

» بسم الله الرحمن الرحيم «

حنورد در فلزات

دکتر ولی الله ماندنی پور

پدیده خوردگی فلزات یکی از بزرگترین مشکلات است که جهان امروز با آن مواجه است و سالانه هزینه‌های بسیار زیادی را به کشورهای مختلف تحمیل می‌کند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که حدود چهار درصد تولید ناخالص ملی در کشورهای پیشرفته مانند آمریکا، فرانسه، انگلیس صرفاً خسارت ناشی از خوردگی می‌شود. خوردگی ناشی از آلودگی و سازه‌های فلزی علاوه بر ایجاد زیان‌های مالی، باعث تلفات انسانی نیز می‌شود. مثلاً سقوط پل سلیوربریج (به خاطر خوردگی توالم بانش) در رودخانه اوهایو به قیمت جان 40 میلیون‌ها دلار تمام شد و یا سقوط هواپیمای Boeing 747 در سال 1992 در آمریکا ناشی از خوردگی بدنه و قطعات آن‌ها بود.

پدیده خوردگی بدنه، اتصالات، سوراخ‌زدن لوله‌های آب، نفت و گاز، کاهش مقاومت بتن در اثر زنگ‌زدگی، آلودگی‌های آکسیدانسی، تخریب پل‌ها و اسکله‌ها، سوراخ‌زدن بدنه قایق‌ها و کشتی‌ها و... همگی از موارد هستند که خوردگی عامل پیدایش آن‌هاست.

* تعریف خوردگی:

خوردگی را تخریب یا فاسد شدن یک ماده در اثر واکنش با محیطی که در آن قرار دارد، تعریف می‌کنند. * لازم به ذکر است که واژه زنگ‌زدن (Rusting) فقط برای آهن و فولاد به کار می‌رود. این واژه از کلمه Rust به معنی زنگ آهن ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$) مشتق شده است. از واژه زنگ‌زدن برای فلزات

فصل دوم: اصول خوردگی

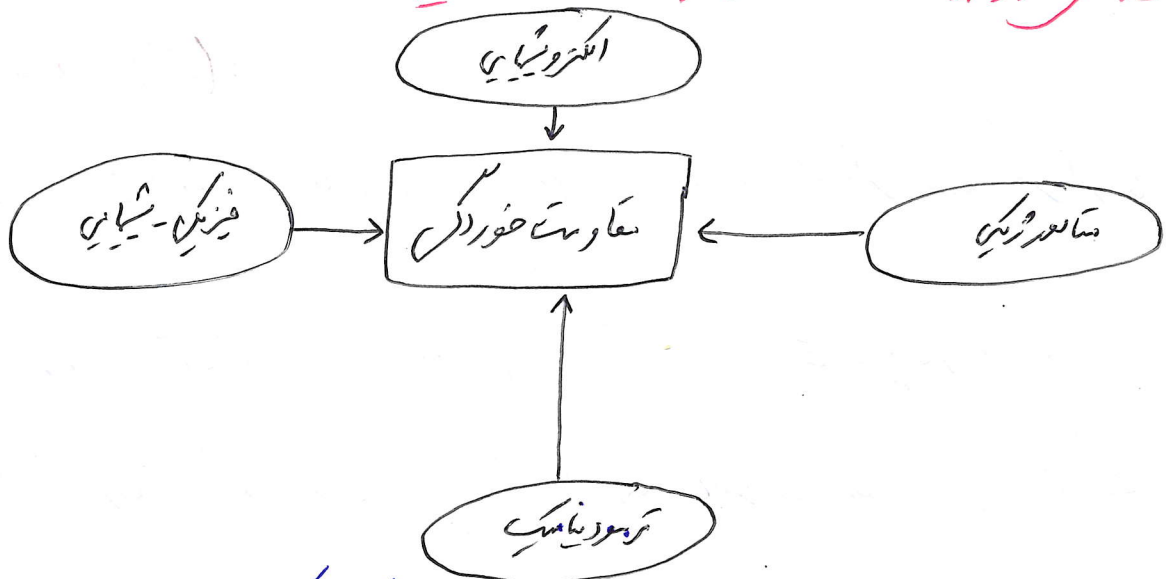
* مقدمه :

فانکورها موثر در انتخاب مواد مهندسی به صورت زیر هستند:

- قیمت
- استحکام
- قابلیت شکل پذیری
- موجود بودن
- ظاهر
- مقاومت خوردگی

* در اکثر کاربردهای مهندسی که مقاومت شیمیایی بالا مورد نیاز است قیمت و مقاومت خوردگی مهمترین فانکورها می باشند.

* فانکورها موثر بر مقاومت خوردگی یک فلز به صورت زیر هستند:



* مطالعات و محاسبات ترمودینامیکی نشان دهنده جهت انجام یک واکنش می باشد. در مورد خوردگی، قابلیت

5/ هم‌طور که مشاهده می‌شود پیل حاصله از این دو نیمه واکنش دارای مقدار پتانسیل مثبت خواهد بود و فلز آهن در این شرایط فسخ آن در دانه است و اکسید می‌شود و در عوض گاز اکسیژن در کاتد کاهش می‌یابد.

$$E_{\text{cell}}^{\circ} = E_c^{\circ} - E_a^{\circ} = 0.4 - (-0.44) = +0.84 \text{ V}$$

همچنین با توجه به فرمول $\Delta G^{\circ} = -nFE^{\circ}$ مقدار $\Delta G^{\circ} < 0$ می‌شود و واکنش خودبخود است. فلز طلا (Au) دارای E° بزرگ‌تری نسبت به E° گاز اکسیژن است ($E_{\text{Au}}^{\circ} = 1.5 \text{ V}$) بنابراین، فلز طلا در حضور اکسیژن دچار اکسایش نمی‌شود.

* ساختار اکسیدهای فلزی:

اکسید، متداول‌ترین محصول خوردگی یک فلز است. همان‌طور که در اکسید اکسیدهای فلزی دارای ساختار بلوری متنوعی می‌باشند و حتی گاهی با یک فرمول شیمیایی می‌توان برای یک اکسید چندین ساختار بلوری را انتظار داشت. به عنوان

مثال تیتانیوم (IV) اکسید (TiO_2) دارای سه ساختار بلوری است:

1. روتیل (Rutile) از نوع تراکونال

2. آناتاز (Anatase) از نوع تراکونال

3. بروکیت (Brookite) از نوع اورتورومبیک

در هر یک ساختاری که اکسید تشکیل شده روی سطح یک فلز بر روی سرعت خوردگی آن تأثیر مشخص دارد. به عنوان مثال در هر یک ساختاری Al_2O_3 به گونه‌ای است که سطح فلز آلومینیوم را در برابر خوردگی حفاظت می‌کند

به طوری که مانع نفوذ اکسیژن به سطح فلز آلومینیوم می‌شود. همچنین برخی از فلزات دارای اعداد اکسایش متنوعی می‌باشند،

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_p$$

در حالت تعادل داریم:

می:

$$\Delta G = -RT \ln K_p - RT \ln p_{O_2}$$

$$K_p = \frac{1}{p_{O_2}^{eq}} \Rightarrow \Delta G = -RT \ln \frac{1}{p_{O_2}^{eq}} - RT \ln p_{O_2}^f$$

$p_{O_2}^{eq}$: فشار تعادل O_2

$p_{O_2}^i$: فشار اکسیژن در آغاز واکنش (فشار محیط)

* اگر $p^i = p^{eq}$ باشد آنگاه داریم:

$$\Delta G = RT \ln 1 \Rightarrow \Delta G = 0$$

فلز و اکسید فلز در حالت تعادل بوده و هر دو پایدارند

* اگر $p^{eq} > p^i$ باشد آنگاه اکسید فلز تجزیه می شود. این فشار برای p^i که به موازات است را

فشار تنگی اکسید می نامند. در این حالت برای رسیدن به تعادل و مساوی شدن p^i و p^{eq} باید مقداری

اکسید MO_2 تجزیه شود و گاز O_2 آزاد گردد. مقدار فشار تنگی برابر اکسیدها و مختلف یک فلز دارای مقدار

متفاوتی است. به عنوان مثال، در یک دما، معین، فشار تنگی برای اکسیدهای FeO ، Fe_2O_3 و

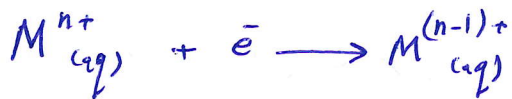
Fe_3O_4 با هم متفاوت است. معمولاً اکسید که از لحاظ استوکیومتری اکسیژن بیشتری دارد به اکسید تبدیل می شود

که نسبت اکسیژن کمتری دارد. معمولاً در این حالت فلز خالص تولید نمی شود.

