار SCC می شوند.

وجود اکسید کننده ها غالباً اثر زیادی بر تمایل به ترک خوردن دارد. در حقیقت وجود اکسید کننده ها خصوصاً اکسیژن لازمه ترک خوردن فولاد های زنگ نزن در محلول های کلردار می باشد.



- هرچه دما بیشتر باشد، سرعت اشاعه ترک بیشتر است. به بیان دیگر SCC با افزایش دما شدت می یابد. خوردگی تنشی معمولاً در دماهای بالاتر از 100°C اتفاق می افتد.



مکانیزم: مکانیزم وقوع SCC شامل دو مرحله می باشد:

۱. جوانه زنی ترک
۲. اشاعه (رشد) ترک

جوانه زنی ترک: هر منطقه ای که تمرکز تنش در آن زیاد باشد، می تواند محل مناسبی برای جوانه زنی ترک باشد؛ مانند حفره ای که در اثر خوردگی حفره ای ایجاد شده است و یا شکاف ریزی که در اثر نفوذ کلرور در لایه پسیو بوجود آمده است و یا حتی خود محصولات خوردگی بر روی سطح می توانند باعث ایجاد تمرکز تنش شوند.

اشاعه ترک: مکانیزم های مختلفی برای اشاعه ترک پیشنهاد شده است. بر اساس یکی از این مکانیزم ها از طریق مکانیک شکست ثابت می شود در قسمت رأس ترک یک منطقه تغییر شکل پلاستیک وجود دارد که از انرژی بالاتری نسبت به نقاط دیگر برخوردار است. بعبارتی یک اختلاف پتانسیل بین منطقه تغییر شکل پلاستیک در رأس ترک با دیگر نقاط وجود دارد. بنابراین در منطقه تغییر شکل پلاستیک خوردگی اتفاق می افتد و محصولات خوردگی که ترد و شکننده هستند، در رأس ترک تشکیل می شود. با شکسته شدن محصولات خوردگی، ترک رشد و پیشروی می کند. هرچه ماده نرم تر باشد، منطقه تغییر شکل پلاستیک وسیع تر خواهد بود.

* بطور کلی انواع ترک عبارتند از:

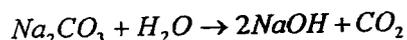
- ترک بین دانه ای^{۷۱}: ترک ها در امتداد مرز دانه ها رشد می کنند.
- ترک درون دانه ای^{۷۲}: ترک ها از داخل دانه ها عبور می کنند.



در SCC هر دو نوع ترک بین دانه ای و درون دانه ای مشاهده می شود. چنانچه تنش اعمالی زیاد باشد، ترک از نوع درون دانه ای و در غیر این صورت بین دانه ای خواهد بود. در مورد فولاد های زنگ نزن حساس شده از آنجایی که مرز دانه ها ضعیف شده اند، ترک بین دانه ای شایع تر است.

۱-۱۳-۲- تردی قلیایی^{۷۳}: نوع خاصی از خوردگی تنشی است که در فولاد های کربنی در محیط های قلیایی مشاهده می شود.

در لوکوموتیو های بخار اولیه از پرچکاری برای اتصال ورقه های مخزن دیگ بخار استفاده می کردند. بر اثر پرچکاری تنش پسماند ناشی از کار مکانیکی در اطراف پرچ ها ایجاد می شد [شرط اول: تنش]. از طرف دیگر کربنات سدیم موجود در آب در اثر حرارت تجزیه شده و تولید سود می کند [شرط دوم: محیط خورنده].



۷۱. Intergranular Crack
 ۷۲. Transgranular Crack
 ۷۳. Caustic Embrittlement

بدین ترتیب ورق های فولادی مخزن دیگ بخار از ناحیه اطراف پرچ ها دچار SCC می شد و بعضاً منفجر شدن دیگ ها را بدنبال داشت.

۲-۱۳-۲- ترک خوردن فصلی^{۷۴}: نوع خاصی از خوردگی تنش است که در آلیاژهای برنج در محیط های حاوی آمونیاک اتفاق می افتد.

پوکه های فشنگ را به منظور منفجر نشدن درون اسلحه، در اثر فشار حاصل از انفجار باروت، از طریق کار سرد شدید یک تکه می سازند که باعث ایجاد تنش های پسماند در پوکه ها می گردد [شرط اول: تنش]. در مناطق گرمسیری در فصل بارندگی های شدید، فشنگ ها را برای در امان ماندن از آب باران درون اصطبل ها نگهداری می کردند و بدین صورت در معرض فضولات حیوانی که حاوی ترکیبات آمونیاک دار و اوره هستند، قرار می گرفتند [شرط دوم: محیط خورنده]. بدین ترتیب پوکه های فشنگ برنجی از فصل مشترک پوکه و مرمی دچار ترک می شدند.

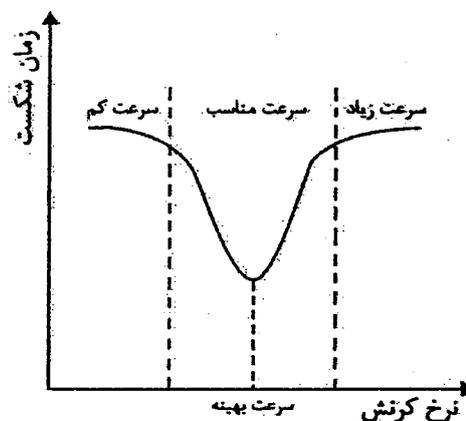
ارزیابی خوردگی تنشی:

۱. روش *U-bend*: تسمه ای فلزی را به شکل حرف لاتین *U* خم می کنند و با پیچ دو سر آن را به هم وصل می کنند تا کمی تنش در نمونه باقی بماند. سپس نمونه را در معرض محیط خورنده قرار می دهند و بدین ترتیب بررسی می کنند تا نمونه پس از چه مدت زمانی دچار خوردگی می شود.
۲. روش *C-ring*: مشابه روش *U-bend* است با این تفاوت که در این روش مقدار تنش اعمالی قابل محاسبه می باشد.

۳. آزمایش کشش با نرخ کرنش کم در حضور محیط خورنده:

برای تمامی نمونه ها سرعت کرنش یکسانی ($\dot{\epsilon} = 10^{-7} m/s$) در نظر می گیرند.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{t} \Rightarrow t = \frac{\epsilon}{\dot{\epsilon}}$$



چنانچه سرعت کرنش بسیار زیاد باشد، محیط خورنده نتوانسته بر نمونه اثر کند و نمونه در اثر عامل مکانیکی شکسته است. اگر هم سرعت کرنش خیلی کم باشد، اصلاً خوردگی تنش اتفاق نمی افتد.

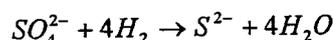
۲-۱۴- خوردگی بیولوژیکی^{۷۵}: این نوع خوردگی تخریبی است که در اثر تجمع، تکثیر و فعالیت موجودات زنده اعم از جانداران میکروسکوپی^{۷۶} نظیر باکتری ها و جانداران ماکروسکوپی^{۷۷} از جمله قارچ ها، موجودات آبی مثل جلبک ها و صدف ها، در دامنه pH بین ۰-۱۱ و محدوده دمایی $^{\circ}C$ ۰-۸۰ و در محیط های آبی، خاک ها و اتفاق می افتد.

باکتری ها^{۷۸}:

باکتری ها جاندارانی تک سلولی هستند که از طریق تقسیم سلولی ازدیاد می یابند. این جانداران از لحاظ متابولیسم (سوخت و ساز) به چهار دسته تقسیم می شوند:

- بی هوازی: در غیاب اکسیژن زندگی می کنند و بهترین شرایط برای رشد و سوخت و ساز آن ها محیط های فاقد اکسیژن است.
- هوازی: در حضور اکسیژن زندگی می کنند و در سوخت و ساز خود به اکسیژن نیاز دارند.
- بی تفاوت: هم در محیط های حاوی اکسیژن و هم در محیط های فاقد اکسیژن می توانند رشد کنند و به حیات خود ادامه دهند.
- دلبخواه: در محیط های دارای اکسیژن به رشد و حیات خود ادامه می دهند اما در محیط های فاقد اکسیژن به حالت کما می روند.

باکتری های بی هوازی: مهمترین باکتری بی هوازی، باکتری احیا کننده سولفات^{۷۹} و یا اصطلاحاً SRB است که طبق واکنش زیر سولفات را به سولفید احیا می کند:



بدین ترتیب باکتری SRB یون خورنده سولفید تولید می کند که در تماس با فولاد باعث تشکیل FeS سیاه رنگ می شود. بنابراین یک راه تشخیص خوردگی بیولوژیکی فولاد توسط SRB مشاهده محصولات خوردگی سیاه رنگ است. لکن وجود محصولات خوردگی سولفیدی همواره در اثر باکتری احیا کننده سولفات نمی باشد.

از طرف دیگر H_2 واکنش احیای سولفات به سولفید در اثر واکنش کاتدی خوردگی تولید شده است که باکتری SRB با مصرف آن باعث دی پلاریزه شدن واکنش کاتدی تصاعد هیدروژن ($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$)

۷۵. Biological Corrosion

۷۶. Microorganism

۷۷. Macroorganism

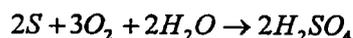
۷۸. Bacterium *pl.* Bacteria

۷۹. Sulfate Reduction Bacterium

می شود. با مصرف H_2 واکنش کاتدی با سرعت بیشتری انجام می شود و به تبع آن واکنش آندی (خوردگی) نیز تشدید می شود.

* مخازن ذخیره نفت خام، لوله های آب آتش نشانی، لوله ها و سازه های فولادی به کار رفته در زیر زمین و کارخانجات تولید اسید سولفوریک در معرض خوردگی توسط باکتری SRB قرار دارند.

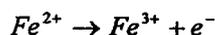
باکتری های هوازی: از انواع باکتری های هوازی می توان به باکتری تیو باسیلوس^{۸۰} اشاره کرد که در حقیقت باکتری اکسید کننده گوگرد است و طبق واکنش زیر گوگرد را به اسید سولفوریک اکسید می کند:



باکتری تیو باسیلوس می تواند بطور موضعی اسید سولفوریک با غلظت تا ۵ درصد وزنی تولید کند که اسیدی بسیار خورنده می باشد.

* خوردگی بیولوژیکی توسط باکتری تیو باسیلوس در پالایشگاه ها و صنایع پتروشیمی و خطوط لوله های سیمانی فاضلاب ها شایع است.

از دیگر باکتری های هوازی می توان به باکتری های آهن خوار اشاره کرد که به آهن حمله می کنند. از جمله باکتری گالیونلا که آهن دو ظرفیتی را به آهن سه ظرفیتی اکسید می کند:



باکتری های آمونیاک خوار که آمونیاک را به اسید نیتریک اکسید می کنند از انواع دیگر باکتری های هوازی محسوب می شوند.

راهکارهای جلوگیری از خوردگی میکروبیولوژیکی (خوردگی بیولوژیکی توسط میکروارگانیزم ها):
به منظور جلوگیری از خوردگی میکروبیولوژیکی از زیست کش ها^{۸۱} استفاده می شود:

- استفاده از گاز کلر Cl_2 (کلرینه کردن) [پر کاربردترین روش]
- استفاده از یون هیپوکلرو ClO_3^- [مؤثرترین روش]
- استفاده از آب اکسیژنه H_2O_2
- استفاده از گاز اوزون O_3 [این روش بسیار کم کاربرد است زیرا کار با گاز اوزون خطرناک است]
- استفاده از نمک های چهارتایی آمونیاک
- استفاده از یون فلزات سنگین نظیر Cu^{2+}

۸۰.Thiobacillus

۸۱.Biocide

قارچ‌ها^{۸۲}:

قارچ‌ها گیاهانی بدون کلروفیل هستند و در نتیجه عمل فتوسنتز انجام نمی‌دهند. موادی که در اثر سوخت و ساز قارچ‌ها بوجود می‌آیند، اسیدهای آلی نظیر اسید لاکتیک، اسید سیتریک، اسید استیک، اسید تالیک و اسید اگزالیک هستند که باعث خوردگی می‌شوند. خوراک قارچ‌ها عموماً سلولز است و برای رشد قارچ‌ها باید محیط مرطوب باشد.

در برج‌های خنک‌کننده^{۸۳} که محیط شدیداً مرطوب است، قارچ‌ها شروع به مصرف سلولز تخته‌چوب‌های بکار رفته در برج‌خنک‌کننده می‌کنند. این نوع خاص خوردگی بیولوژیکی به **فساد چوب^{۸۴}** معروف است.

راهکارهای جلوگیری از خوردگی بیولوژیکی توسط قارچ‌ها:

- کاهش رطوبت نسبی
- استفاده از یون پرمنگنات به عنوان زیست‌کش

جلبک‌ها^{۸۵}:

جلبک‌ها از انواع گیاهان دریایی محسوب می‌شوند که عمل سنتز نیز انجام می‌دهند. مهمترین مشکلی که جلبک‌ها ایجاد می‌کنند، **آلودگی^{۸۶}** است که حالت خاصی از خوردگی زیر رسوبی می‌باشد. وضعیتی را که موجودات آبرزی مانند جلبک‌ها و صدف‌ها^{۸۷} بر سطح فلز غوطه‌ور در آب چسبیده و رشد می‌کنند، اصطلاحاً آلودگی می‌گویند. این وضعیت باعث دشوارتر شدن حرکت کشتی‌ها و افزایش مصرف سوخت تا ۳۰٪ می‌شود.

راهکارهای جلوگیری از آلودگی:

- استفاده از رنگ‌های ضد آلودگی^{۸۸} در بدنه کشتی‌ها. این گونه رنگ‌ها حاوی ترکیباتی از مس هستند که به عنوان سم عمل کرده و مانع از رشد جلبک‌ها و صدف‌ها بر سطح بدنه کشتی می‌شود.

^{۸۲}.Fungus *pl.* Fungi

^{۸۳}.Cooling Tower

^{۸۴}.Wood Decay

^{۸۵}.Alga *pl.* Algae

^{۸۶}.Fouling

^{۸۷}.Barnacle

^{۸۸}.Anti-fouling

۲-۱۵- اکسیداسیون دمای بالا^{۸۹}: در اکسیداسیون دمای بالا، منظور دماهای بیش از $600^{\circ}C$ است و از آنجایی که بسیار بیشتر از دمای تبخیر آب است، پس آب نمی تواند الکترولیت باشد و در واقع اکسید فلزی نقش الکترولیت را ایفا می کند [الکترولیت جامد]. اکسید های فلزی نیمه هادی هستند و می توانند الکترون ها و یون ها را از خود عبور دهند. خاصیت نیمه هادی بودن لایه اکسیدی بخاطر عیوب کریستالی از جمله عیوب شاتکی و فرنکل می باشد.

نیمه هادی ها بر دو نوع هستند:

- نوع n (حامل بار منفی)
- نوع p (حامل بار مثبت)

توربین های گازی، موتورهای جت، در معرض اکسیداسیون دمای بالا قرار دارند.

مکانیزم:

در فصل مشترک اکسید و محیط، اکسیژن احیا می گردد و تبدیل به یون های اکسیژن می شود [مرحله ۱]:

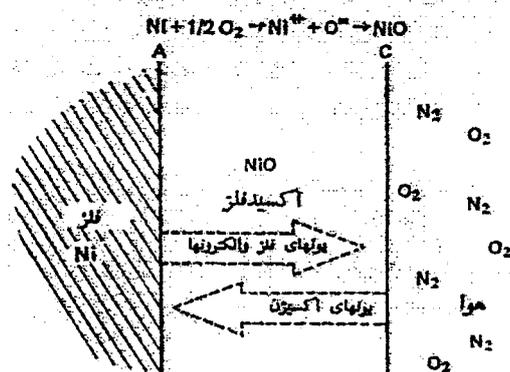


در فصل مشترک اکسید و فلز، یون های فلزی ایجاد می شوند [مرحله ۲]:

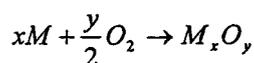


سپس یون ها (اعم از فلزی و O^{2-}) و الکترون ها در داخل لایه اکسیدی جابجا می شوند [مرحله ۳] و اکسید فلزی تشکیل می گردد [مرحله ۴].