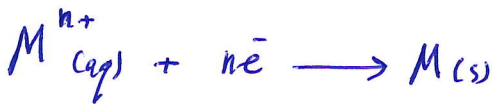
* نکته جالب در مورد فلز طلا و صیقل دارد. برای فلز طلا فشار جزئی O_2 موجود در هوا برای تشکیل اکسید در دماهای اتاق

بسیار کم است، بنابراین طلا در این شرایط اکسید نمی شود ($p^i \gg p^{eq}$).

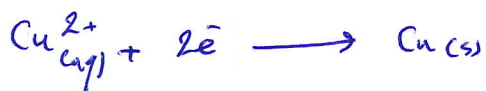
ب) احیاء یون فلز و تبدیل آن به یون با بار مثبت کمتر



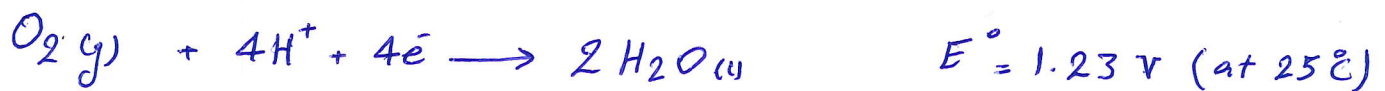
ج) احیاء یون فلز و تبدیل آن به فلز (در این حالت فلز بر سطح کاتد رسوب می‌کند). این حالت مثلاً به عمل الکترولیز



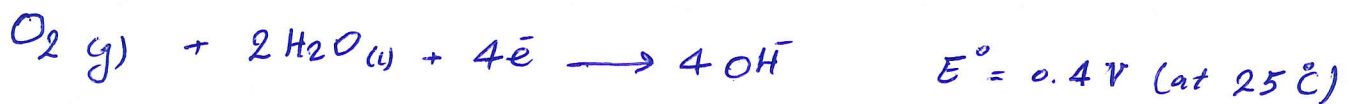
(آبکاری فلزات) است.



د) احیاء اکسید در حالتی که محلول (الکترولیت) اسیدریک است (محیط اسیدی).



و) احیاء اکسید در حالتی که محلول (الکترولیت) خنثی یا قلیایی است (محیط خنثی یا محیط قلیایی)

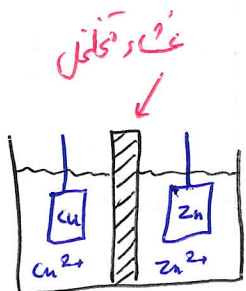


* پلازیما یون و ولتاژ مازاد (overvoltage and polarization):

اختلاف بین پتانسیل شار تعادل یک الکترود در حالت بدون عبور جریان (E_0) و در حالتی که از آن جریان عبور

می‌کند (E_i) را پلازیما یون الکترود می‌نامند.

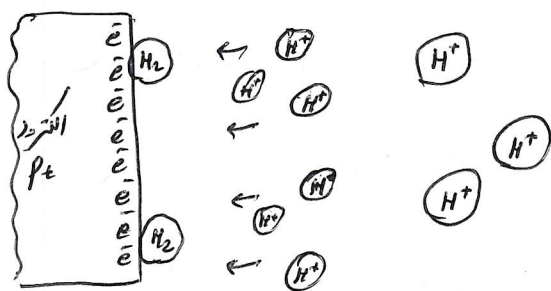
در سیستم زیر جریان از الکترودها عبور نمی‌کند:



چون کاتد و آنود این پیل از طریق یک سیستم هادی به هم اتصال ندارند، پس جریان در مدار وجود ندارد ($i=0$).

پتانسیل هر یک از این دو الکترود را در این حالت با E_0 نمایش می‌دهیم. در این حالت سیستم در حالت برگشت پذیر (reversible) است.

پله پوزاسیون غلظتی به واکنش های الکترونیایی که بر سطح نفوذ (diffusion) در الکترولیت (محلول) کنترل می شود، اطلاق می گردد. این نوع پله پوزاسیون هنگامی اهمیت دارد که غلظت یون که تراکم است در کاتد ایجاد شود، کم باشد. به عنوان مثال، در یک محلول اسید رقیق، غلظت یون H^+ کم است. در این حالت، سرعت ایجاد یون H^+ در کاتد نمی تواند بیش از سرعت نفوذ یون های H^+ به سطح الکترود کاتد باشد. در نتیجه، سرعت واکنش توسط نفوذ H^+ به سطح الکترود کنترل می شود. بنابراین پله پوزاسیون غلظتی فقط در واکنش های کاتدی (واکنش های ایجاد یک یون) اهمیت دارد. شکل زیر تجسم از نفوذ یون H^+ به سمت کاتد و احیاء آن را نشان می دهد:



* اگر یک محلول رقیق حاوی یون که واکنش در کاتد ایجاد شود را به هم بزنیم، در نتیجه این عمل، سرعت رسیدن یون مورد نظر به سطح کاتد افزایش می یابد. در این حالت، پله پوزاسیون غلظتی کم می شود. بنابراین، اگر محیط خورنده ای که در محلول یک فلز قرار دارد دارای تله طم باشد، به علت کاهش پله پوزاسیون غلظتی، سرعت خوردگی افزایش می یابد.

* جریان حد نفوذ (I_L) را برای یک سیستم حاوی یون مورد نظر و الکترود کاتد را می توان به کمک فرمول زیر محاسب کرد:

$$I_L = \frac{D \gamma F C_B}{x}$$

D : ضریب نفوذ یون مورد نظر

C_B : غلظت یون در محیط الکترولیت

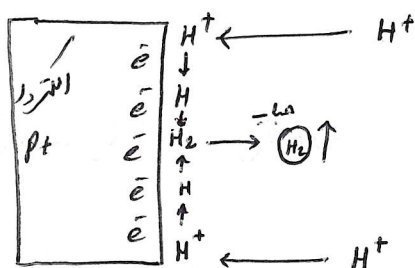
x : ضخامت لایه ای که نفوذ در آن صورت می گیرد (به صورت تجربی تعیین می شود)

F : ثابت فارادی

γ : ضریب فعالیت

13 / آندس) این نوع پلازما یون ریخ دهد. مقدار η در واکنش کاتدرویا آندریه به هم وزن اکترولیت (تلاطم محیط

عورنده) شبیه ندارد.



و واکنش امپاء H^+ و آزاد شدن گاز H_2 از سطح این الکتروا

دایار مراحل زیر است:

(a) ابتدا یون H^+ جذب سطح الکتروا میشود.

(b) سپس H^+ یک الکترون گرفته و امپاء می شود. در نتیجه این عمل، اتم هیدروژن ایجاد می شود.

(c) دو اتم H در سطح الکتروا به هم ترکیب شده و یک مولکول H_2 ایجاد می شود.

(d) مولکول های H_2 کنار هم جمع شده و یک حباب گاز هیدروژن در سطح الکتروا تشکیل شده و پس حباب

آزاد می شود.

* نتایج تجربی نشان می دهد که کندترین مرحله (RDS) در واکنش فوق ممکن است مرحله 2 یا 3 باشد. بنابراین

در این واکنش، پلازما یون ریخ دهد.

* اثر نوع محیط بر انجام یک واکنش خوراک

نوع محیط (اکترولیت) بر روی انجام یک واکنش خوراک و سرعت وقوع آن به شدت مؤثر است. به مثال های زیر

توجه کنید:

اگر قطعه ای از فلز Zn را در HCl فاقداکسین (یعنی محلول HCl که آن را اکسین زدایر نموده اند) قرار



دهیم، واکنش های کاتدی و آندری به صورت زیر است:



پاسیو شدن، گاهی اوقات در تعریف یک فلز به خوردگی شدن است که بر اثر تشکیل یک لایه محافظه‌آمیز محصول خوردگی روی سطح دهد. به عبارت دیگر در این پدیده میل به اکسید شدن فلز کاهش می‌یابد و رفتار فلز عوض شده و نجیب می‌شود. در اثر پاسیو شدن مقاومت فلز در برابر خوردگی زیاد می‌شود. فلزاتی مانند آهن، نیکل، کروم، تیتان و آلومینا از جمله مواردی هستند که می‌توانند این رفتار را از خود نشان داده و پاسیو شوند. این نوع فلزات را فلزات پاسیو نیز (passivity metals) می‌نامند. دو نوع است:

۱. پاسیویتی طبیعی:

این پدیده در فلزات پاسیو پذیر رخ می‌دهد. مخصوص در فلزات واسطه (لایه 10^{-2} تا 10^{-3} cm) مانند گروه آهن، کروم، Pb ، Cr ، Mo ، Zr ، Ti و برخی فلزات اصلی مانند Al . این پاسیو شدن ناشی از تشکیل یک فیلم اکسید نازک، نامرئی (1-10 nm)، پیرسنا، یکنواخت و متراکم روی سطح فلز است. در نتیجه این عمل، پتانسیل اکترود فلز به میزان (2V-0.5) به سمت مثبت تغییر می‌کند. برای تشکیل این فیلم باید فلز در معرض اکسیرن و یا محلول حاوی O_2 قرار گیرد. فیلم‌های اکسید در این حالت نامحلولند و قادر به ترمیم خود (self healing) هستند (یعنی خود ترمیم هستند و اگر ترک بخورند و یا سست شوند خوردگی را ترمیم می‌کنند).

۲. پاسیویتی مکانیکی:

این نوع پاسیویتی می‌تواند بر اثر تمام فلزات رخ دهد. سطح هر فلزی در شرایط اتمسفری از یک فیلم حاوی نمک‌ها و سایر

محلول (اقرایی غلظت آن) خوردگی دوباره زیاد می شود. در این منطقه پسته اکسید شروع به از بین رفتن می کند و اقرایی شدید در سرعت خوردگی مشاهده می شود.

* در مورد آهن در محلول 1M از H_2SO_4 روند مشاهده شده به صورت زیر است:

با اقرایی پتانسیل، جریان خالص آندی زیاد نگردد و سرعت خوردگی زیاد می شود. محصول خوردگی $FeSO_4$ است که در الکترولیت حل می شود. اگر مقدار این ترکیب ($FeSO_4$) زیاد شود، می تواند به حالت اشباع برسد و یک جابجایی متخلخل و نازک مانند $FeSO_4$ روی آهن تشکیل می شود.

اگر یک اکسید مانند اکسید آهن به محیط اضافه شود، یک لایه نازک از اکسید آهن (III) تشکیل می شود که به صورت یک لایه نازک و یکپارچه روی آهن را می پوشاند و چون خوردگی به شدت کاهش می یابد، در این حالت یون ها را آهن باید از این لایه اکسید عبور کنند، پس سرعت خوردگی کم می شود و در نهایت به یک جریان ثابت می رسیم. پتانسیل لازم برای رساندن فلز از حالت فعال (active) به حالت غیر فعال (passive) را پتانسیل پاسیو شدن (passivation potential) می گویند و به pH وابسته است. با اقرایی دادن پتانسیل به حالت ترانس پاسیو می رسیم که سرعت خوردگی مجدداً زیاد می شود.

* فلزات کروم و نیکل سریع تر و راحت تر از آهن به حالت پاسیو می رسند. در نتیجه، از آن ها برای تولید آلیاژ با آهن استفاده می شود و فولاد زنگ نزن تولید می شود.

* اقرایی Si، Cu و Mo به فولاد باعث کاهش شدید جریان پاسیو شدن و حفاظت محتری را برای فولاد ایجاد می کند.

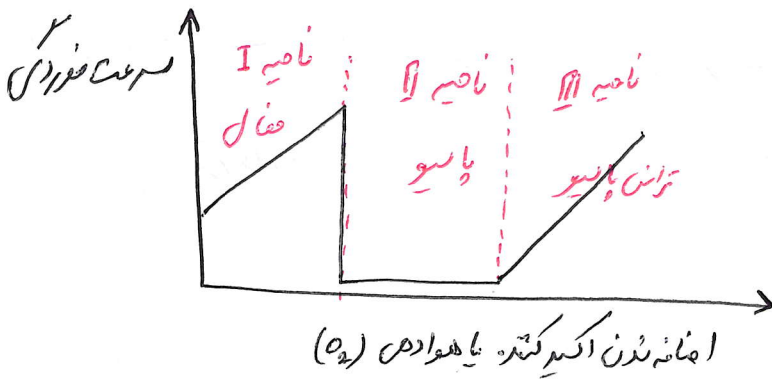
* تبدیل به حالت فعال به پاسیو به ترانس پاسیو ناشی از پلوریزاسیون فعالیت یا اکسیداسیون است.

* واحدهای گزارش خوردگی (اندازه گیری سرعت خوردگی):

میزان خوردگی را می توان بر حسب ضخامت خورد شده از فلز و یا کاهش وزن فلز از زمان خورد، اما کمیت متداول

☆ اثر عوامل محیطی بر سرعت خوردگی:

۱. اکسیرن یا مواد اکسند:



☆ فلزات مختلف در این شرایط رفتارهای متفاوتی از خود نشان می دهند:

نامیه I: آهن در $H_2O + O_2$ اکسید می شود. در $H_2SO_4 + O_2$ من در حالت فعال حکمفرماست و فلز با افزایش ماده اکسید کننده و یا اکسیرن با سرعت بیشتر خورد می شود.

نامیه II: فولاد 18-8 ($1/8 Ni, 1/8 Cr$) در HNO_3 حکمفرماست و خوردگی رخ نمی دهد. هیتول C ($1/15 Mo, 1/17 Cr, 1/62 Ni$) در Fed_3 در حالت II پاسیو (غیر فعال) قرار می گیرد.

نامیه I, II: فولاد 18-8 در $H_2SO_4 + Fe^{3+}$ و تیتانیوم در $HCl + Cu^{2+}$ به حالت II پاسیو می رود. در این حالت فلز ابتدا حالت فعال داشته و پس به حالت II پاسیو می رود.

نامیه II و III: فولاد 18-8 در $HNO_3 + Cr_2O_3$ در این نامیه ابتدا فلز حالت II پاسیو دارد و بعد وارد حالت ترانس می شود و خوردگی به شدت افزایش می یابد.

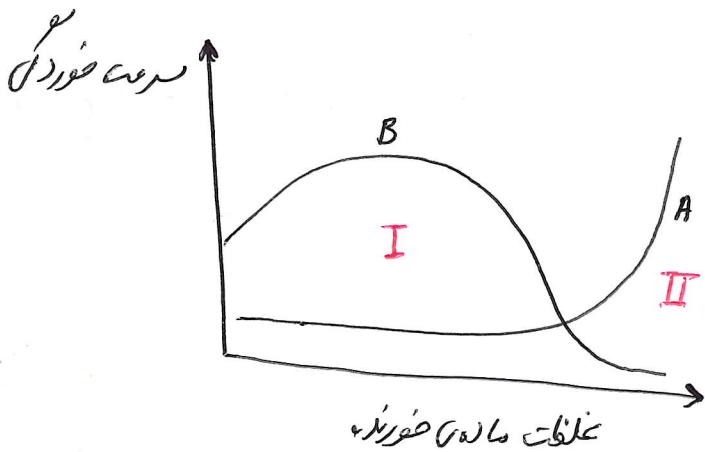
نامیه I, II, III: فولاد 18-8 در مخلوط غلیظ $H_2SO_4 + HNO_3$ در III پاسیو قرار می گیرد. در این حالت هر سه حالت فعال \leftarrow III پاسیو \leftarrow ترانس \leftarrow II پاسیو به ترتیب رخ می دهند.



* در حالت A با افزایش پتانسیل، سرعت خوردگی زیاد می شود
(به صورت فیلر سریع و نمایی (exponential))

* در حالت B، ابتدا افزایش پتانسیل سرعت خوردگی را افزایش می دهد و پس در پتانسیل های بالا، سرعت خوردگی ناگهان به قدری زیاد می شود که به عنوان مثال، فولاد زنگ زده 8-18 درصد HNO_3 این حالت را نشان می دهد. افزایش پتانسیل باعث افزایش قدری اکسید شدن HNO_3 شده و سرعت خوردگی در یک ناحیه خاص ناگهان زیاد می شود.