این چهار مرحله به صورت سری انجام می شود و مرحله ۳ کنترل کننده فرآیند می باشد.

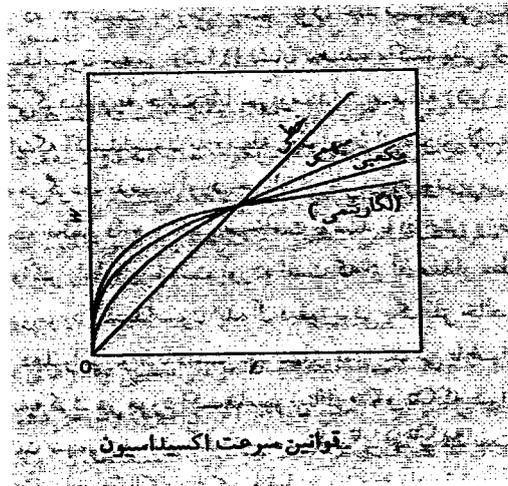


* بحث ترمودینامیکی: ΔG تشکیل اکسید منفی است و با افزایش دما ΔG منفی تر می شود.



* بحث سینتیکی: انواع رشد لایه های اکسیدی عبارتند از:

الف) اگر اکسیداسیون تابع نفوذ باشد، رشد لایه اکسیدی به صورت سهمی است.
 ب) اگر اکسیداسیون تابع انتقال اکسیژن به سطح فلز باشد، رشد لایه اکسیدی به صورت خطی است. در این حالت لایه اکسیدی متخلخل و ترک دار و شکننده است و اکسیژن هم به صورت مستقیم و هم به صورت غیر مستقیم به سطح فلز انتقال می یابد. از آنجایی که این دو بطور موازی انجام می گیرند، انتقال مستقیم اکسیژن به سطح فلز کنترل کننده فرآیند می باشد.
 ج) اگر لایه اکسیدی عایق باشد، رشد لایه اکسیدی به صورت لگاریتمی است. در این حالت لایه اکسیدی به عنوان محافظ عمل می کند.



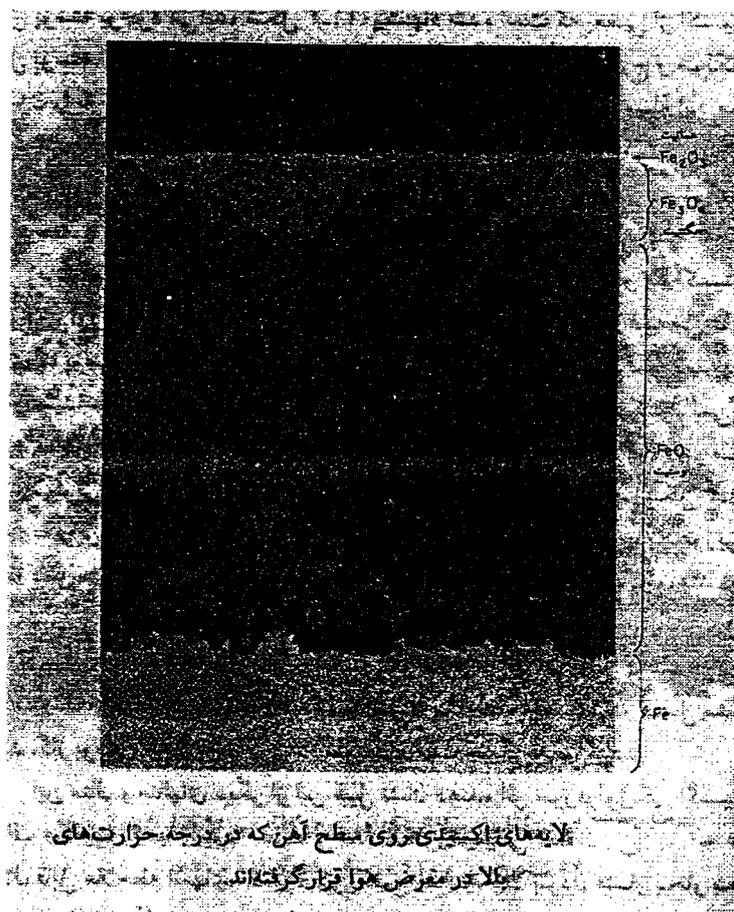
نسبت پیلینگ- بدورث^{۹۰}: پیلینگ و بدورث پیشنهاد نمودند که مقاومت به اکسیداسیون بستگی به نسبت حجم مولی اکسید به حجم مولی فلز دارد:

$$\text{نسبت پیلینگ- بدورث} = \frac{\text{حجم مولی اکسید}}{\text{حجم مولی فلز}}$$

- اگر $P.B. > 1$ باشد، لایه اکسیدی در اثر تنش های فشاری تاول می زند همانند آهن.
- اگر $P.B. < 1$ باشد، لایه اکسیدی در اثر تنش های کششی ترک می خورد همانند منیزیم.
- اگر $P.B. = 1$ یا کمی بیشتر از یک باشد، لایه اکسیدی به عنوان محافظ عمل می کند و از اکسید شدن بقیه فلز جلوگیری می کند همانند آلومینیم و کروم [حالت ایده آل].

۹۰. Pilling-Bedworth Ratio

* بسیاری از فلزات چندین اکسید پایدار تشکیل می دهند. این فازهای اکسیدی به ترتیبی خاصی روی فلز قرار دارند؛ به این ترتیب که هرچه از سطح فلز به سمت محیط پیش رویم، درصد اکسیژن ترکیب اکسیدی بیشتر می گردد (نسبت اکسیژن به فلز بزرگتر می شود).
برای مثال آهن دارای سه اکسید وستیت (FeO)، هماتیت (Fe_2O_3) و مگنتیت (Fe_3O_4) می باشد که البته در دماهای زیر $560^\circ C$ وستیت تشکیل نمی شود. ترتیب قرار گرفتن اکسید های آهن به صورت $Fe / FeO / Fe_3O_4 / Fe_2O_3$ می باشد.



همچنین مس دارای دو اکسید CuO سیاه رنگ و Cu_2O قرمز رنگ است و ترتیب قرار گرفتن آن ها به صورت $Cu / Cu_2O / CuO$ می باشد.

۲-۱۵-۱- خوردگی داغ^{۹۱}: نوع خاصی از اکسیداسیون دمای بالا می باشد که کمتر تحت تأثیر اکسیژن است و در اثر ترکیبات گوگرد دار همچون SO_2 ، H_2S ، S_2 ، که از سوخت های فسیلی حاصل می شود، رخ می دهد.

۲-۱۵-۲- خوردگی خاکستر سوخت^{۹۲}: نوع خاصی از اکسیداسیون دمای بالا می باشد به این نحو که در اثر احتراق سوخت های فسیلی، ترکیبات وانادیمی مانند V_2O_5 و ترکیبات سدیمی مانند Na_2O که در سوخت های فسیلی وجود دارند، روی سطح فلز رسوب می کنند و باعث تشکیل فازهای یوتکتیک [با نقطه ذوب پایین] می شوند. این فازهای یوتکتیک در دماهای بالا به طور موضعی ذوب می شوند و باعث تخریب سطح قطعه می شوند. سطح خورده شده به صورت چروکیده و پوسته پوسته در می آید.

راهکارهای جلوگیری از اکسیداسیون دمای بالا:

- نزدیک کردن لایه اکسیدی به عایق
- استفاده از سوپرآلیاژها و آلیاژهایی با غلظت کروم زیاد [بهترین روش]

۲-۱۶- خوردگی در آب:

آب عامل اصلی تشکیل دهنده الکتروولیت است و در اغلب صنایع برای انتقال حرارت خصوصاً در برج های خنک کننده کاربرد دارد.

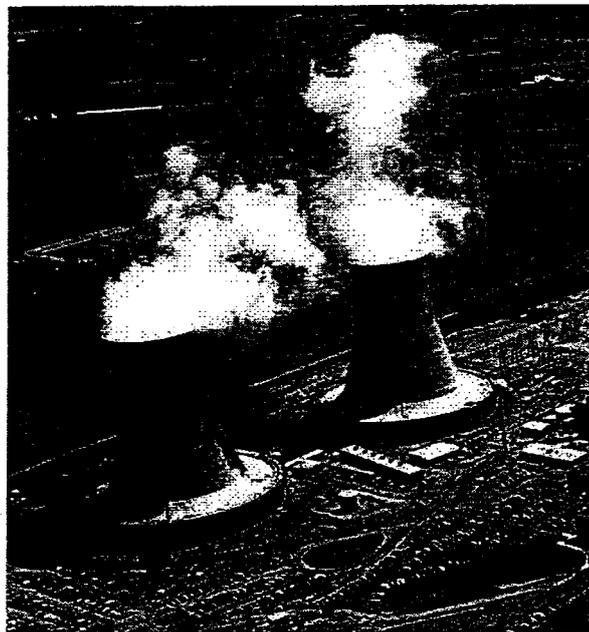
برخی از انواع برج های خنک کننده که مکانیزم ساده ای دارند عبارتند از:

- این نوع برج خنک کننده دارای یک استخر آب سرد است که جریان هوا از روی آب عبور داده می شود. برای افزایش راندمان فواره هایی را تعبیه می کنند. سالیانه $10-15\text{ cm}$ جلبک بر روی دیواره سیمانی استخر آب رشد می کند.
- این نوع برج خنک کننده به شکل مکعبی ساخته می شود و یک هواکش در بالا دارد که هوا را به بالا می کشد و آب نیز از بالا به پایین در جریان است. تخته چوب هایی در این برج های خنک کننده بکار می برند که باعث افزایش سطح تماس آب با محیط گشته و در نتیجه عمل خنک شدن سریع تر اتفاق می افتد.

۹۱. Hot Corrosion

۹۲. Fuel Ash Corrosion

این نوع از برج های خنک کننده به شکل هذلولی ساخته می شوند و ارتفاع زیادی دارند. بدلیل اختلاف سطح مقطع و ارتفاع زیاد، هوا از پایین به بالا کشیده می شود و جریان آب را نیز از بالا به پایین برقرار می سازند. این برج های خنک کننده راندمان بسیار بالایی دارند.



عوامل مؤثر بر خوردگی در آب:

۱. کاهش pH : باعث می گردد تا واکنش کاتدی تصاعد هیدروژن با شدت بیشتری انجام شود. در pH کمتر از ۴ فولادهای ساده کربنی در محیط آب مستعد به خوردگی می شوند.
 ۲. اکسیژن: حضور اکسیژن منجر به انجام واکنش کاتدی احیای اکسیژن می گردد. هرچه دما بالاتر برود، غلظت اکسیژن محلول در آب کمتر می شود.
 ۳. سختی آب: غلظت نمک های کلسیم و منیزیم (معمولاً کربنات کلسیم و منیزیم) را در آب، سختی می گویند. این ترکیبات تنها نمک هایی هستند که با افزایش دما انحلال پذیری شان کمتر می شود.
- آب هایی که حاوی مقادیر زیادی از این نمک ها هستند، اصطلاحاً آب سخت^{۹۳} نامیده می شوند و آب هایی که حاوی مقادیر ناچیزی از این نمک ها هستند، اصطلاحاً آب نرم^{۹۴} نامیده می شوند. خوردگی آب های نرم نسبتاً زیاد است.

۹۳. Hard Water

۹۴. Soft Water

با افزایش دما نمک های کربنات کلسیم و منیزیم رسوب می کنند و ممکن است خوردگی زیر رسوبی ایجاد شود. همچنین کاهش راندمان انتقال حرارت پیش می آید. اما اگر رسوبات ایجاد شده کاملاً متراکم و چسبنده باشند، با تشکیل یک لایه محافظ بر سطح فلز، باعث کند شدن آهنگ خوردگی می شوند.

پیش بینی تمایل به رسوب گذاری:

با افزایش غلظت یون های سخت (افزایش سختی آب)، افزایش دما و افزایش pH تمایل به رسوب گذاری بیشتر می شود. به منظور پیش بینی تشکیل رسوب دو پارامتر تعریف شده است:

اندیس لاتگلیر^{۹۵}:

$$L = pH - pH_s$$

- اگر $L < 0$ باشد، محیط خورنده است و رسوبی تشکیل نمی شود.
- اگر $L > 0$ باشد، رسوب تشکیل می شود اما در مورد وقوع خوردگی نمی توان اظهار نظر نمود.
- اگر $L = 0$ باشد، حالت تعادل (در آستانه تشکیل رسوب) است.
- اندیس لاتگلیر از روش تئوری حاصل شده است و در عمل پیش بینی چندان دقیقی ارائه نمی دهد. همچنین در مورد آب های در جریان صادق نیست.

اندیس رایزنر^{۹۶}:

$$R = 2pH_s - pH$$

- اگر $R > 6$ باشد، محیط خورنده است و رسوبی تشکیل نمی شود.
 - اگر $R < 6$ باشد، رسوب گذاری انجام می گیرد اما در مورد وقوع خوردگی نمی توان اظهار نظر کرد.
 - اگر $R = 6$ باشد، حالت تعادل (در آستانه تشکیل رسوب) است.
- * اندیس رایزنر بطور تجربی بدست آمده است و با واقعیت بسیار سازگار است. همچنین در مورد آب های در جریان نیز صادق است.

عملیات شیمیایی^{۹۷}:

هدف: بهبود کیفیت آب از نظر خوردگی و رسوب گذاری.

۱. نرم کردن آب: حذف یون های سخت از آب.

- روش حرارتی: انحلال پذیری نمک های سخت با افزایش دما کاهش می یابد. بنابراین با اعمال حرارت، این نمک ها رسوب کرده و سپس آن ها را از آب خارج می کنند.
- استفاده از تبادل گر یونی: تبادل گر یونی دستگاهی است که به صورت ستون های بلند فلزی ساخته می شود که در داخل این ستون ها رزین های کاتیونی قرار دارند. آب از داخل این

۹۵. Langelier Index

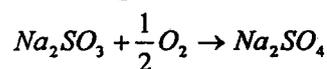
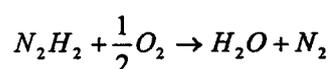
۹۶. Ryzner Index

۹۷. Chemical Treatment

ستون ها عبور داده می شود و رزین های کاتیونی یون های کلسیم و منیزیم را از آب می گیرند و یون های سدیم را که برای آب سختی محسوب نمی شوند، به آب می دهند. این رزین ها پس از مدتی باید تعویض شوند.

۲. هوا زدایی: حذف اکسیژن به عنوان واکنش دهنده کاتدی.

- روش حرارتی: هرچه دما افزایش یابد، غلظت اکسیژن محلول در آب کمتر می شود. بنابراین بخار خشک آب را از روی قطرات آب عبور می دهند.
- روش شیمیایی: با افزودن هیدرازین (N_2H_2) یا سولفیت سدیم (Na_2SO_3) به آب، اکسیژن موجود در آب با آن ها واکنش می دهد:



✓ هوا زدایی در سیستم های بسته معقول است.

۳. تنظیم pH

هنگامی که CO_2 موجود در هوا در آب حل می شود، تشکیل اسید کربنیک می دهد که یک اسید ضعیف و بافر کننده است.

به منظور تنظیم pH از آمونیاک، مورفولین یا سیکلو هگزیل آمین استفاده می شود.