* اثر غلظت محلول خوردنده (اکترولیت):



* در حالت A با افزایش غلظت ماده خوردنده،
پوسته محافظ فلز حل شده و سرعت خوردگی
زیاد می شود. مثلاً $PbSO_4$ در H_2SO_4 غلیظ

حل می شود ولی در محلول رقیق این اسید نامحلول است.

* حالت B، اسیدها که به هر غلظتی در آب قابل حل هستند و تولید حالت B را ایجاد کنند. ابتدا با افزایش غلظت محلول

خوردنده (اکترولیت)، سرعت خوردگی نیز زیاد می شود زیرا غلظت H^+ زیاد می شود. اما با ادامه افزایش غلظت اسید

سرعت خوردگی به یک ماکزیمم رسیده و پس کاهش می یابد. زیرا در غلظت بالا اسیدها، یون های کاهنده یافته و

غلظت H^+ کم می شود و در نتیجه، سرعت خوردگی افت می کند.

فصل چهارم: انواع خوردگی

۱. خوردگی یکنواخت یا سرتاسری (Uniform corrosion or uniform attack):

این نوع خوردگی از معمول ترین و متداول ترین انواع خوردگی است که در اکثر یک واکنش الکتروشیمیایی یا شیمیایی به صورت

یکنواخت در سرتاسر سطح فلز که با محلول (محیط) خورنده در تماس است، رخ می دهد. در اثر این عمل، ضخامت فلز

کاملاً یکنواخت و به مرور فلز از سطحش می رود. در این نوع خوردگی همیشه لایه سطحی فلز مورد حمله قرار می گیرد و رنگ سطح فلز

عوض می شود. با قرار دادن یک قطعه فلز در یک محیط خورنده می توان طول عمر آن قطعه را حدس زد. در این نوع خوردگی

معمولاً کاملاً ضخامت فلز در تمام سطح آن یک (تقریباً یک) است. مانند خوردگی در فولاد، کدر شدن

ظروف تقوای و ...

اگر خوردگی الکتروشیمیایی سرتاسری رخ دهد، آنجا پتانسیل در سراسر سطح فلز یک به یک بوده و مقدار ثابت خواهد بود.

عوامل از فلز نیز در همه جا مساوی است. در این نوع خوردگی:

۱. آند و کاتد لزوم مجزا نمی باشند.

۲. پتانسیل آند = پتانسیل کاتد = پتانسیل خوردگی (چون آند و کاتد لزوم جدا نمی باشند)

۳. محصوره خوردگی می تواند در سطح فلز یک ضمیمه محافظه تشکیل دهد.

۴. سطح کاتد = سطح آند است.

۵. خوردگی به صورت یکنواخت و سراسری ظاهر می شود.

۶. سرعت خوردگی در کلیه نقاط فلز یک است.

۷. ماهیت آند و کاتد می تواند به صورت دائمی تغییر کند.

جدول کالوایسکری صغیر فلزات در کالوایسکری ها و جدول در محیط آب شور دریا

بلایسین

طلا

سکرافیت

تیتانیوم

نقره

کرمیت 3

هاتولر C

فولاد رنگ ترن 18-8 مولیدن (غرفال)

انگونی (غرفال)

نیکل

محکم نقره

مونی (7. نیکل، 3. مس)

کوپر و نیکل ها

برترها (مس و قلع)

مس

برنج ها (مس و برنج)

کرمیت 2

هاتولر

انگونی (غرفال)

نیکل (غرفال)

قلع

سرب

لیم سرب - قلع

فولاد رنگ ترن 18-8 مولیدن (غرفال)

فولاد رنگ ترن 18-8 (غرفال)

چدن برنیکل

فولاد رنگ ترن کرم دار، 13. کرم (غرفال)

چدن

فولاد یا آهن

آلومینیوم 2024

کادسیم

آلومینیوم خالص تجاری

مشرقی و غربی

نجیب یا کاندن

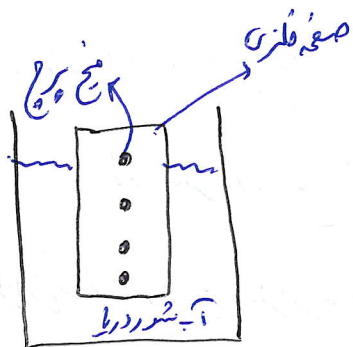
فولاد یا کاندن

* اگر سطح کانه و آند در خوردگی کالوئیدیک فوق العاده مؤثر است.

اگر کانه دارای سطح بزرگی باشد (مساحت کانه زیاد باشد) و آند دارای سطح کوچکی باشد (به طوریکه $\frac{A}{m^2}$) در منطقه آند، پتانسیل است، بنابراین \gg مساحت کانه / مساحت آند

باید هم نگاه به ازای یک جریان معین، چون دانسته می‌باشد $\left(\frac{A}{m^2}\right)$ در منطقه آند، پتانسیل است، بنابراین سرعت خوردگی بسیار زیاد می‌شود. در این حالت، سرعت خوردگی صدها تا هزاران برابر افزایش می‌یابد.

* در کدام حالت سرعت خوردگی کالوئیدیک بسیار بالاست؟



1. صفحه از جنس فولاد و مخ پرچ حاوی زینک است

2. صفحه از جنس مس و مخ پرچ حاوی زینک فولاد

* در مواردی که بخواهیم دو فلز فعال را به هم وصل کنیم، با پتانسیل پرچ و مخ یا هم جوش از جنس انتخاب شود که نسبت به این دو فلز فعال نقش کانه داشته باشد و اگر از دو جنس هستند نسبت به یک نقش کانه را داشته باشد. در این حالت چون سطح آند نسبت به کانه خیلی بزرگ است، سرعت خوردگی بسیار ناچیز می‌شود. در صورتی که این نکته را رعایت نکنیم چون سطح آند خیلی کوچک تر از سطح کانه می‌شود، سرعت خوردگی به شدت بالا می‌رود و این اتفاقات پس از مدت کوتاهی از بین می‌روند.

* اگر در یک عملیات رنگ آمیزی و پولیش دهی قرار باشد که فقط سطح یک فلز دو فلز مختلف را که با هم در تماس هستند، پولیش دهیم، آیا باید فلز نجیب تر را پولیش دهیم یا فلز فعال تر؟ چرا؟

پولیش فلز نجیب تر، زیرا با این کار سطح کانه را کاهش می‌دهیم و در نتیجه نسبت سطح آند خیلی بزرگ می‌شود و دانسته می‌باشد که این ناچیز می‌شود و سرعت خوردگی به شدت کاهش می‌یابد.

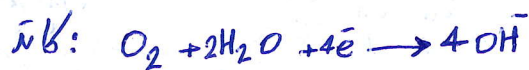
نقره سولفید Ag_2S به فلز Ag می‌نهد، بدون آنکه نقره از سطح ظرف جدا شود و در درود. بعد از گذشت 29 روز مناسب، ظروف نقره‌ای را خارج کرده و با آب گرم و صابون بشوید و آب کش کنید. (فلز جادویی که در بازار بر این تمیز ظرف نقره به فروش می‌رسد، در اصل Al یا Mg است)

3. خوردگی شیار، شکاف، درزی، واسره یا لکه‌ای (Crevice corrosion, Gasket corrosion, ^{Deposit} Corrosion):
اگر شیارها و نواحی از سطح فلز که حالت ساکن و مرده دارند، در معرض محیط خوردنده قرار بگیرند، دچار یک خوردگی موضعی (ای ۱۰) بسیار شدید شوند که بسیار خطرناک است. این نوع خوردگی را خوردگی شیار (crevice) می‌نامند. این خوردگی عموماً در مکان‌های زیر رخ می‌دهند:

زیر رسوبات (مثلاً رسوب‌های کربنات در دیگ‌های آب داغ و آب گرم‌کن‌ها)، زیر واسرها، زیر پوشش‌ها (مانند رنگ و قیر)، در شکاف‌ها و درزهای ریز، شیارهای زیر پیچ و مهره، زیر مخ‌های دریچه، در سطح تماس فلز-فلز، فلز-چوب، فلز-پن، فلز-سین، فلز-لاستیک و پلاستیک.