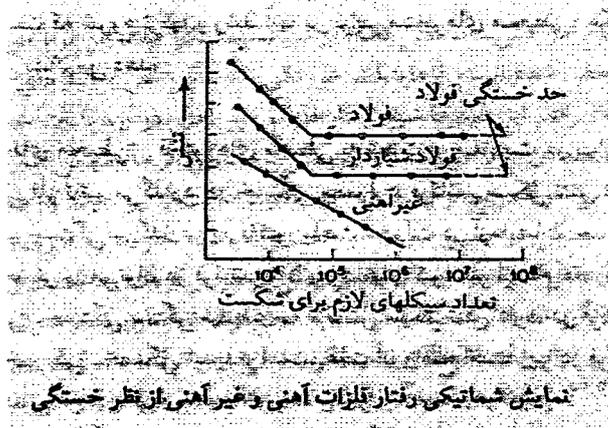
۲-۱۷- خوردگی توأم با خستگی یا خوردگی - خستگی^{۹۸}: خستگی عبارتست از تمایل قطعه به شکست در اثر تنش های سیکلی (متناوب) که به مراتب کمتر از تنش تسلیم است. ۹۰ درصد شکست هایی که در صنعت اتفاق می افتد ناشی از خستگی است. منظور از خوردگی- خستگی تأثیرات همزمان عامل شیمیایی [خوردگی] و عامل مکانیکی [خستگی] می باشد که پیامدهایی به شرح ذیل دارد:

- در حضور محیط خورنده عمر خستگی (= مقاومت به خستگی) شدیداً کاهش پیدا می کند.
- در حضور محیط خورنده حد خستگی^{۹۹} آلیاژهای آهنی که پارامتر مهمی در طراحی است، از بین می رود.

تعریف حد خستگی: عمر خستگی فولادها معمولاً از یک تنش معینی کمتر، مستقل از تنش می گردد به این نحو که قطعه تعداد بی نهایت سیکل تنش را بدون شکست تحمل خواهد کرد. این تنش معین را حد خستگی می گویند.

۹۸. Corrosion Fatigue

۹۹. Fatigue Limit



- در حضور محیط خوردنده فرکانس اهمیت می یابد. بدیهی است هنگامی که فرکانس زیاد باشد، اثر محیط خوردنده بر خستگی کمتر خواهد شد زیرا که زمان قرارگیری قطعه در محیط خوردنده کمتر است.

۳- فصل سوم: روش های ارزیابی خوردگی

روش های ارزیابی خوردگی بطور کلی به دو دسته تقسیم می شوند:

- روش میدانی^۱
- روش آزمایشگاهی^۲

۳-۱- روش های میدانی:

روش های میدانی ارزیابی خوردگی به این صورت است که در شرایط واقعی و حین کارکرد یک سیستم، آزمایش به عمل می آید. به عنوان مثال:

- در سیستم های لوله کشی نمونه های آزمایش را که اصطلاحاً کوپن^۳ نامیده می شود با استفاده از پایه^۴ در سیستم کار می گذارند.
- با استفاده از روش فراصوت^۵ قطر لوله ها را در قسمت های مختلف ضخامت سنجی می کنند.
- با استفاده از یک پراب^۶ مقاومتی اندازه گیری مقاومت الکتریکی ($R = \rho \frac{L}{A}$) قطعه مورد نظر انجام می گیرد (اساس کار اندازه گیری مقاومت الکتریکی است). هنگامی که قطعه ای دچار خوردگی شود، از آنجایی که ρ ثابت است و با فرض ثابت بودن L ، بدنبال کاهش A در اثر خوردگی، مقاومت الکتریکی افزایش می یابد. بنابراین می توان مقاومت الکتریکی را به سرعت خوردگی ارتباط داد ($R \propto C.R.$)

۳-۲- روش های آزمایشگاهی:

همانطور که از نام این روش ها بر می آید، آزمایش در مقیاس به مراتب کوچکتری از شرایط واقعی و در محیط آزمایشگاه انجام می پذیرد. در روش های آزمایشگاهی در تعمیم دادن نتایج آزمایش به صنعت باید جانب احتیاط را مراعات کرد.

اهدافی که در روش های آزمایشگاهی دنبال می شود عبارتند از:

- سنجش سرعت خوردگی یک فلز یا آلیاژ معین در یک محیط خاص
 - مقایسه سرعت خوردگی فلزات مختلف در یک محیط خاص و یا بالعکس مقایسه سرعت یک فلز معین در محیط های متفاوت
 - بررسی اثر بازدارنده های خوردگی بر فرآیند خوردگی
- ✓ نمونه های آزمایشگاهی استاندارد در ابعاد ۱×۲ اینچ تهیه می شود.

-
۱. Field Test
 ۲. Laboratory Test
 ۳. Coupon
 ۴. Rack
 ۵. Ultrasonics
 ۶. Probe

آزمایش های خوردگی:

۱. آزمایش غوطه وری^۷:

معمولاً آزمایش های خوردگی یکنواخت به این صورت انجام می گیرد که نمونه های آزمایش را در محیط خورنده مورد نظر غوطه ور می کنند و از رابطه زیر سرعت خوردگی را بدست می آورند:

$$C.R.(mpy) = \frac{534W}{DAT}$$

$$A = 2(1 \times 2) = 4 \text{ inch}$$

برای اطمینان حاصل کردن از صحت نتیجه بدست آمده باید کافی بودن زمان آزمایش بررسی شود:

$$t > \frac{2000}{C.R.(mpy)}$$

مثال:

$$60hr \rightarrow C.R. = 40 \text{ mpy}$$

$$60 > \frac{2000}{40} = 50$$

نتیجه: هرچه سرعت خوردگی بیشتر باشد، زمان کمتری برای آزمایش خوردگی لازم است.

* روش غوطه وری را می توان برای ارزیابی خوردگی حفره ای نیز بکار گرفت با این تفاوت که بجای استفاده

از رابطه سرعت خوردگی ($C.R. = \frac{534W}{DAT}$)، از معیار *P.F.* استفاده می کنند.

۲. آزمایش پاشش نمک^۸:

هدف از آزمایش پاشش نمک، ارزیابی خوردگی اتمسفری در اتمسفر دریایی است؛ اما قابل تعمیم به سایر اتمسفرها نیز می باشد. معیار ارزیابی در آزمایش پاشش نمک که به آزمون مه^۹ نیز مشهور است، زمان می باشد.

بررسی مقاومت به خوردگی اتمسفری پوشش های گالوانیزه که خاص کاربرد خوردگی اتمسفری هستند، از طریق آزمایش پاشش نمک بسیار متداول است. در ابتدا پوشش *Zn* خورده می شود و محصولات خوردگی *Zn* یعنی زنگ سفید^{۱۰} تشکیل می شود. سپس *Fe* دچار خوردگی می گردد و محصولات خوردگی آهن یعنی زنگ قرمز^{۱۱} تشکیل می شود.

۷. Immersion Test

۸. Salt Spray Test

۹. Fog Test

۱۰. White Rust

۱۱. Red Rust

۳. آزمایش آب و هوا^{۱۲}:

این آزمایش شبیه سازی تسریع شده شرایط آب و هوایی نظیر روز و شب، خورشید، پرتوهای فرابنفش، فصول سال (زمستان و تابستان و ...)، بارندگی و غیره می باشد. در این آزمایش معیار ارزیابی، زمان است.

۴. آزمایش الکتروشیمیایی^{۱۳}:

به هنگام وقوع خوردگی دو واکنش الکتروشیمیایی انجام می شود. اگر i_c نمایانگر سرعت واکنش کاتدی و i_a نمایانگر سرعت واکنش آندی باشد، در هنگام خوردگی:

$$I = i_a - i_c$$

$$E = E_{Corr} \rightarrow i_c = i_a \Rightarrow I = 0$$

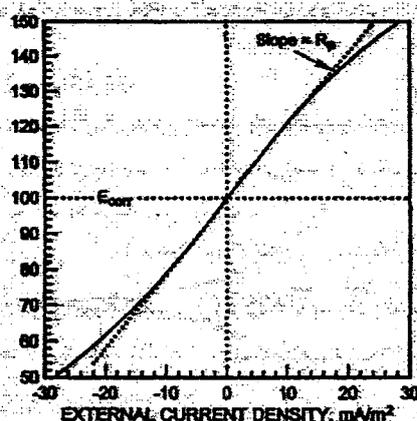
با استفاده از دستگاه های خاص الکترون هایی را به سیستم القا می کنند. بدین صورت تعادل برهم می خورد ($i_a \neq i_c$). این الکترون های اضافی در واکنش کاتدی مصرف می شوند، پس:

$$i_a < i_c \Rightarrow I < 0$$

این روند همچنان ادامه می یابد تا پتانسیل به E_{Corr} می رسد سپس این دفعه الکترون هایی را از سیستم خارج می کنند. این کمبود الکترون توسط واکنش آندی جبران می شود. بعبارت دیگر واکنش آندی مجبور به تولید الکترون بیشتر می گردد، بنابراین:

$$i_a > i_c \Rightarrow I > 0$$

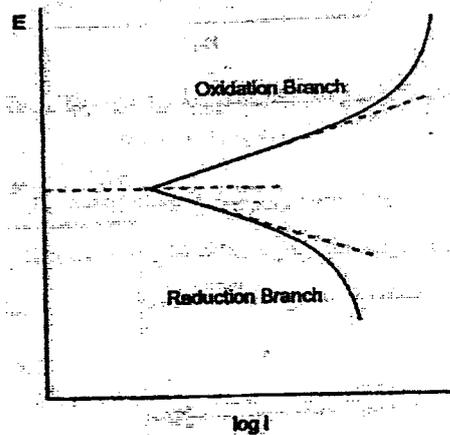
بدین ترتیب از طریق اسکن توسط دستگاه نموداری بدست می آید که به منحنی پلاریزاسیون موسوم است.



۱۲. Weathering Test

۱۳. Electrochemical Test

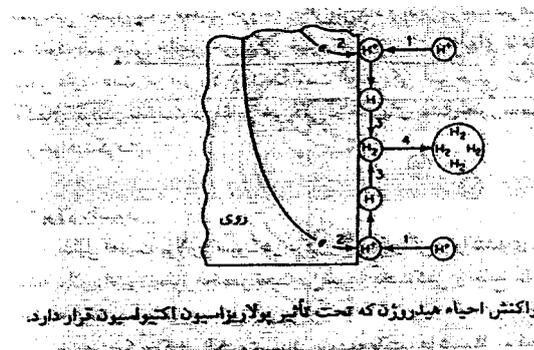
از آنجایی که در این منحنی ها دانسیته جریان الکتریکی گستره وسیعی را شامل می شود، از لگاریتم دانسیته جریان الکتریکی استفاده می گردد. همچنین چون در این منحنی ها مقادیر منفی دانسیته جریان نیز وجود دارد و از طرفی لگاریتم اعداد منفی تعریف نشده است، محور افقی منحنی های پلاریزاسیون بر حسب $\log |I|$ مدرج شده است.



پلاریزاسیون:

انحراف پتانسیل از حالت تعادلی را پلاریزاسیون تعریف می کنند و با η نشان می دهند. بسته به منشأ پدید آمدن، پلاریزاسیون انواع مختلفی دارد:

- **پلاریزاسیون انتقال بار یا اکتیواسیون:** از آنجایی که این نوع پلاریزاسیون ناشی از انتقال بار است، میزان انحراف به سرعت واکنش بستگی دارد.

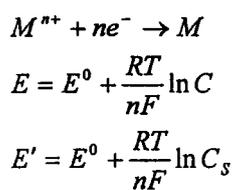
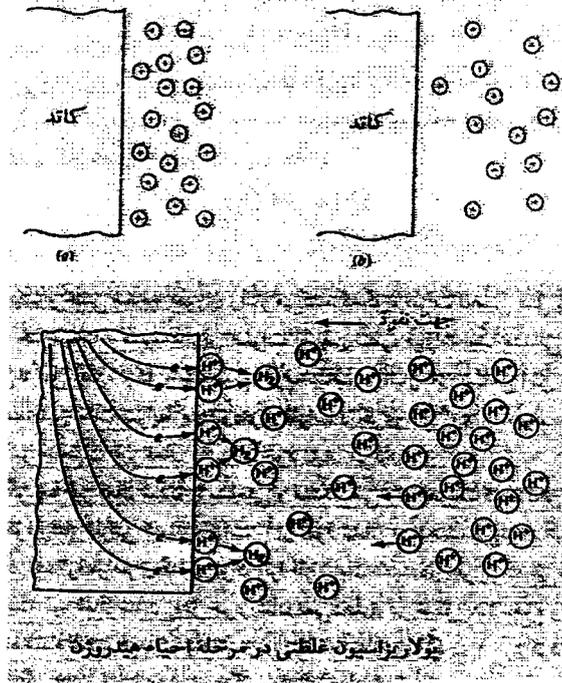


$$\eta_a = \pm \beta \log \frac{i}{i_0}$$

پارامترهای مؤثر بر پلاریزاسیون اکتیواسیون:

الف) دما: تغییرات دما بر سرعت واکنش ها اثر گذار است.

- **پلاریزاسیون غلظتی:** همانطور که از نام این نوع پلاریزاسیون برمی آید، غلظت عامل انحراف پتانسیل از حالت تعادلی می باشد. این نوع پلاریزاسیون اکثراً در واکنش های کاتدی رخ می دهد. بنابراین در مبحث خوردگی تنها برای واکنش های تصاعد هیدروژن و احیای اکسیژن حائز اهمیت می باشد.

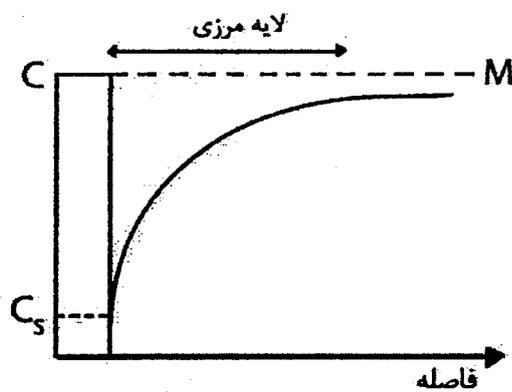


$$[M^{n+}] = C$$

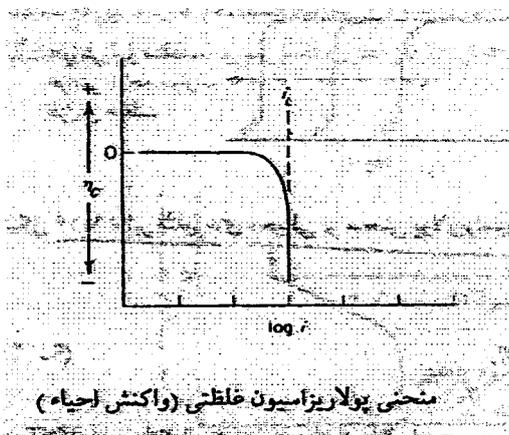
$$C_s \ll C \Rightarrow \eta = E' - E \neq 0$$

$$\eta_c = \frac{RT}{nF} 2.3 \log \left(1 - \frac{i}{i_L} \right)$$

$$i_L = \frac{nFD}{\delta} C$$



* به فاصله ای از سطح که در آن غلظت کاتیون ها به غلظت محلول می رسد، لایه مرزی گفته و با δ نشان می دهند.

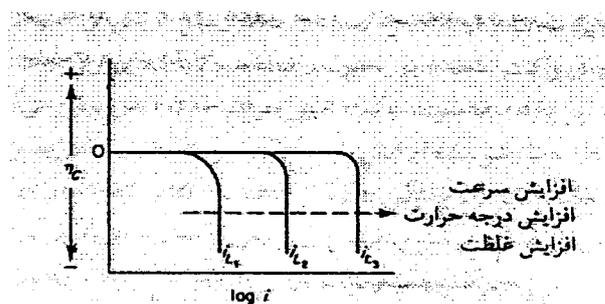


پارامترهای مؤثر بر پولاریزاسیون غلظتی:

الف) دما: افزایش دما موجب افزایش ضریب نفوذ و در نتیجه افزایش دانسیته جریان حدی می‌گردد.

ب) غلظت کاتیون‌ها: افزایش غلظت کاتیون‌های محلول باعث افزایش دانسیته جریان حدی می‌شود.

ج) هم زدن محلول: از طریق هم زدن محلول لایه مرزی کاهش یافته و منجر به افزایش دانسیته جریان حدی می‌گردد.



- پولاریزاسیون اهمی یا مقاومتی: تمامی رساناها از جمله الکترولیت دارای مقاومت الکتریکی هستند که موجب افت پتانسیل می‌شود. این پولاریزاسیون بر پایه قانون اهم قرار دارد.

$$\eta_R = iR$$

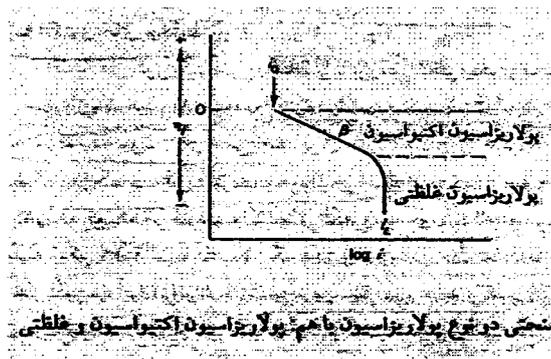
پارامترهای مؤثر بر پلاریزاسیون اهمی:

الف) دما

ب) غلظت و ترکیب شیمیایی الکترولیت

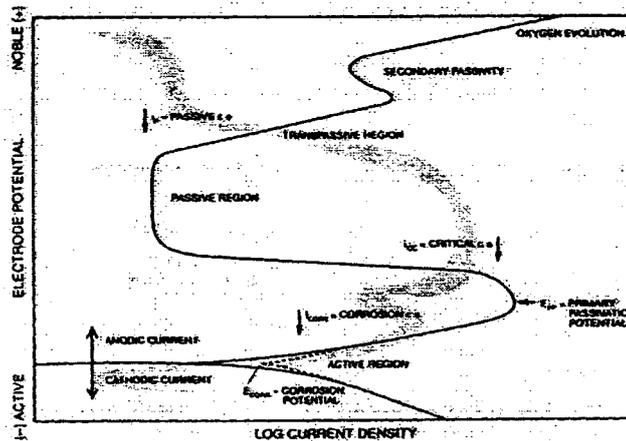
ج) فاصله بین آند و کاتد

- پلاریزاسیون فصل مشترک: این نوع پلاریزاسیون عبارت است از مجموع پلاریزاسیون های انتقال بار و غلظتی.

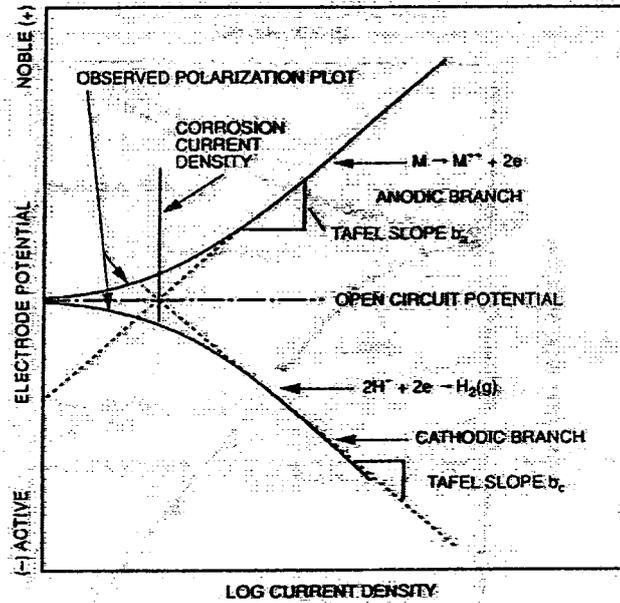


اطلاعات قابل استخراج از منحنی های پلاریزاسیون:

۱. پتانسیل خوردگی



۲. دانسیته جریان خوردگی:



$$i_{Corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)} \times \frac{1}{R_p} \quad \text{روش برون یابی تاقل}$$

$$R_p = \frac{E}{I}$$

* سرعت خوردگی قابل محاسبه از روی دانسیته جریان خوردگی می باشد:

- روش تجربی: نصف مقدار دانسیته جریان خوردگی برحسب $\frac{mA}{cm^2}$ برابر سرعت خوردگی برحسب mpy است.

$$C.R. = \frac{1}{2} i_{Corr}$$

- روش تئوری (فرمولی):

$$C.R. = 0.0129 \left(\frac{M}{n} \right) \frac{1}{\rho} i_{Corr}$$

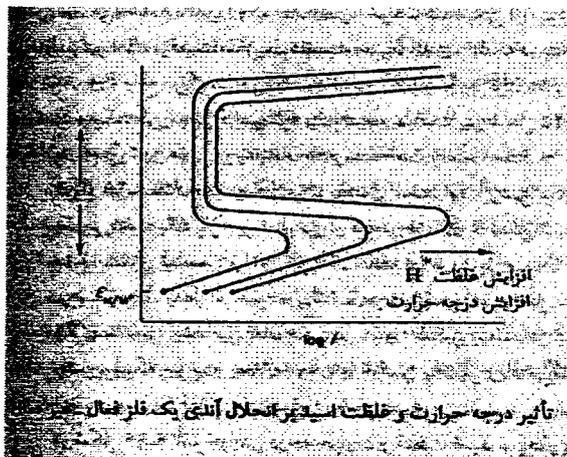
$$\left(\frac{M}{n} \right)_{alloy} = \sum_{k=1} \left(\frac{M}{n} \right)_k X_k$$

مثال: برای فولاد زنگ نزن ۸-۱۸ داریم:

$$\left(\frac{M}{n} \right)_{alloy} = \frac{M_{Cr}}{n_{Cr}} \times 0.18 + \frac{M_{Ni}}{n_{Ni}} \times 0.08 + \frac{M_{Fe}}{n_{Fe}} \times 0.74$$

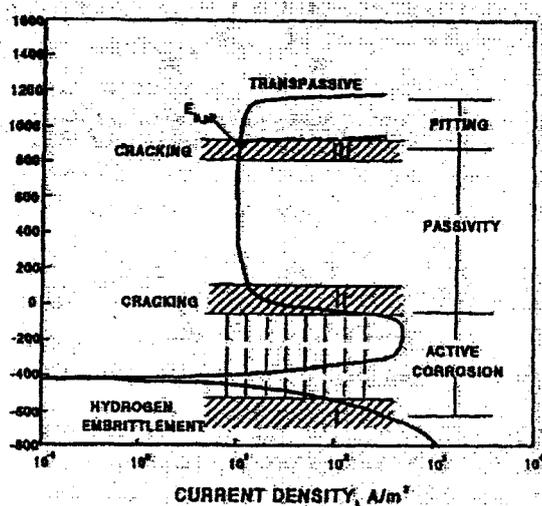
۳. بررسی مکانیزم فرآیندهای خوردگی برای مثال اثر بازدارنده های خوردگی

۴. بررسی رفتار اکتیو-پسیو فلزات:



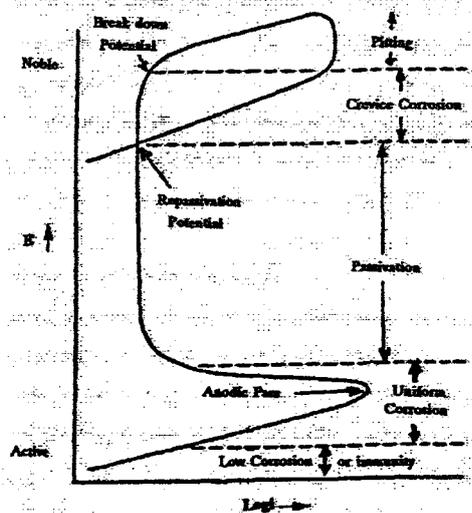
✓ هرچه نسبت $\frac{i_{Crit}}{i_{Pass}}$ به یک نزدیک تر باشد، مطلوب تر است.

✓ در این دو ناحیه لایه پسیو بسیار ضعیف است و در نتیجه احتمال وقوع SCC بسیار زیاد است.



✓ اگر پس از رسیدن به نقطه ترانس پسیو جهت اسکن را معکوس کنیم، به این عمل پلاریزاسیون سیکلی می گویند و به این ترتیب یک منحنی اسکن معکوس حاصل می شود. چنانچه منحنی اسکن معکوس مستقل از اسکن اولیه باشد، فلز در برابر انواع خوردگی موضعی خصوصاً حفره دار شدن و خوردگی شیاری مقاوم است. ولیکن

چنانچه منحنی اسکن معکوس در منطقه پسیو منحنی اسکن اولیه را قطع کند، فلز به انواع خوردگی موضعی مستعد است و هرچه منطقه محصور بین دو منحنی وسیع تر باشد، مستعد بودن فلز به انواع خوردگی موضعی بیشتر خواهد بود.



۴- فصل چهارم: روش های کنترل خوردگی

روش های کلی و عمومی کنترل خوردگی عبارتند از:

- استفاده از بازدارنده های خوردگی
- حفاظت کاتدی
- حفاظت آندی
- استفاده از پوشش ها
- انتخاب مواد
- طراحی مناسب

۴-۱- بازدارنده ها یا ممانعت کننده های خوردگی^۱: موادی هستند که به مقادیر کم (در حد ppm) به محیط خورنده افزوده می شوند و باعث کاهش شدید سرعت خوردگی می گردند. بازدارنده ها به سه دسته کلی تقسیم می شوند:

- بازدارنده های آندی
- بازدارنده های کاتدی
- بازدارنده های مختلط

* گاهاً بازدارنده ها را از نظر ترکیب شیمیایی به دو گروه دسته بندی می کنند:

- بازدارنده های آلی نظیر کوئینولین، تیواوره، اتیل اکتنول،
- بازدارنده های معدنی نظیر کرومات ها، نیترات ها، مولیبدات ها،

۴-۱-۱- بازدارنده های آندی: این دسته از بازدارنده ها بر واکنش آندی اثر می گذارند و با افزایش (مثبت تر کردن) پتانسیل خوردگی باعث می گردند تا فلز در منطقه پسیو قرار بگیرد و لایه پسیو بر سطح فلز تشکیل گردد. به این بازدارنده ها اصطلاحاً بازدارنده های خطرناک نیز اطلاق می گردد چرا که اگر به مقدار کافی استفاده نشوند، لایه پسیو نمی تواند سطح فلز را کاملاً بپوشاند و در نتیجه ممکن است موجب وقوع خوردگی حفره ای شود.

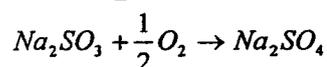
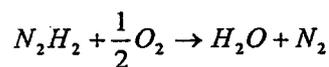
بازدارنده های آندی به دو دسته تقسیم بندی می شوند:

- اکسید کننده ها مانند کرومات ها، نیترات ها،
 - غیر اکسید کننده ها نظیر فسفات ها، مولیبدات ها، تنگستات ها،
- مؤثرترین بازدارنده آندی، کرومات ها هستند که البته بدلیل سمی بودن و مشکلات زیست محیطی امروزه کاربرد تنگستات ها و مولیبدات ها متداول تر شده است.

۱. Inhibitor

۴-۱-۲- بازدارنده های کاتدی: این دسته از بازدارنده ها بر واکنش کاتدی اثر می گذارند و به صورت زیر تقسیم بندی می گردند:

- سموم هیدروژنی: یون هایی همانند S^{2-} ، As^+ ، Sb^{2+} ، باعث کند شدن تصاعد هیدروژن می شوند.
- اکسیژن زداها: ترکیباتی مثل هیدرازین و سولفیت سدیم موجب حذف اکسیژن به عنوان واکنش گر کاتدی می شوند. استفاده از اکسیژن زداها در سیستم های بسته معقول است.



- رسوبات کاتدی: با تشکیل رسوب بر روی سطح فلز، از تماس فلز با محیط خورنده جلوگیری می کنند در حقیقت سطح کاتد را کوچک تر می کنند.

۴-۱-۳- بازدارنده های مختلط: این دسته از بازدارنده ها هم بر واکنش آندی و هم بر واکنش کاتدی اثر می گذارند اما معمولاً یکی از اثرات آندی یا کاتدی آن ها غالب است.

غالباً به منظور کنترل خوردگی یک بازدارنده به تنهایی بکار برده نمی شود؛ بلکه از چندین بازدارنده همزمان استفاده می گردد. بازدارنده ها برهم تأثیرات متقابلی می گذارند:

- اثر تقویت^۲: تأثیر استفاده توأم چند بازدارنده به مراتب بیشتر از مجموع تأثیرات تک تک آن ها می باشد. بعبارت دیگر کاربرد همزمان بازدارنده ها باعث می شود تا اثر مضاعفی حاصل گردد.

$$C.R._0 = 500 \text{ mpy}$$

$$A \mapsto C.R._A = 400$$

$$B \mapsto C.R._B = 300$$

$$A + B \mapsto C.R._{A+B} = 60$$

- اثر تضعیف^۳: تأثیر استفاده توأم چند بازدارنده کمتر از مجموع تأثیرات تک تک آن ها می باشد. بعبارت دیگر کاربرد همزمان بازدارنده ها باعث می شود تا اثر همدیگر را خنثی کنند.

$$C.R._0 = 500 \text{ mpy}$$

$$A \mapsto C.R._A = 400$$

$$B \mapsto C.R._B = 300$$

$$A + B \mapsto C.R._{A+B} = 470$$

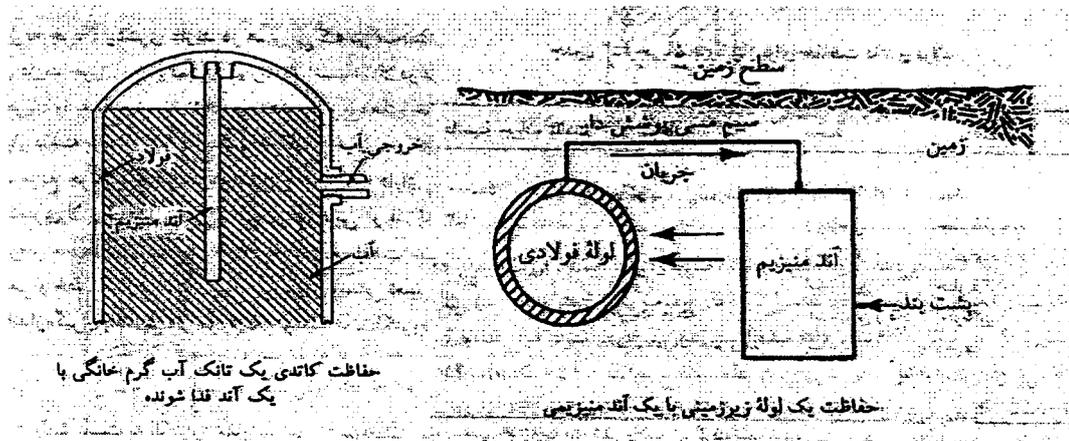
۲. Synergistic
۳. Antagonistic

* راندمان بازدارندگی را به صورت زیر محاسبه می کنند:

$$IE\% = \frac{C.R._0 - C.R._1}{C.R._0} \times 100$$

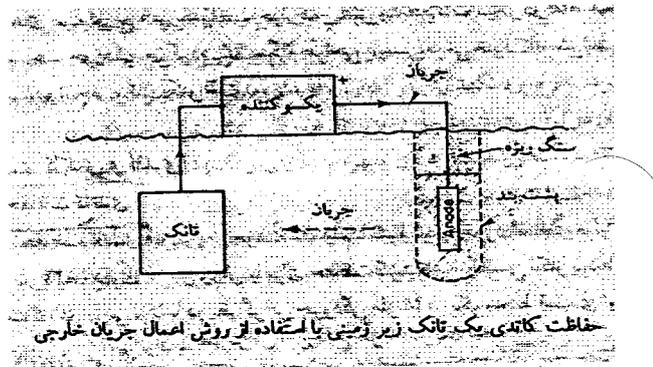
۴-۲- حفاظت کاتدی^۴: اصول کار حفاظت کاتدی بر اساس خوردگی گالوانیک قرار دارد و با کاتد کردن قطعه یا سازه مورد نظر از خوردگی قطعه یا سازه جلوگیری می شود (پتانسیل قطعه را منفی تر کنیم تا به کمتر از پتانسیل خوردگی برسد). دو روش برای حفاظت کاتدی وجود دارد:

۱. استفاده از آند فداشونده^۵: در این شیوه با قرار دادن فلزی فعال به عنوان آند در ارتباط با قطعه مورد نظر آن را عملاً تبدیل به یک کاتد می کنند. این آندها از نوع مصرفی هستند و ویژگی مهمی که باید داشته باشند، پسیو نشدن سطح شان می باشد. جنس این آندها می تواند از روی، منیزیم یا آلومینیم باشد. هرچه محیط خورنده تر و مقاومت به خوردگی لوله کمتر باشد، تمایل به استفاده از آندهای Mg بیشتر می شود. در محیط آب دریا عموماً از آندهای Al استفاده می گردد.