مکانیم جالبی برای خوردگی شیار پیشنهاد شده است. در این مکانیم، ابتدا محلول الکترولیت (مثلاً آب شور دریا) وارد

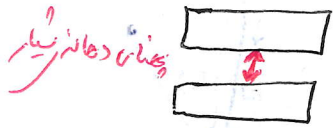
شکاف مورد نظر شده و واکنش‌های زیر در آنجا رخ می‌دهد:



بعد از مدتی چون محلول داخل این شیار حالت ساکن دارد و جریان ندارد، پس اکسیدن موجود در آن تمام می‌شود. در نتیجه، واکنش احیاء اکسیدن در کاتد به اتمام رسیده و متوقف می‌شود. اما واکنش اکسایش فلز همچنان ادامه می‌یابد زیرا در بیرون شکاف اکسیدن موجود است و الکترون‌های ناشی از اکسایش فلز را مصرف می‌کند. در نتیجه بر این عمل، مرتباً

یا تکاف است که می‌تواند صدای خطرناک را به یک سازه وارد سازد. همچنین این تولید سازه در تکاف باعث
اخلال لایه‌ها تشکیل شده و سطح فلز می‌شود و خوردگی افزایش می‌یابد.

* خطرناک‌ترین سیارها برابر وقوع خوردگی سیار از نوعی می‌باشند که چهار آن‌ها کمتر از 1 یا 1000



* روش‌های جلوگیری و یا کاهش خوردگی سیاری:

1. استفاده از محلول خورشکاری به جای پیچ و مهره و پیچ برای متصل کردن فلزات به هم (خورش باید کامل و بدون درز و صاف باشد و تمام سیارها پوشش پر شود). همچنین می‌توان سیارها را با محلول لیموکاربن هم پوشاند.
 2. تانک‌ها و مخازن نگهداری مایعات و محلول‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند تا پس از تخلیه هیچ گونه مایعی (محلول) در داخل آن‌ها باقی نماند. از رسوب کردن و ته نشین کردن اجابت و تجمع آن‌ها در کف این مخازن باید جلوگیری شود.
 3. تجهیزات را به صورت منظم بازرسی کنید و کلیه رسوبات ایجاد شده روی آن‌ها را تمیز کنید.
 4. اگر رانده ضعیف را تعطیل می‌کنید تمام مواد حاد و رطوبت را از دست‌گامها جدا کنید.
 5. تا حد امکان از وسایط نقلیه که حاد و رطوبت نمی‌باشند، استفاده کنید.
- * آلودگی‌ها، سوراخ‌ها و اینگونه مسائل برای آلودگی‌ها در برابر خوردگی سیاری محسوب می‌شوند.

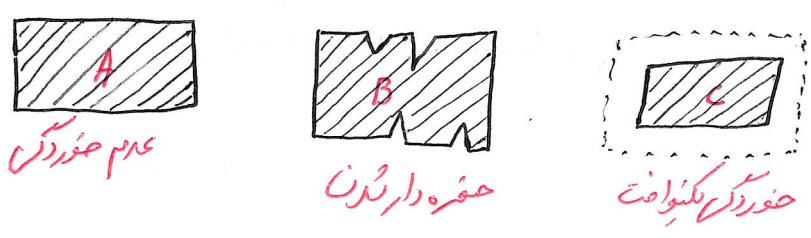
* خوردگی فیلiform یا رشته‌ای یا رشته‌مانند (Filiform corrosion):

این نوع خوردگی، نوع خاصی از خوردگی سیاری است و در زیر لایه‌های پوشش دهنده سطح مانند رنگ‌ها و لعاب‌ها ایجاد می‌شود.
در این به صورت رشته‌های کوتاه و نخ مانند ظاهر می‌شود و معمولاً رأس آن‌ها به رنگ آبی و بدنه آن‌ها به رنگ قهوه‌ای است.

33/ و لعاب پوشش داده ندهد. خوردگی رسته ای فلز را تضعیف نمی کند، چون میزان فلز خوردن شده نامیزر است.
 ولی در عوض، به ظاهر فلز لطمه می زند. مشکل اصلی توطئه های فلز که در صنایع تعدادی استخوان می شود، همین نوع خوردگی است.
 * رطوبت موجود در اتمسفر و جذب رطوبت توسط پوشش مورد استفاده بر روی فلز، مهمترین عامل موثر در این نوع خوردگی است.

*** خوردگی حفزاری (Pitting corrosion):**

این نوع خوردگی بسیار خطرناک بدن و از نوع خوردگی موضعی (local) بسیار نادر است که می تواند در مدت کوتاهی یک سطح فلز را سرایت کند. این سوراخ ها می توانند قطره های مختلف داشته باشند، اما عموماً قطر آن ها کوچک است.
 * شرط آن که یک شکل ایجاد شده را حفزه بنامیم آنست که: عمق حفزه > قطر حفزه باشد.
 تقلیل وزن فلز در اثر خوردگی حفزهای کم است اما فرار این خوردگی بسیار زیاد است. حفزه های ایجاد شده در فلز در اثر وقوع این خوردگی گاهی آن قدر کوچک هستند که به سختی دیده می شوند و اغلب در زیر میکروسکوپ پنهان شده اند.
 * خوردگی حفزهای را می توان حالت حد واسطه بین عدم خوردگی و خوردگی یکنواخت فرض نمود.



*** مکانیزم اتفاق افتادن خوردگی حفزهای:**

ابتدا برای انجام خوردگی حفزهای نیاز به یک محیط مناسب است و معمولاً این عمل در یک فرو رفتگی و یا خراش سطح یا نقص سطح موجود در فلز رخ می دهد. مکانیزم عمل این نوع خوردگی شبیه خوردگی بسیار است. این مکانیزم را اتفاق افتادن خوردگی می نامند زیرا واکنش های انجام شده در داخل حفزه شرایطی را بوجود می آورند که باعث پیشرفت خوردگی و حفزه دار شدن عامل

2. سرعت حرکت و تلام الکتریسیته

از آنجا که حفره دار شدن نیاز به نقاط ساکن و مرنه دارد، پس اگر محلول وین (وینت) داشته باشد، نقاط ساکن حذف شد و سرعت این نوع خوردگی کاهش می یابد.

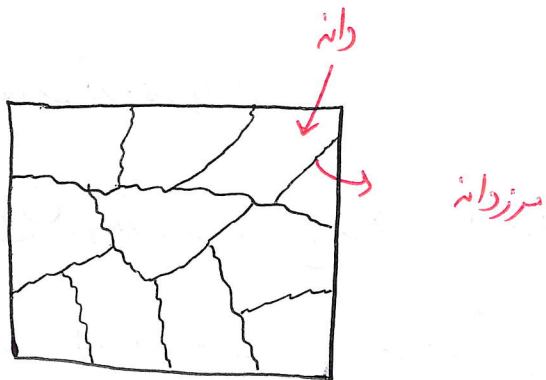
* چرا این پمپ از جنس فولاد زنگ نزن اگر دائماً در حال پمپاژ آب دریا باشد (یعنی مرتب کار کند) عمر بیشتری نسبت به پمپها دارد که اگر مواقع خاموش بوده و کار نمی کنند؟ هنگامی که پمپ در حال کار است دائماً آب دریا وارد پمپ شده و از آن خارج می شود در نتیجه هیچ نقطه ساکنی یا مرده ای ایجاد نمی شود. هنگامی که پمپ را خاموش می کنیم آب دریا در پمپ باقی می ماند، چون امکان تماس با هوای بیرون را ندارد پس از مدتی کورتاه اکسیرن آن تمام می شود و شرایط برای وقوع خوردگی فراهم می شود و چنین پمپ هایی در مدت کوتاهی سوراخ می شوند.

3. پارامترهای متاوردگی

آلیاژهای فولاد زنگ نزن مسدودترین گروه برای حفره دار شدن هستند. امول می توان آلیاژها را به گونه ای ساخت که در برابر خوردگی حفره ای مقاوم باشند. اگر فولاد زنگ نزن آستنیسی را از دمای بالاتر از 1800 با عملیات Solution anneal (نوعی از عملیات واری) به سرعت سرد کنیم (quenching)، بیشترین مقاومت را در برابر خوردگی حفره ای از خود نشان می دهد. اقترایی برخی از عناصر به آلیاژهای فولاد زنگ نزن (Stainless Steel) می توانند در برابر مقاومت آن ها در برابر خوردگی حفره ای موثر باشند.

نام عنصر	تاثير در مقاومت در برابر حفره دار شدن
کروم، نیکل و مولیبدن	اقتراشی می دهد
سیلیسیم	کم می کند، با مولیبدن اقتراشی می دهد.
نیاسیم و کلویم	در کروم و نیکل کم می کند، در نیکل و مولیبدن اثر مثبت
تنگستن و سلنیوم	کم می کند
کربن	کم می کند مخصوصاً در حالت های کربنه
نیوون	اقتراشی می دهد.