۴. Cathodic Protection
۵. Sacrificial Anode

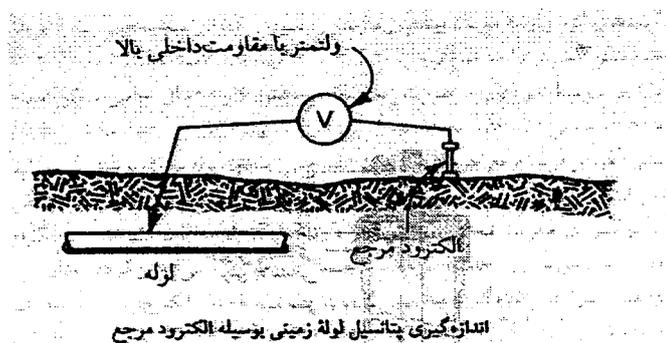
۲. روش جریان اعمالی: در این روش با استفاده از جریان الکتریکی مستقیم که از طریق یک منبع تغذیه DC یا یکسو کننده جریان تأمین می گردد، قطعه مورد نظر را به کاتد تبدیل می کنند. در این روش آندها غیر مصرفی هستند و تنها نقش کامل کردن مدار الکتریکی را ایفا می کنند.



* عواملی همچون تعداد آندهای مورد استفاده، اندازه آندها و فاصله آندها از قطعه مورد نظر می تواند بر حفاظت کاتدی مؤثر باشد.

معیار حفاظت کاتدی:

۱. معیار پتانسیل: برای مثال هنگامی که لوله ای فولادی در خاک قرار دارد، برای انجام گرفتن حفاظت باید پتانسیل فولاد نسبت به الکتروود مرجع مس/سولفات مس کمتر از -۸۵۰ میلی ولت باشد. چنانچه خاک حاوی باکتری *SRB* باشد، این مقدار به کمتر از -۹۵۰ میلی ولت می رسد.



۲. معیار دانسیته جریان: اگر دانسیته جریان عبوری از مدار حفاظت کاتدی در آب دریا $50-150 \text{ mA/m}^2$ و در خاک $10-100 \text{ mA/m}^2$ باشد، حفاظت انجام می شود.

جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی فولاد

ساختار	محیط	شرایط	دانسیته جریان، mA/m^2
تانک	دفع H_2SO_4	ساکن	۵-۱۰۰۰
خطوط لوله و	زیر زمینی	ساکن	۱-۲
تانکهای ذخیره	(خاک)	حرکت	۵-۱۰
خطوط لوله	آب شیرین	حرکت کم	۱-۲
انگرمکن	آب شیرین و دفع	حرکت در اثر جبری	۶-۸
ستونها	آب دریا	ساکن	۰.۱-۱/۵
آرماتورهای بتنی	بتن		

منبع: بعضی اطلاعات داده شده از منبع زیر گرفته شده است:

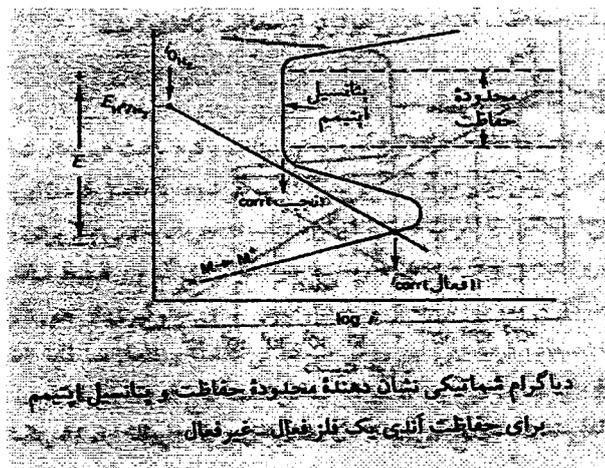
M. Stern, Principles of Cathodic Protection, Symposium on Corrosion Fundamentals, 1956:84, University of Tennessee press.

مشکلات حفاظت کاتدی:

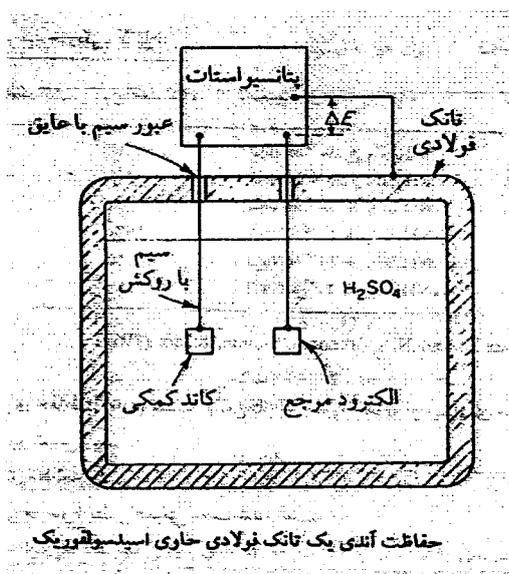
حفاظت کاتدی دو مشکل عمده دارد:

۱. حفاظت بیش از حد: اگر پتانسیل خیلی منفی شود، در سطح فلز هیدروژن متصاعد می شود که ممکن است موجب تردی هیدروژنی شود.
۲. کنده شدن پوشش: در اثر تصاعد شدید حباب های گاز هیدروژن ناشی از حفاظت بیش از حد، پوشش سطح قطعه ممکن است طبله کرده و کنده شود.

۳-۴- حفاظت آندی^۷: برخلاف حفاظت کاتدی، در این روش آنقدر پتانسیل را افزایش می دهند (مثبت تر می کنند) تا فلز در منطقه پسیو قرار بگیرد و یک لایه پسیو بر روی سطح فلز تشکیل شود. به منظور اعمال حفاظت آندی به دستگاهی الکترونیکی به نام پتانسیواستات که فلز را در یک پتانسیل ثابت نسبت به یک الکتروود مرجع نگاه می دارد، نیاز است.



از حفاظت آندی اکثراً برای کنترل خوردگی فولادهای زنگ نزن در محیط اسید سولفوریک استفاده می گردد و در سایر موارد کم کاربرد است.



مقایسه حفاظت آندی و حفاظت کاتدی:

- حفاظت آندی در مقایسه با حفاظت کاتدی روش نسبتاً جدیدتری است.
- هر فلزی قابلیت حفاظت آندی را ندارد. تنها فلزاتی که رفتار اکتیو-پسیو در یک محیط خاص داشته باشند، می توانند تحت حفاظت آندی قرار بگیرند؛ در حالی که حفاظت کاتدی برای هر فلزی در هر محیطی امکان پذیر است.
- در حفاظت آندی خوردگی هرگز متوقف نمی شود بلکه سرعت خوردگی شدیداً کاهش می یابد؛ ولیکن در حفاظت کاتدی خوردگی کاملاً متوقف می گردد.
- در حفاظت آندی قطعه مورد نظر را به قطب مثبت متصل می کنند اما در حفاظت کاتدی قطعه به قطب منفی وصل می گردد.
- در حفاظت آندی جریان هایی با مقادیر کم بکار می رود و لذا در محیط های بسیار خورنده می تواند مورد استفاده قرار بگیرد؛ در حالیکه حفاظت کاتدی در محیط های بسیار خورنده عملی نیست زیرا با افزایش خوردگی محیط، جریان الکتریکی بیشتری برای محافظت لازم است.

درس خوردگی و اکسیداسیون ۳ واحد نظری

میان ترم	۸ نمره	تا ابتدای خوردگی مرزخانه ای (حذفی به جز مسائل)
پایان ترم	۱۰ نمره	
تکلیف ، کوئیز و حضور غیاب	۲ نمره	
پروژه (تکلیف اول)	۱ نمره	اختیاری

سر فصل مطالب

- میان ترم

تعریف و اهمیت خوردگی، الکتروشیمی و خوردگی، ترمودینامیک خوردگی، دیاگرام های پوربه، سینتیک خوردگی، پسیو شدن، مواد مهندسی در خوردگی، خوردگی های یکنواخت و موضعی، سرعت خوردگی، خوردگی گالوانیک، خوردگی شیاری، خوردگی حفره ای، خوردگی رشته ای، خوردگی سایشی، حبایی شدن، خوردگی فرسایشی، خوردگی انتخابی.

- پایان ترم

خوردگی مرزخانه ای، تورقی شدن، حساس شدن، خوردگی شیاری چاقو و فساد جوش، خوردگی تنش، خستگی خوردگی، خوردگی بیولوژیک، خوردگی اتمسفری، خوردگی در دمای بالا، خوردگی در آب، روش های ارزیابی خوردگی، منحنی های پلاریزاسیون، روش های کنترل خوردگی، بازدارنده ها، حفاظت کاتدی، حفاظت آندی، پوشش دادن سطح، نقش طراحی در خوردگی، انتخاب مواد، منحنی های مرجع

مراجع مفید

- ۱- مهندسی خوردگی، نوشته پرفسور فونتانا، ترجمه دکتر ساعتچی، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۲- الکتروشیمی خوردگی، نوشته پیرون، ترجمه دکتر گلعدار، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۳- اصول خوردگی الکتروشیمیایی، نوشته استنبری، ترجمه خانم احتشام زاده، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان
- ۴- کنترل خوردگی در صنایع، تالیف دکتر سید محمد سید رضی، انجمن خوردگی ایران، ۳ جلد
- ۵- مبانی تکنولوژی خوردگی، نوشته ماتسون، ترجمه هورفر، مرکز نشر دانشگاهی

۶-ASM metals handbook 9th ed. Vol ۱۳ & Vol ۱۳A

۷- Uhlig's corrosion handbook, ۲۰۰۰

۸- Corrosion control, Uhlig

تکلیف دوم : پیل های الکتروشیمیایی

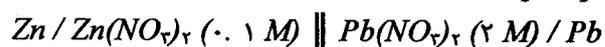
۱) پتانسیل نیم پیل الکتروکاتود اکسیژن در $pH = 2$ و اتمسفر هوا را محاسبه کنید. این مقدار در $pH = 9$ چقدر می شود؟

۲) پتانسیل نیم پیل الکتروکاتود هیدروژن در $pH = 7$ و فشار 0.5 atm و دمای 40°C چقدر است؟

۳) پتانسیل پیل زیر را حساب کنید.



۴) پیل الکتروشیمیایی زیر را در نظر بگیرید:



الف) پتانسیل پیل را حساب کنید.

ب) مشخص کنید کدام الکتروکاتود و کدام الکتروکاتود است.

۵) پیل الکتروشیمیایی زیر را در نظر بگیرید:

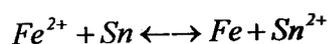


تکلیف سوم : تمایل به خوردگی

(۱) اختلاف پتانسیل پیلی متشکل از الکتروود روی (Zn) و الکتروود هیدروژن (H_2) در محلول $ZnCl_2$ ۰/۵ مولار برابر با ۰/۵۹۰ ولت می باشد. pH محلول چقدر است؟ $\gamma_{Zn^{2+}}$ در این غلظت از روی برابر با ۰/۳۸ است.

جواب: $pH = 3/3$

(۲) قوطی های کنسرو با پوشش قلع ساخته می شوند. هنگامی که در پوشش خراشی ایجاد می شود، هم قلع و هم آهن در معرض محلول قرار می گیرند. اگر یون های قلع (Sn^{2+}) و یون های آهن (Fe^{2+}) در این محلول موجود باشند، آنگاه واکنش زیر رخ می دهد.



الف) برای تعیین تمایل این واکنش در هر یک از جهت ها لازم است که مقادیر مشخص باشند. ابتدا فرض کنید که $a_{Sn^{2+}} = a_{Fe^{2+}} = 10^{-5}$ باشد. E_{cell} و ΔG را برای واکنش فوق محاسبه کنید. آیا قلع می تواند آهن را در برابر خوردگی حفاظت کند؟

جواب: $E_{cell} = -0/304 V$ ، $\Delta G = +58700 J/mole$ ، خیر آهن حفاظت نمی شود.

ب) نسبت $a_{Fe^{2+}} / a_{Sn^{2+}}$ چقدر باشد تا آهن خورده نشود.

(۳) تمایل به خوردگی مس در محلول سولفات مس بدون اکسیژن در $pH = 0$ با اکتیویته مس برابر با ۰/۱ و $P_{H_2} = 1 atm$ را محاسبه کنید. در صورتی که فشار اکسیژن $0/2 atm$ باشد، شرایط چگونه تغییر می کند؟

(۴) پتانسیل بین الکتروود نیکل در آب اکسیژن زدایی شده با $pH = 7$ را محاسبه کنید. فرض کنید محصولات خوردگی شامل H_2 و $Ni(OH)_2$ با $K_{sp} = 1/6 \times 10^{-16}$ می باشد.

جواب: $0/11 Volt$

تکلیف چهارم : سرعت خوردگی

(۱) رابطه بین ipy و mdd را بدست آورید.

(۲) وزن یک قطعه مسی به ابعاد $5 \times 8 \times 0.12 \text{ cm}^3$ بعد از ۲۰۰ ساعت غوطه وری در یک محلول خورنده، 1200 mgr کاهش یافته است. سرعت خوردگی مس در این محلول را بر حسب mpy و mm/yr حساب کنید.

(۳) می خواهیم برای نگهداری یک محلول اسیدی از یک مخزن با جداره های نیکلی به ضخامت 2 mm استفاده کنیم. در این مورد لازم است که مخزن بتواند حداقل ۲ سال در برابر خوردگی مقاوم باشد. سرعت خوردگی نیکل در این محلول باید چقدر باشد؟

(۴) برای ساخت بدنه یک پمپ که در تماس با محلول خورنده ای است، موادی از جنس فولاد کربنی و چدن خاکستری پیشنهاد شده است. در یک آزمون خوردگی، برای این دو ماده نمونه هایی به ابعاد 4 in^2 تهیه شد. بعد از ۷۲ ساعت میزان کاهش وزن نمونه های فولادی 0.095 گرم و نمونه چدنی 0.190 گرم شده است.

الف) سرعت خوردگی این دو ماده را بر حسب mpy محاسبه کنید.

ب) اگر هزینه تولید نمونه چدنی $80,000$ ریال و نمونه فولادی $150,000$ باشد، نشان دهید که برای یک دوره کاری چهار ساله کدامیک از این مواد مناسب تر است. فرض کنید که به ازای هر 0.025 in کاهش ضخامت، باید نمونه تعویض شود.

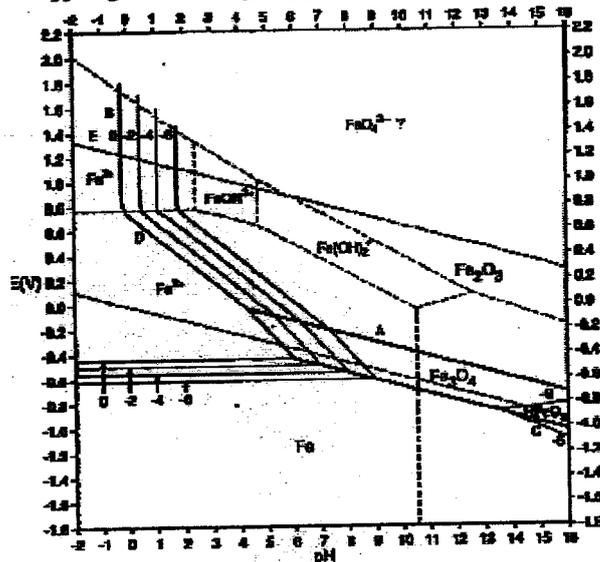
وزن مخصوص چدن خاکستری : 711 gr/cm^3

وزن مخصوص فولاد کربنی : 718 gr/cm^3

تکلیف پنجم : دیاگرام های پوربه

دیاگرام پوربه سیستم آهن / آب در شکل زیر نشان داده شده است. با استفاده از این دیاگرام به سولات زیر پاسخ دهید.
 الف) پتانسیل خوردگی آهن (E_{corr}) در محلول هوازدايي شده با pH برابر با ۷ و $a_{Fe^{2+}} = 10^{-5}$ را محاسبه کنید.
 ب) پتانسیل خوردگی آهن (E_{corr}) در محلول هوادهي شده ($P_{O_2} = 1 \text{ atm}$) با pH برابر با ۷ و $a_{Fe^{2+}} = 10^{-5}$ را محاسبه کنید.

ج) از نظر ترمودینامیکی در چه محدوده ای از pH در آب هوازدايي شده ، آهن خورده نمی شود.



تکلیف ششم: خوردگی در آب

۱) با انجام محاسبات، pH_s در آب یک سیستم خنک کننده برابر با ۴/۵ شده است. در صورتی که pH آب برابر با ۷ باشد، در رابط با خوردگی سیستم یا رسوب گذاری پیش بینی کنید.

۲) در ذیل آنالیز شیمیایی و شرایط آب مورد استفاده در یک سیستم خنک کننده مشاهده می شود. در مورد رسوب گذاری یا خوردگی آن با توجه به اندیس لانگیر یا رایزنر اظهار نظر کنید.

سختی کل: 350 mg/lit مقدار نمک محلول در آب: 750 mg/lit

قلیائیت کل: 200 mg/lit دما: 40°C

$pH = 6.18$

تکلیف هفتم: منحنی های پلاریزاسیون

(۱) در شکل زیر منحنی پلاریزاسیون برای فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در محلول اسید سولفوریک یک مولار نشان داده شده است. داده های زیر را از منحنی مذکور استخراج کنید.

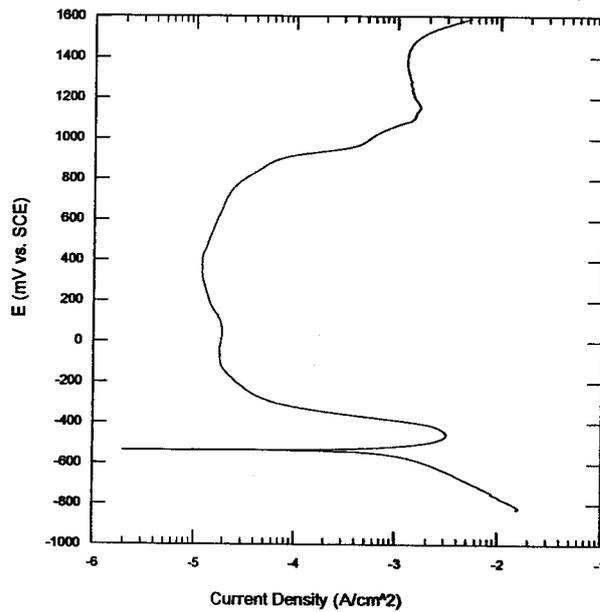
پتانسیل خوردگی، پتانسیل پسیو شدن، پتانسیل گذر از پسیو

جریان بحرانی، جریان پسیو شدن

شیب تافل آندی، شیب تافل کاتدی

جریان خوردگی، سرعت خوردگی بر حسب mpy

(فولاد زنگ نزن ۳۰۴ حاوی ۱۸ درصد کروم و ۸ درصد نیکل است)



(۲) یک پراب کنترل خوردگی، مقدار 19 mV تغییر پتانسیل در اثر اعمال جریان $5/76 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ از خود نشان می دهد.

الف) مقاومت پلاریزاسیون را حساب کنید.

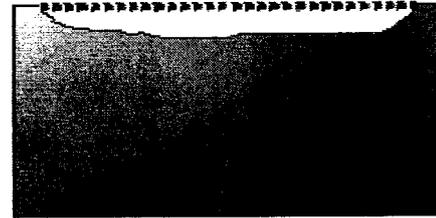
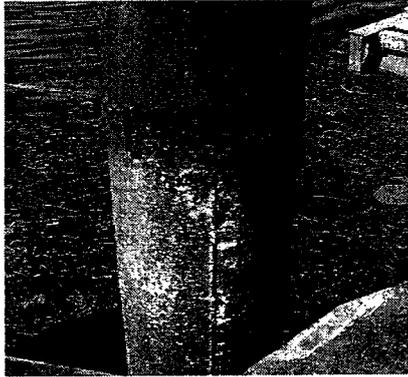
ب) جریان خوردگی (i_{corr}) را بر حسب A/cm^2 حساب کنید.

فرض کنید $\beta_a = 0.106 \text{ V/decade}$ و $\beta_c = 0.105 \text{ V/decade}$

(۳) برای منحنی پلاریزاسیون سوال اول،

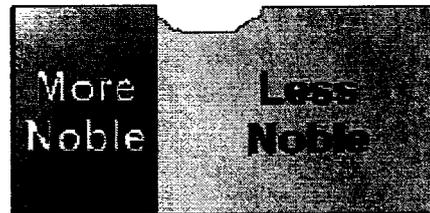
الف) در صورتی که بخواهیم با روش جریان اعمالی حفاظت کاتدی اعمال کنیم، با رسم شماتیکی از سیستم برای یک مخزن ذخیره اسید، پتانسیل مورد نیاز برای حفاظت را محاسبه کنید.

ب) برای اعمال حفاظت آندی، ضمن رسم شماتیکی از سیستم، پتانسیل حفاظت را مشخص کنید.



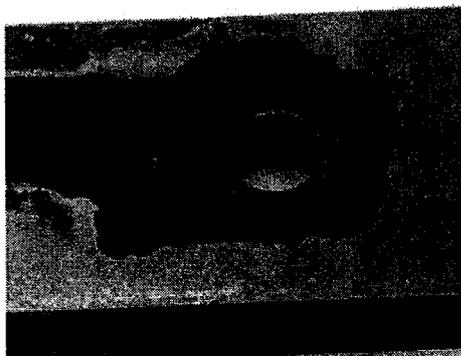
خوردگی یکنواخت

شکل (۱) خوردگی یکنواخت

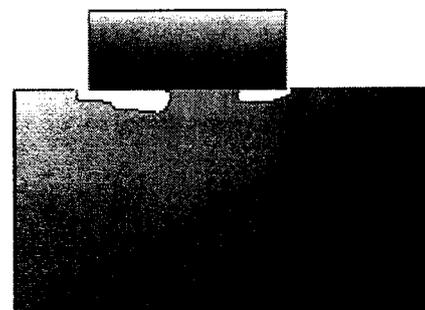


خوردگی گالوانیک

شکل (۲) خوردگی گالوانیک

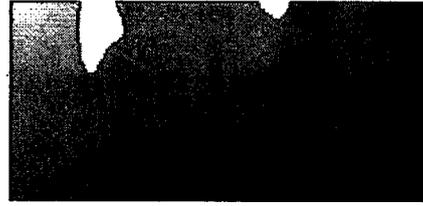


خوردگی شیاری



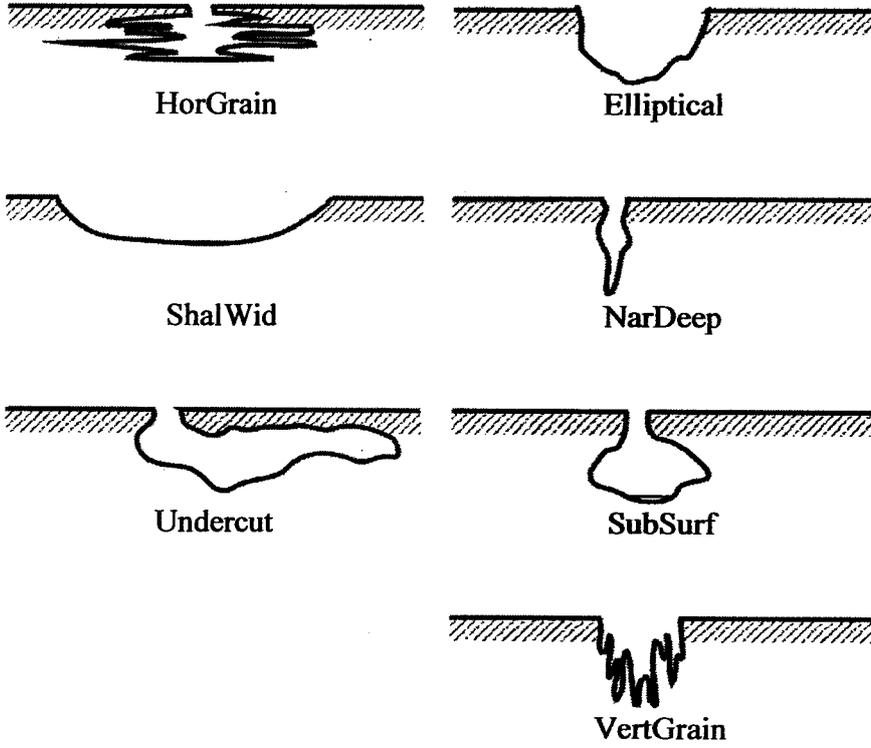
خوردگی شیاری

شکل (۳) خوردگی شیاری

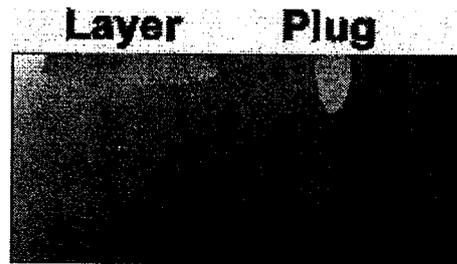
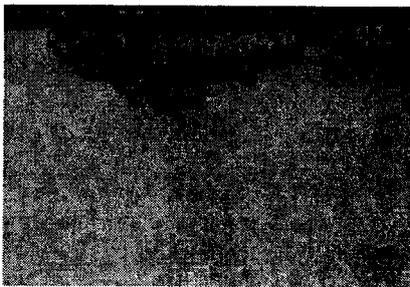


خوردگی حفره ای

شکل (۴) خوردگی حفره ای

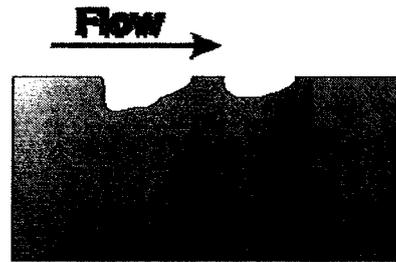
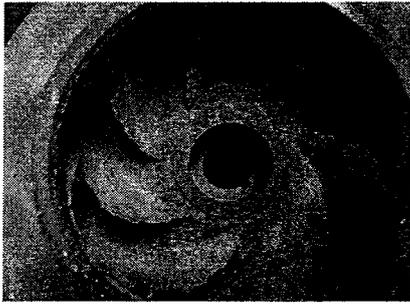