37/ انزوی بالایی دارند، در نظر می گیرند. بنابراین وقتی که یک فلز در معرض محیط خوردند قرار می گیرد، مرز دانه ها سریع تر دچار خوردگی می شوند. این پدیده را اصطلاحاً خوردگی مرز دانه ای می نامند. در مطالعات سلسله مراتبی از تفاوت فعالیت شیمیایی دانه ها و مرز دانه ها جهت عملیات اچ کردن استفاده می شود. با این عملیات، مرز دانه ها در محیط اسید سریع تر از دانه ها خوردگی می شوند. در نتیجه می توان دانه ها و فلز را با هم ترکیب و مشاهده نمود.

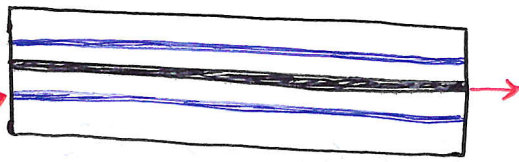


تصویر میکروسکوپی سطح یک فلز بعد از عملیات اچ کردن (etching)

در آلیاژها و قلع خوردگی مرز دانه ای می تواند باعث جدا شدن دانه ها و کاهش استحکام آلیاژ شود. حتی در مواردی دانه ها از هم جدا شده و آلیاژ پیوسته می شود. وجود ناخالصی و یا کاملاً یا اثراتی غلظت یک فلز در مرز دانه ها می تواند باعث بروز خوردگی مرز دانه ای شود.

مثال: اگر در یک فلز آلومینیوم (Al)، مقدار عنصر ناخالص آهن (Fe) وجود داشته باشد چون فلز آهن در آلومینیوم محلول نیست (زیرا دانسیته آن ها متفاوت است و دارای ذوب آن ها متفاوت است)، بنابراین آهن به مرز دانه ها می رسد و در آنجا خوردگی مرز دانه ای رخ می دهد به طور کلی، در هنگامیکه یک آلیاژ تولید می شود ممکن است نوع آن همگن نباشد و اگر در اثر انحلال دوباره فلز در حالت مذاب یک حالت تک فاز بوجود آید، در این صورت، یک آلیاژ همگن ایجاد می شود مانند فولاد زینک ترن 8-18. اما اگر دوباره تک فاز بوجود آید، در این صورت، ساختار آن آلیاژ ناهمگن ایجاد می شود. آلیاژها ممکن است طیف پذیرند ولی استحکام کمتری دارند و داخل آلیاژ تکنیکاً تحت فیلد و حالت ناهمگن ایجاد می شود.

نوعی هورده نده فلز که موازی
خط هویش بوده و به آن بسیار نزدیک
است



خط هویش

علت وقوع این خوردگی، همان پدیده‌ی صفحه‌ی قبل است، یعنی حرات ناشی از عبور کارها (حالت گداز فکود) باعث
ایجاد کاربید کروم در مجاور خط هویش شده و در نتیجه، خوردگی مرزدانه‌ای رخ می‌دهد.

روشن‌های گاهشی خوردگی مرزدانه‌ای در فولاد آستنیتی:

۱. انجام عملیات حرارتی بر روی فولاد در دمای بالا (۱۱۵۰ - ۱۴۵۰) و پس سرد کردن سریع فولاد در آب، این
عمل باعث می‌شود که رسوب کاربید کروم در یافت فولاد حل شده و آلیاژ نیکوافت شود. در نتیجه، نوعی
فقر از کروم حذف می‌شوند. سرد کردن فولاد باید بسیار سریع باشد. اگر نه تمام سطح فولاد به خوردگی
مرزدانه‌ای حاس می‌شود.

۲. استفاده از عناصری که تمایل کمی به تشکیل کاربید دارند مطابق با نوع فولاد، عناصری مانند
تیتانیوم (Ti)، کولمبیم (نیوبیم Nb) و نیابتال (Ta) اضافه می‌شود، این عناصر تمایل کمی به تشکیل کاربید
دارند، در نتیجه، مانع تشکیل کاربید کروم شده و خوردگی مرزدانه‌ای رخ نمی‌دهد. این عناصر را اصطلاحاً عناصر پایدار کننده
(stabilizer) می‌نامند و این نوع فولادها را اصطلاحاً فولادهای پایدار کننده می‌نامند.

۳. گاهشی دادن در حد کمترین فولاد به کمتر از ۰.۰۳٪ وزن باعث می‌شود که کربن کافی برای تولید کاربید کروم در
در سطح نباشد و نوعی فقر از کروم در فولاد مورد نظر بوجود نیاید.

این نوع از فولادها را در صنعت اصطلاحاً فولادهای بسیار کم کربن (extra low carbon) می‌نامند. در این نوع فولادها

محدودترین (پایه‌ترین) خط هویش بوجود نمی‌آید. (با مدین اکسین در مذاب فولاد در تون مقدار از کربن فولاد را

41/ آبیاری سطح قشر که دارای کابری است، به ندرت زایشی روی رالزودن می دهد. (از برای نقش آندارداری)
 فلز روی بسیار فعال است و در مس محبب است، فلز روی می تواند در آب خالص هم به آهستگی خورد شود.
 واکنش کاتدی در این حالت مثل امپاد آب می گزاید و درون ها OH^- است به همین دلیل، زایشی روی
 در عیار آب اکسیرن نیز می تواند رخ دهد، اما سرعت آن زیاد نیست.

*** زنگار شدن یا گرافیتی شدن (Graphitization) یا خوردگی گرافیتی:**

این پدیده در چدن خاکستری (Gray iron) رخ می دهد. گرافیتی شدن، نوعی جدا شدن است. در این نوع خوردگی، آهن
 موجود در چدن خورد می شود (حل می شود) و فقط شبکه گرافیتی چدن به جا می ماند. در این حالت، ظاهر چدن یک ظاهر گرافیتی
 می گیرد. در این نوع خوردگی، گرافیت نسبت به آهن نقش کاتد را بازی می کند و آهن نقش آنود را دارد. پس گالوانیکی بوجود آمده
 در این حالت، دارای E_{cell} بزرگ مثبت است. در نتیجه، آهن به سرعت خورد می شود و هم متغذی می شود.

گرافیت + حفره ها خالی + زنگ آهن به جا می ماند.

سگام منصفمان خوردگی از اصطلاح زایشی آبیاری (Dealloying) برای این نوع خوردگی استفاده می کنند. زایشی
 آبیاری عبارت است از یک فرایند خوردگی که در آن یکی از اجزای آبیاری خارج می شود و یک باقی مانده متعلق به جا می ماند.

*** خوردگی سایشی (Erosion corrosion):**

خوردگی سایشی عبارت است از افزایش سرعت خوردگی یا از بین رفتن یک فلز در اثر حرکت نسبی یک محلول خورنده
 (الکترولیت) و سطح فلز. معمولاً این حرکت خفیف سریع است و سایش مکانیکی با ساییدگی شدن نیز وجود دارد. در این حالت
 محصول حاصله ناشی از وقوع خوردگی فلز در اثر حرکت (جریان) شدید سیال (الکترولیت) به طریق مکانیکی از روی سطح فلز

۱. پوشش سطح فلز:

اگر پوشش‌ها، محافظ سطح فلز مقاوم و چسبیده باشند، حفاظت خوبی را در برابر خوردگی سایشی از خوردگی می‌دهند. پوشش‌ها ترد و شکننده حفاظت کمی را در برابر سایش از خوردگی می‌دهند. مقاومت خوردگی فولادها در زنگ زین به علت تشکیل لایه محافظ سطح بر روی آن‌ها (پایه زدن) است. در نتیجه، اگر سرعت بالای سیال این لایه را دچار تخریب کند، خوردگی سایشی رخ می‌دهد.

نیسانیم فلز نسبتاً فعال است ولی در اکثر محیط‌ها در برابر خوردگی سایشی مقاوم است، زیرا بر روی آن یک پوشش مقاوم از TiO_2 تشکیل می‌شود. این پوشش باعث می‌شود که مقاومت Ti در برابر این نوع خوردگی در آب شور دریا، محلول‌های حاوی یون‌های کلرید و همچنین نتریک اسید (دودگشته) (Fuming) بسیار عالی باشد.