شکل (۵) انواع حفره ها در خوردگی حفره ای



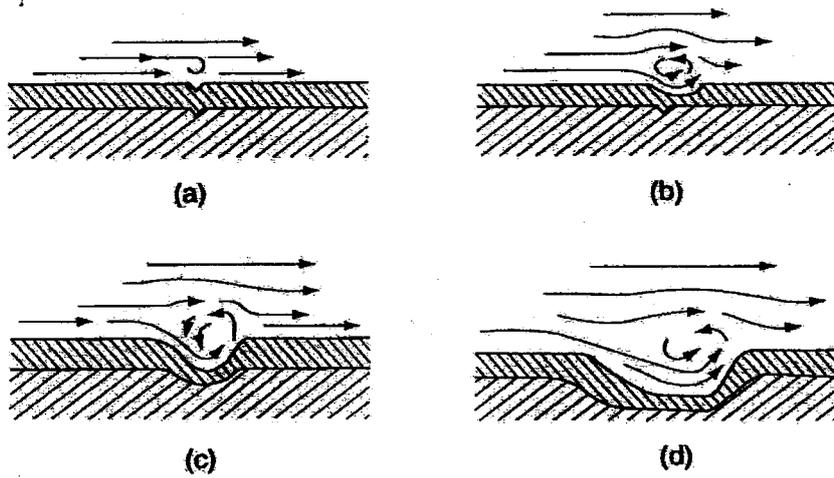
خوردگی انتخابی

شکل (۶) خوردگی انتخابی

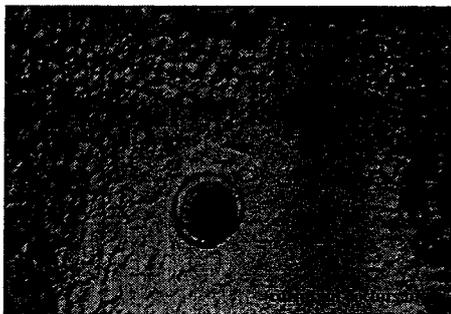


خوردگی سایشی

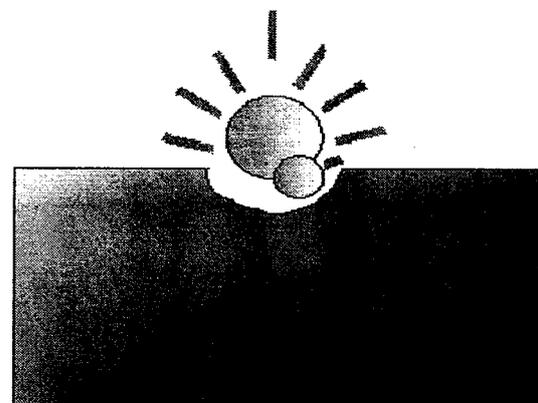
شکل (۷) خوردگی سایشی



شکل (۸) مراحل مختلف خوردگی سایشی

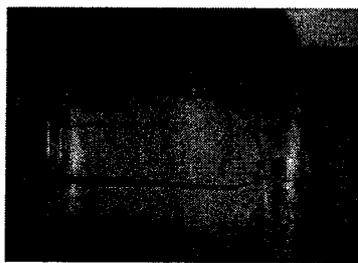


حبابی



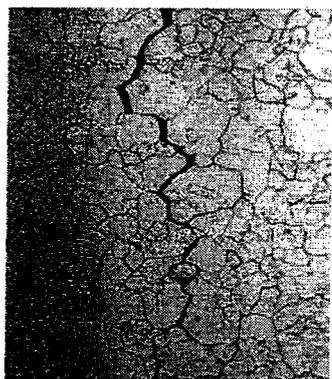
حبابی شدن

شکل (۹) حبابی شدن

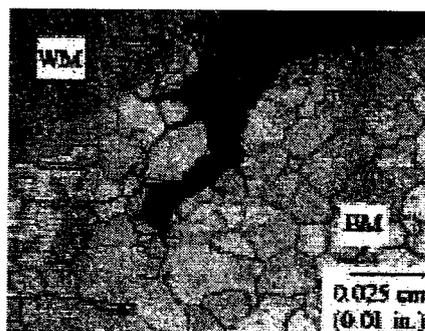


خوردگی تنشی

شکل (۱۰) خوردگی تنشی

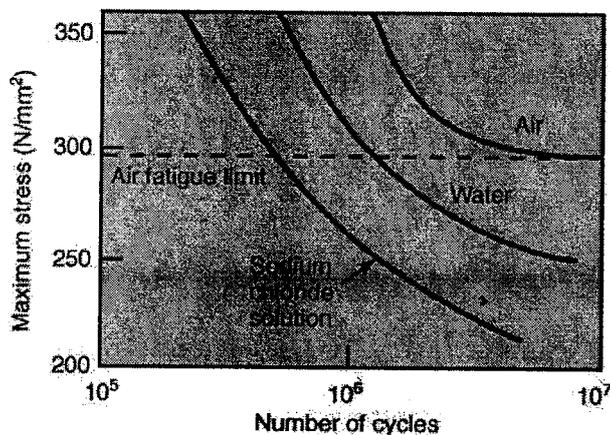


مرزدانه ای IG

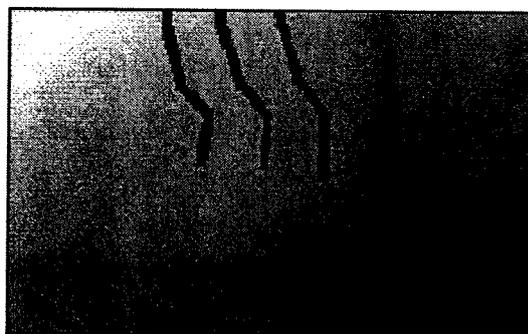


درون دانه ای TG

شکل (۱۱) انواع ترک ها

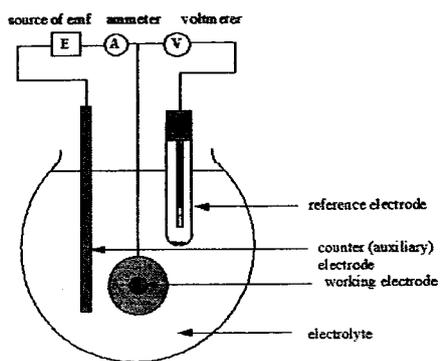


رفتار خستگی فولاد در محیط خورنده



خوردگی خستگی

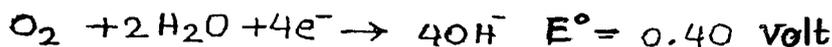
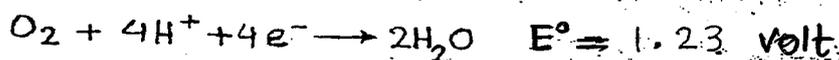
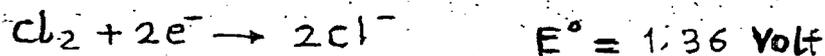
شکل (۱۲) خستگی در محیط خورنده



شکل (۱۳) شماتیکی از نحوه انجام آزمایش پلاریزاسیون خوردگی

جدول نیروی محرکه الکتریکی (emf)

واکنش الکترود	پتانسیل استاندارد به ولت (۲۰ °C)
$Au^{3+} + 3e^- = Au$	1.50
$Pt^{2+} + 2e^- = Pt$	ca. 1.2
$Pd^{2+} + 2e^- = Pd$	0.987
$Hg^{2+} + 2e^- = Hg$	0.854
$Ag^+ + e^- = Ag$	0.800
$Hg_2^{2+} + 2e^- = 2Hg$	0.789
$Cu^+ + e^- = Cu$	0.521
$Cu^{2+} + 2e^- = Cu$	0.337
$2H^+ + 2e^- = H_2$	0.000
$Pb^{2+} + 2e^- = Pb$	-0.126
$Sn^{2+} + 2e^- = Sn$	-0.136
$Mo^{3+} + 3e^- = Mo$	ca. -0.2
$Ni^{2+} + 2e^- = Ni$	-0.250
$Co^{2+} + 2e^- = Co$	-0.277
$Tl^+ + e^- = Tl$	-0.336
$In^{3+} + 3e^- = In$	-0.342
$Cd^{2+} + 2e^- = Cd$	-0.403
$Fe^{2+} + 2e^- = Fe$	-0.440
$Ga^{3+} + 3e^- = Ga$	-0.53
$Cr^{3+} + 3e^- = Cr$	-0.74
$Cr^{2+} + 2e^- = Cr$	-0.91
$Zn^{2+} + 2e^- = Zn$	-0.763
$Nb^{3+} + 3e^- = Nb$	ca. -1.1
$Mn^{2+} + 2e^- = Mn$	-1.18
$Zr^{4+} + 4e^- = Zr$	-1.53
$Ti^{2+} + 2e^- = Ti$	-1.63
$Al^{3+} + 3e^- = Al$	-1.66
$Hf^{4+} + 4e^- = Hf$	-1.70
$U^{3+} + 3e^- = U$	-1.80
$Be^{2+} + 2e^- = Be$	-1.85
$Mg^{2+} + 2e^- = Mg$	-2.37
$Na^+ + e^- = Na$	-2.71
$Ca^{2+} + 2e^- = Ca$	-2.87
$K^+ + e^- = K$	-2.93
$Li^+ + e^- = Li$	-3.05

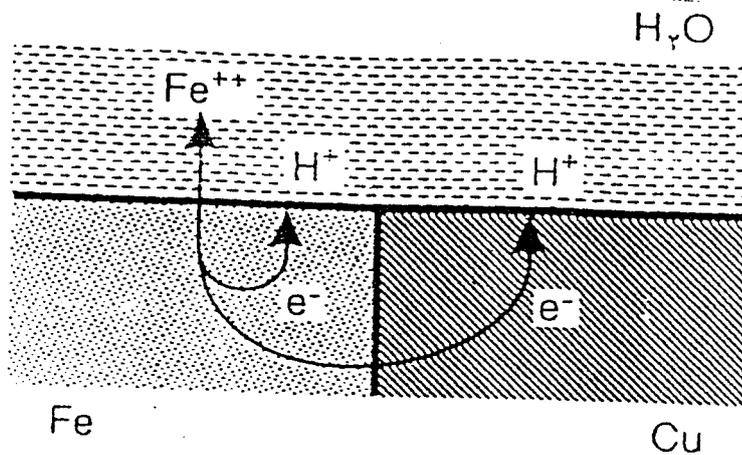


جدول تانسیون فلزات (سری گالوانیک) در آب دریا

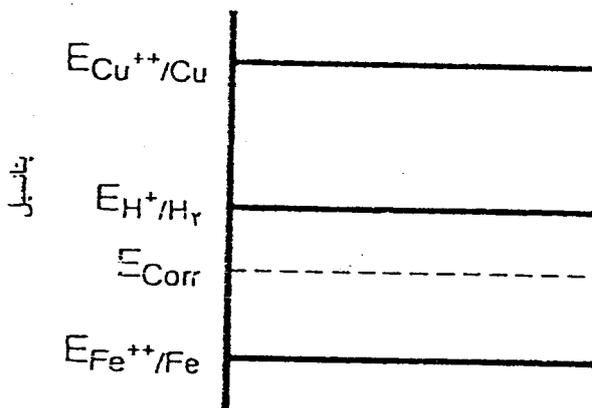
نجیب (کاتدی)

Platinum	Pt
Carbon (graphite)	C
316 stainless steel (passive)	(18Cr, 12Ni, 3Mo)
Monel	(66Ni, 29Cu, 2.8Al, 0.9Fe, 0.4Mn)
Hastelloy C	(50Ni, 17Mo, 16.5Cr, 2.5Co, 7Fe, 1Si, 1Mn, 0.3V, 0.08C)
304 stainless steel (passive)	(18Cr, 8Ni)
Titanium	Ti
Silver	Ag
Nickel-aluminum bronze	(78/81Cu, 4.5/5.5Ni, 9/10Al, 3.5/5.5Fe, 0.5/1Mn, 0.01Pb)
Inconel	(78Ni, 13.5Cr, 6Fe)
Nickel	Ni
Cupronickel	(70Cu, 30Ni)
Cupronickel	(90Cu, 10Ni)
Admiralty brass	(70/73Cu, 26/28Zn, 0.9/1.2Sn, 0.07Pb, 0.06Fe, 0.02/0.1As, Sb or P)
M bronze	86.3Cu, 4.7Sn, 4.8Zn, 3.9Pb
G bronze	88Cu, 10Sn, 2Zn
Aluminum brass	(76/79Cu, 18/22Zn, 1.8/2.5Al, 0.07Pb, 0.06Fe, 0.02/0.1As)
Red brass	(85Cu, 15Zn)
Silicon bronze	(85Cu, 5Si, 5Zn, 2.5Fe, 1.5Al, 1.5Mn, 1Sn, 0.5Pb)
Copper	Cu
Yellow brass	(65Cu, 35Zn)
Naval brass	(60Cu, 39Zn, 1Sn)
Manganese bronze	(58/65Cu, 23/39Zn, 1.4/3Fe, 0.1/3.7Mn, 0/1Sn, 0/4.5Al)
Muntz metal	(59/63Cu, 36/40Zn, 0.3Pb, 0.07Fe)
Tin	Sn
Lead	Pb
Ni resist	(65/75Fe, 13.5/17.5Ni, 5.5/7.5Cu, 3C, 1.0/2.8Si, 1.0/1.5Mn, 1.0/2.5Cr)
316 stainless steel (active)	(18Cr, 12Ni, 3Mo)
304 stainless steel (active)	(18Cr, 8Ni)
430 chromium steel	(17Cr)
410 chromium steel	(13Cr)
Cast iron	—
Wrought iron	—
Mild steel	—

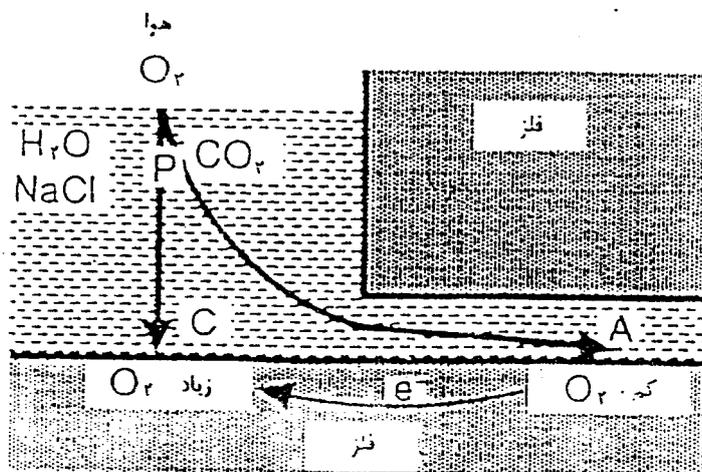
(فعال آندی)



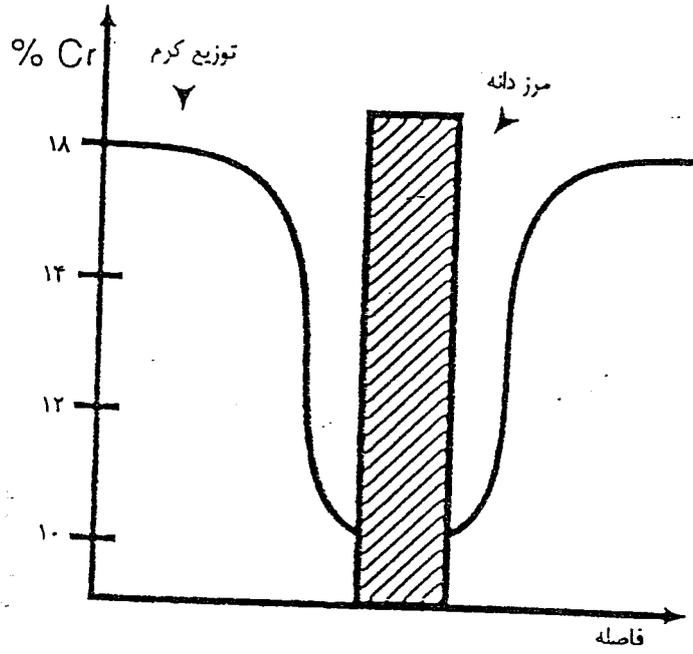
شکل (۱) شمایی از محل اتصال آهن-مس



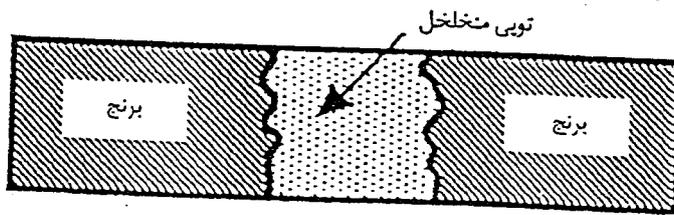
شکل (۲) شمایی از نمودار پتانسیل برای حالت خوردگی گالوانیکی



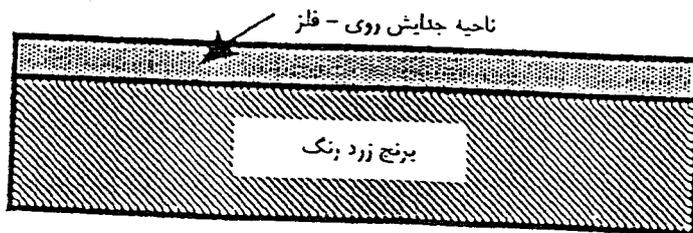
شکل (۳) خوردگی شیاری



شکل (۴) شمایی از چگونگی تغییرات غلظت کرم در حوالی مرز دانه فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در شرایط حساس شده



زدایش روی از نوع موضعی



شکل (۵) زدایش روی از نوع لایه‌ای

STANDARD REFERENCE POTENTIALS AND CONVERSION TABLE

REFERE NSI POTENTIALS

Electrode	Potential (V) @ 25°C		Thermal Temperature Coefficient ^(a) (mV/°C)
	E ^(b)	E ^(c)	
(Pt)/H ₂ (α = 1)/H ⁺ (α = 1) (SHE)	0.000	•••	+0.87
Ag/AgCl/1M KCl	+0.235	•••	+0.25
Ag/AgCl/0.6M Cl ⁻ (seawater)	+0.25	•••	•••
Ag/AgCl/0.1M Cl ⁻	+0.288	•••	+0.22
Hg/Hg ₂ Cl ₂ /sat KCl (SCE)	+0.241	+0.244	+0.22
Hg/Hg ₂ Cl ₂ /1M KCl	+0.280	+0.283	+0.59
Hg/Hg ₂ Cl ₂ /0.1M KCl	+0.334	+0.336	+0.79
Cu/CuSO ₄ sat	+0.30	•••	+0.90
Hg/HgSO ₄ /H ₂ SO ₄	+0.616	•••	+0.09

^(a)To convert from thermal to isothermal temperature coefficients, subtract 0.87 mV/°C. Thus the isothermal temperature coefficient for Ag/AgCl/1M KCl is -0.62 mV/°C.

^(b)E^(b) is the standard potential for the half cell corrected for the concentration of the ions.

^(c)E^(c) also includes the liquid junction potentials for a saturated KCl salt bridge.