۲. سرعت حرکت (سرعت جریان محلول خوردنده یا الکترولیت):

سرعت بالای الکترولیت و همچنین حضور ذرات معلق (سوسپانسیون) باعث افزایش سرعت خوردگی سایشی می‌شود.

در مواردی که وجود دارد که افزایش سرعت سیال (سرعت حرکت) باعث کاهش سرعت خوردگی شود؟

بله، افزایش سرعت سیال در حضور ممانعت کننده‌ها باعث می‌شود که ممانعت کننده با سرعت به تمام سطح فلز برسد و سرعت خوردگی کاهش یابد. در این حالت، مقدار کمتری ممانعت کننده مورد نیاز است. همچنین سرعت بالا

می‌تواند مانع از رسوب زدن لجن و گل و لای و ایجاد نقاط مرده شود و در نتیجه، باعث کاهش خوردگی نیز می‌شود.

45/ یک روش ممکن برای آن که یک فلز یا آلیاژ را در برابر خوردگی مقاوم کنیم، روش سخت کردن به وسیله عمل جامد (Solid solution hardening) است. در این روش، یک عنصر را به عنصر دیگری اضافه می کنند تا عمل جامد در بدنه آید که در برابر خوردگی مقاوم است و ذاتاً سخت می باشد. این نوع آلیاژها تولید شده و با افزودن قوطی عملی حرارت نرم کردن سخت می شود.

خود سال از این حالت:

چون عمده سلیم (با 14.5 سلیم) این حالت را داراست. این اکسایر بسیار مقاوم بود و تنها اکسایر است که می توان آن را در اکسایر که در آن خودی سلیم بسیار کمی است، به کار برد.

اقرودن یک عمر سم بک آید و نیز تواند مقاوم سے آن را در برابر خوردگی سائی اترایش دهد. اقرودن آکھن بہ آید

کوریونیک باعث افراینِ شدید مقاومت می‌گردد در برابر خوردگی سایشی در آب دریا و سوراخ‌ها و خوردگی در ماسه Mo به

فولاد درزنگ‌ترین 8-18 باعث افراینِ مقاومت می‌آید در برابر خوردگی سایشی و سوراخ‌ها

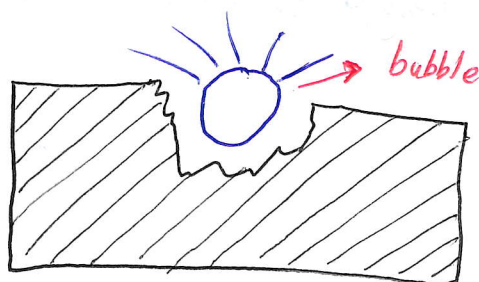
* خنارت حبابی (Cavitation Damage) یا خوردگی حبابی:

* **خسارت حبابی (Cavitation Damage)** یا خوردگی حبابی:

خسارت حبابی نوع خاصی از خوردگی است که در اکثر تنگنای حباب‌ها یا جابروها در مایع و ترکیب آن‌ها و در سطح فلز

موجودہ آئین

بوجود آید.
ضارے صابن در تدریجی های صید و لیس (تولید برق در مجامع درها)، پروانه گشتی، پروانه پمپ ها و سطوح فلزی دیگر
که در تماس با آب و حرکت قرار داشته و در آن ها بر اثر سرعت زیاد سیال تغییرات فشار و وجود دارد، مانند هر تورد.



تکرار این عمل منجر به ایجاد حفره‌های عمیق شده و خوردگی اتر این می‌باشد.

* لازم به ذکر است که برای ایجاد خسارت حباب‌ها در یک قطعه فلزی، و عدد پورته‌ها در حلقه‌های فلز کاملاً ضروری نیست.

زیرا حباب‌ها متغیرند. دارای قدری کافی برای کشیدن ذرات فلز از روی سطح می‌باشند. به محض این که سطح فلز

خسین شده، شرایط برای ایجاد این نوع خسارت مساعد می‌شود.

* خوردگی فرسایشی (Fretting corrosion):

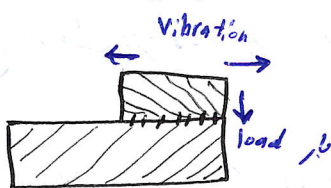
این نوع خوردگی در محل‌های تماس بین دو فلز که تحت بار (load) هستند و در معرض ارتعاش و لغزش قرار دارند، ایجاد می‌شود.

خوردگی فرسایشی به صورت حفره‌ها یا شیارهایی بر روی فلز که توسط محموله خوردگی احاطه شده‌اند، ظاهر می‌شود. نام‌های

دیگر این خوردگی، اکسایش اصطلاکی یا اکسایش سایشی می‌باشند.

خوردگی فرسایشی در قطعات موتورهای اتومبیل‌ها، اجزای که به هم پیچیده اند و ... مشاهده می‌شود. اساساً خوردگی

فرسایشی حالت خاصی از خوردگی سایشی است که در تماس با ارتعاش رخ می‌دهد. ارتعاش



خوردگی فرسایشی بسیار مخرب است زیرا باعث از بین رفتن قطعات و تولید ذرات اکسیدی می‌شود. این خوردگی باعث

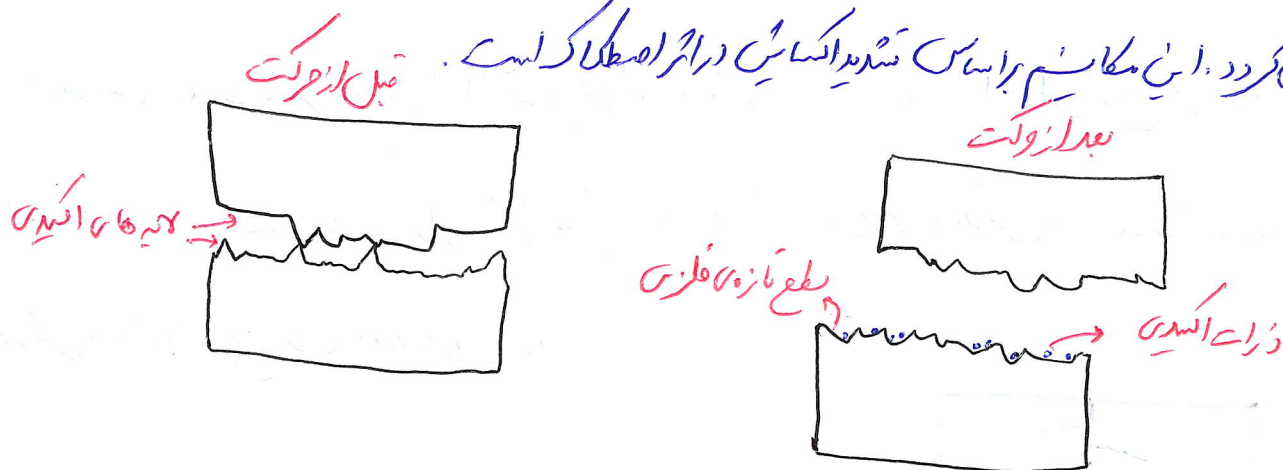
کند شدن سطح فلز، از بین رفتن تدریس و لغزش شدن اجزای می‌شود که در تماس با یکدیگر می‌کشند. لغزش شدن سطح فلز که

با هم در تماس اند باعث اتر این تنش در هنگام کار می‌شود. حفره‌ها نیز به عنوان مراکز تجمع تنش عمل می‌کنند و تشدید

فلز در اثر خشکی دچار شکست می‌شود. (خطوط راه آهن)

2. مکانیسم اکسایش - سایش:

در این حالت فرض می‌شود که سطوح فلزی که با هم در تماس اند، تدریجاً لایه‌های نازک و پیوسته اکسید پدید می‌آورند. هنگامی که دو فلز با هم در تماس بوده و تحت بار باشند و در معرض حرکت نسبی مکرر قرار گیرند، آنگاه در ناحیه‌های تماسی، لایه‌های اکسید شکسته می‌شود. این عمل باعث بوجود آمدن ذرات اکسید می‌شود. در نتیجه، سطح تازه‌ای فلز مجدداً اکسید شده و عمل فوق دوباره تکرار می‌گردد. این مکانیسم را سایش شدید اکسایشی در اثر اصطکاک است.



* مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در خوردگی فرسایشی هر دو مکانیسم او 2 دخالت دارند.