CONVERSION FACTORS^(a)

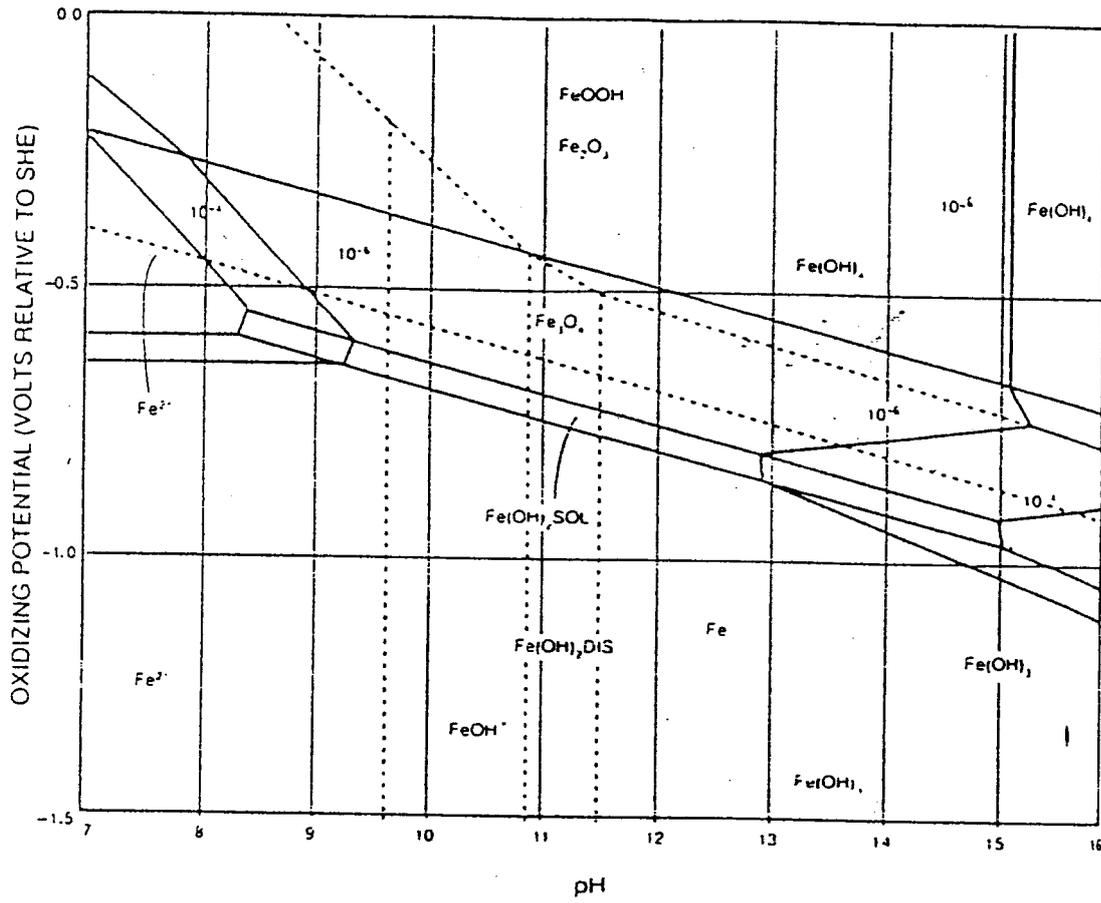
From (E')	To SHE Scale	To SCE Scale (E')
H ₂ /H ⁺	•••	-0.241
Ag/AgCl/1M KCl	+0.235	-0.006
Ag/AgCl/0.6M Cl ⁻ (seawater)	+0.25	-0.09
Ag/AgCl/0.1M Cl ⁻	+0.288	-0.047
Hg/Hg ₂ Cl ₂ /sat KCl (SCE)	+0.241	•••
Hg/Hg ₂ Cl ₂ /1M KCl	+0.280	-0.039
Hg/Hg ₂ Cl ₂ /0.1M KCl	+0.334	-0.093
Cu/CuSO ₄ sat	+0.30	-0.06
Hg/HgSO ₄ /H ₂ SO ₄	+0.616	•••

^(a)To convert from one scale to another, add the value indicated.

Example:

An electrode potential of +1.000V versus SCE would be (1.000 - 0.241) = +0.759V versus SHE. An electrode potential of -1.000V versus SCE would give (-1.000 - 0.241) = -1.241V versus SHE.

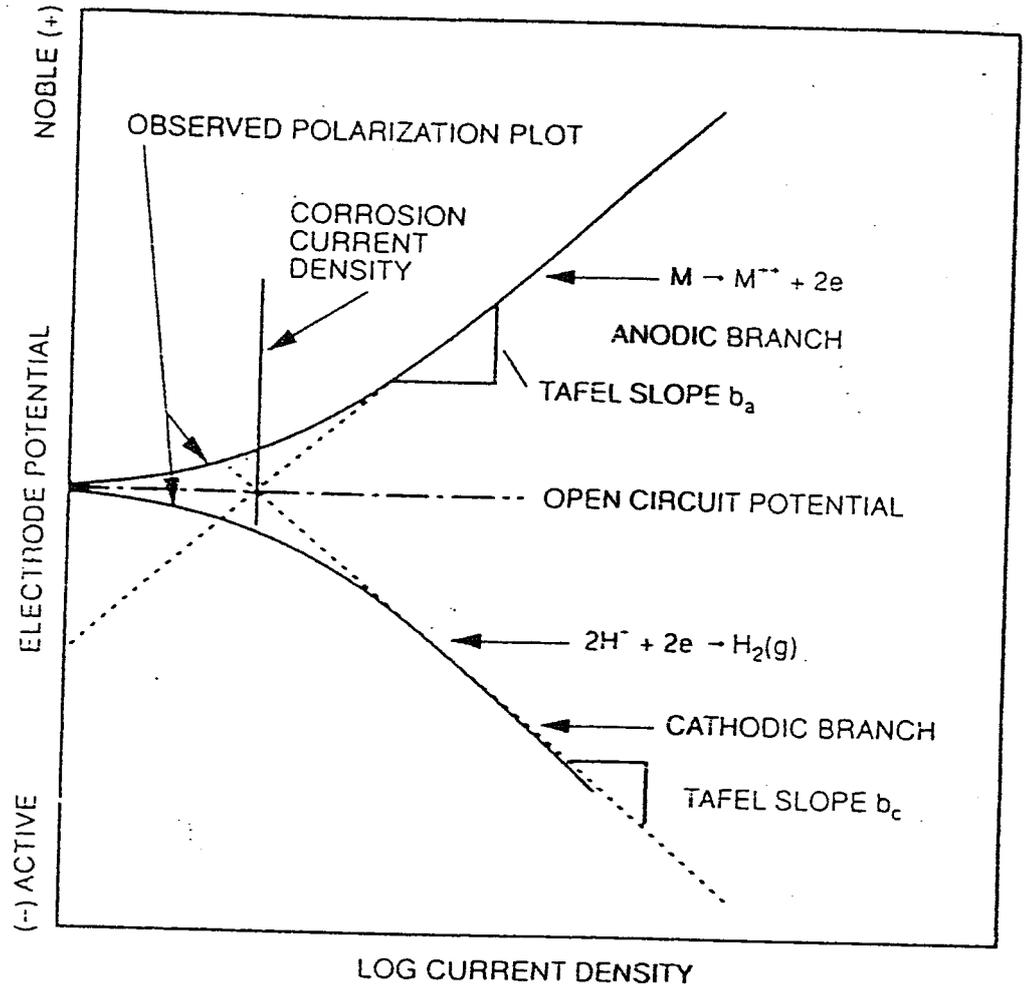
TYPICAL POTENTIAL-pH (POURBAIX) DIAGRAM
IRON IN WATER AT 25°C



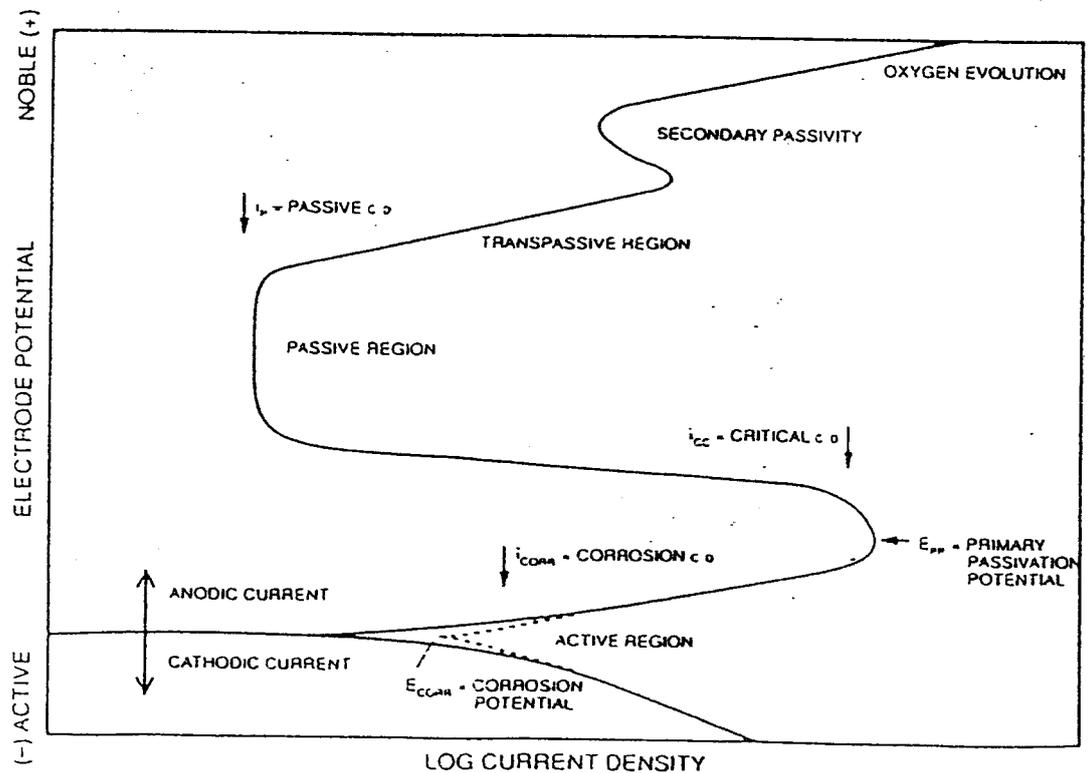
IONIC SPECIES ARE AT ACTIVITIES OF 10⁻⁴ AND 10⁻⁶

۲۰۳

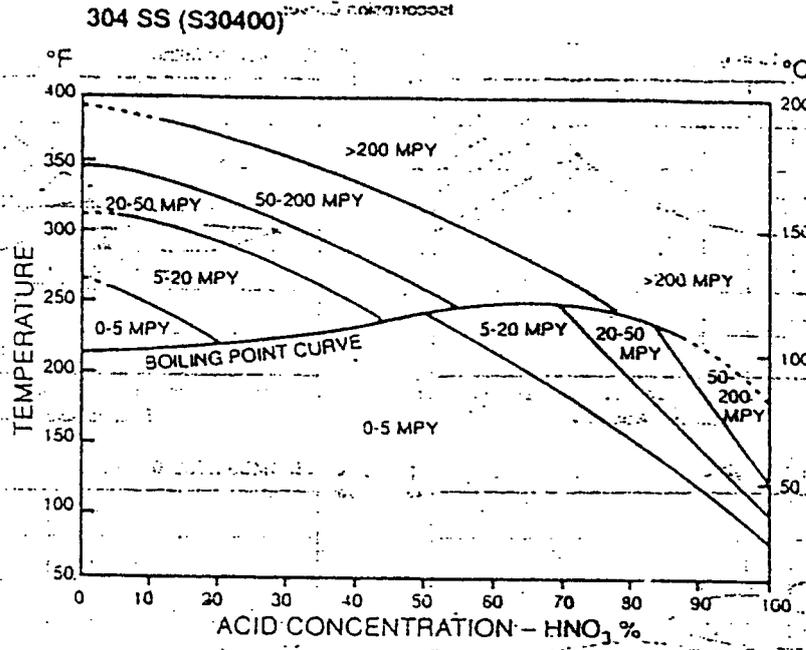
HYPOTHETICAL CATHODIC AND ANODIC POLARIZATION DIAGRAM



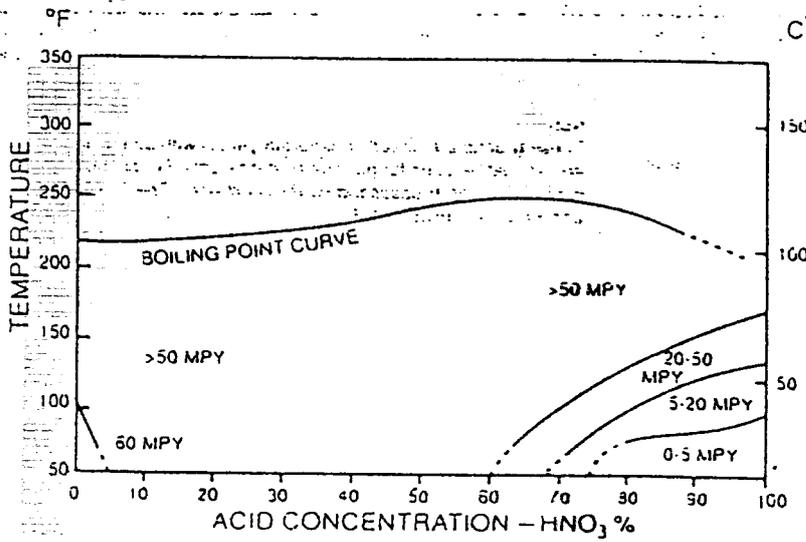
HYPOTHETICAL CATHODIC AND ANODIC POLARIZATION PLOTS FOR A PASSIVE ANODE



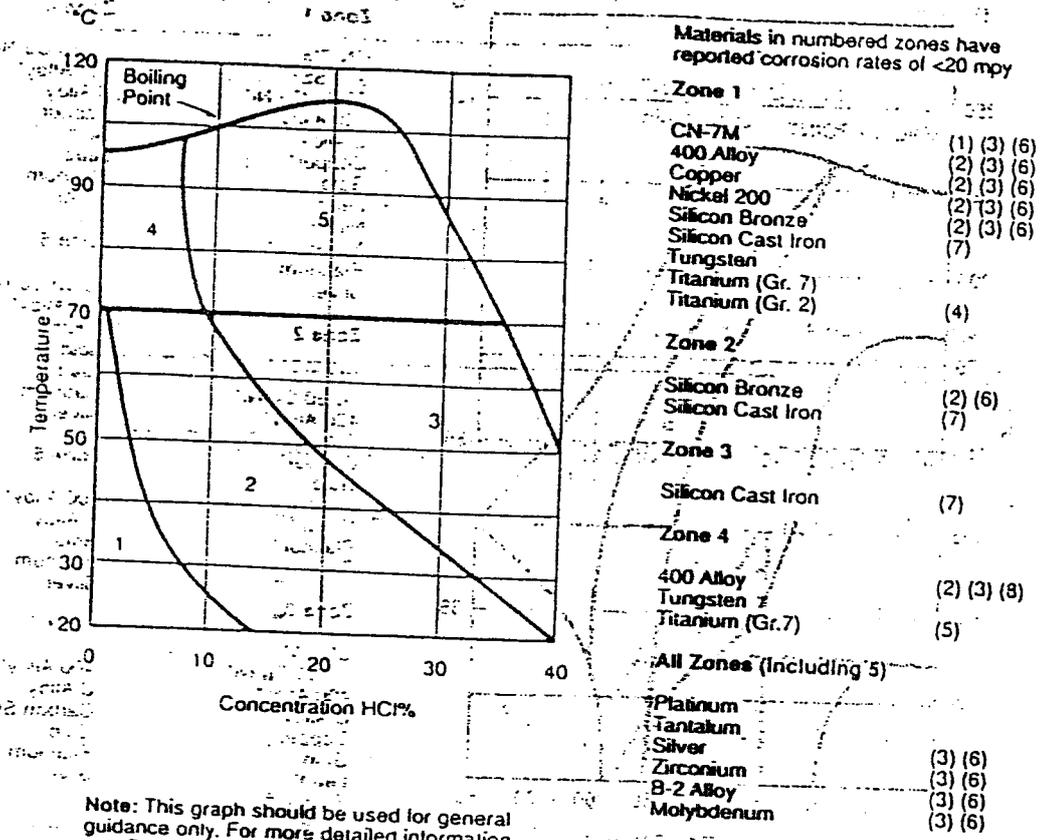
Isocorrosion Curves



ALUMINUM 1100 (A91100)



NON-FERROUS ALLOYS FOR HYDROCHLORIC ACID SERVICE



Note: This graph should be used for general guidance only. For more detailed information see *Process Industries Corrosion—The Theory and Practice* (NACE, 1986)

- Notes:
- <2% at 25°C
 - No Air
 - No FeCl₃ or CuCl₂
 - <10% at 25°C
 - <5% at B.P.
 - No Chlorine
 - Cr-Mo Alloy
 - <0.05% Concentration