لازم به ذکر است که خوردگی اکسید در تمام موارد لازم نیست زیرا خوردگی فرسایشی در هر نوع سطحی مانند

فلزات نجیب، میکا، شیشه و... مشاهده شده است. وجود H_2O برای انجام خوردگی فرسایشی مؤثر است و باعث تسهیل

آن می‌شود.

* خوردگی همراه با تنش یا خوردگی تنش (Stress Corrosion):

این نوع خوردگی بر روی فلزهای رخ می‌دهد که تحت تنش یا استرس ($S = \frac{F}{A}$) بوده و در یک محیط خورنده

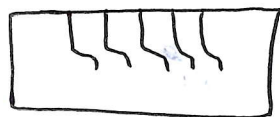
قرار گیرد. تنش باعث تسریع خوردگی می‌شود و در سطح فلز ایجاد ترک می‌کند که به آن ترک خوردن در اثر خوردگی تنش

یا ترک خوردگی تنش (Stress corrosion cracking, SCC) می‌گویند.

وتنش با افزایش یافته و نهایتاً شکست مکانیکی فلز در انتها رخ می دهد.
نوع محیط خوردنده نیز در وقوع SCC مؤثر است. وجود مواد اکسید کننده در محیط باعث افزایش ترک خوردن فلز می شوند. با افزایش دمای فلز مورد نظر، SCC زودتر می آید. حالت فیزیکی محیط نیز مؤثر است.

* خوردگی خستگی (Fatigue Corrosion) یا خوردگی توام با خستگی:

شکست یک فلز در اثر تنش های متناوب را خستگی می نامند. شکست خستگی در تنش های زیر نقطه تسلیم و بعد از تعداد زیادی تکرار تنش اتفاق می افتد. شکست ناشی از خستگی به سرعت یک ناحیه بزرگ و صاف و یک ناحیه کوچک و زبر دیده می شود. مکانیسم خوردگی - خستگی کاملاً معلوم نیست اما وقوع این خوردگی در محیط هایی که باعث حفره دار شدن می شوند، بیشتر است. شکست های ناشی از خوردگی - خستگی معمولاً از نوع داخلی (داخلی) بوده و فاقد انشعاب (شاف و نه گردن) است. در حالی که ترک های SCC دارای انشعاب (شاف و نه گردن) می باشند. شکست خارجی فلز، صد درصد مکانیکی است و به محلول (محیط) خوردنده نیاز ندارد.



طرح ساده ای از خوردگی خستگی

* خسارت های هیدروژنی (Hydrogen Damage):

خسارت های هیدروژنی یک اصطلاح کلی می باشد که شامل خسارت های مکانیکی دارد که به فلز در اثر وجود هیدروژن در محیط و یا واکنش با هیدروژن است. خسارت های هیدروژنی به چهار گروه تقسیم می شوند:

1. تاول زدن هیدروژنی (Hydrogen Blistering)

2. تردی هیدروژنی (Hydrogen Embrittlement)

3. دگربردگی کردن (Decarburization)

4. خوردگی (حمله) هیدروژنی (Hydrogen attack)

53/ در هر سطح، غلظت ثابت از اتم‌های هیدروژن روی سطح فلز وجود دارد و مقدار این اتم‌ها به جابجایی شکل مولکول H_2 به

داخل فلز تنگ (diffusion) می‌کند. قسمت عمده هیدروژن اتمی (H) از فولاد عبور می‌کند و در سطح خارجی تاگت شکل مولکول

H_2 می‌شود. اگر هیدروژن اتمی (H) هنگام عبور از داخل فولاد به یک حفره برسد (این حفره‌ها به عنوان نقش در فولادها قابل

وجود دارند)، در داخل این حفره مولکول‌های هیدروژن (H_2) تشکیل می‌شوند، زیرا آنها طوری که گفته شد، هیدروژن مولکول

نمی‌تواند از داخل فلز عبور کند، بنابراین، غلظت مولکول‌های H_2 در آن در داخل حفره مرتباً افزایش می‌یابد و

تغادل H_2 که در تماس با هیدروژن اتمی (H) است در این حالت ممکن است به مقدارهای متغیر برسد، بنابراین، در اثر این

تغییرات در داخل حفره، سطح تاگت کم کم بزرگ‌تر می‌شود و به مرور زمان این بزرگ‌تر شدن می‌تواند بزرگ‌تر شود تا سرانجام سطح فلز را

مضد می‌کند.

* معمولاً بزرگ‌ترین (تاول) و اعظم فلز در قسمت از سطح آن رخ می‌دهد که مقاومت کمتری دارد. تاول زدن هیدروژنی بیشتر در

صفت نفت محبوس در تاگت‌های ذغالی نفت خام و فراورده‌های نفتی و همچنین در دستگاه‌های مربوط به تقطیر و فرایند نفت خام

رخ می‌دهد. یک روش کنترل تاول زدن هیدروژنی در صفت، افزودن محافظت کننده‌های محبوس به تاگت‌های مورد نظر است.

مناسب‌ترین محافظت کننده در این مورد، یون پلی‌سولفید (S_n^{2-} ، $n=2-6$) است.

* **ترد هیدروژن یا شکستگی هیدروژنی:**

مکانیسم دقیق و جامع ترد هیدروژن معلوم نیست، اما علت اصلی آن نفوذ هیدروژن اتمی به داخل ساختمان فلز است.

مطابق با آن می‌دهد که فلز تنگ و در بخش فلزات دیگر عموماً زیاد به تشکیل هیدریدهای فلزی (MH_n) دارند در اثر

نفوذ هیدروژن به داخل این فلزات. هیدریدهای فلزی تشکیل می‌شوند بر خلاف ساختمان فلز که سخت و محکم است و

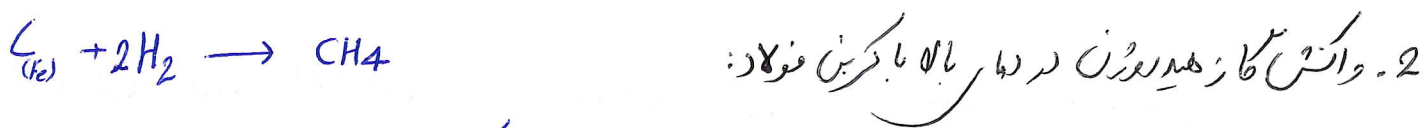
کاتالیزوری است و باعث افزایش نفوذ هیدروژن به داخل فلز شده و باعث تسریع تری و ترک خوردن فلز می شود. بدین کار و باعث کند شدن جذب یا نفوذ هیدروژن است به داخل فلز می شود. بدین سلیکات باعث افزایش جذب هیدروژن است و تراکم فلز می شود. حساسیت به ترک (شکستگی) با افزایش مقاومت کشش فلز زیاد می شود.

* دکربوره کردن (Decarburization) یا زداش کربن

این پدیده باعث از بین رفتن کربن موجود در فولاد می شود این پدیده در مجز در اثر تماس فلز با هیدروژن مرطوب در دما بالا رخ می دهد. هنگامی که کربن موجود در فولاد در سنج برود، مقاومت کشش فولاد کاهش می یابد. واکنش هایی که منجر به از بین رفتن کربن موجود در فولاد می شوند عبارتند از:



سرعت این واکنش و جهت پیشرفت آن شبیه به فعالیت کربن موجود در فولاد و نسبت بخار آب، CO و H₂ موجود در محیط دارد.



محصول این واکنش گاز متان است. هیدروژن است به راحتی در فولاد نفوذ می کند و در نتیجه، تولید گاز متان در شرایط مناسب

و در نقاط داخلی فلز باعث ترک خوردن فلز می شود. با افزودن مقدار مناسب فلز کروم و مولیبدن به فولاد، مقاومت

آن در برابر ترک خوردن و زداش کربن افزایش می یابد.

* گاز CO که در برخی از عملیات پالایش نفت و همچنین در گازهای اقیانوس ناشی از مصرف سوخت های مایه مانند مازوت

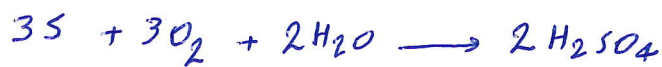
(نفت کوره) وجود دارد می تواند موجب زداش کربن موجود در فولاد شود. واکنش بین CO و کربن موجود در فولاد

2. تأثیر بر روی پوسته کرم غاقط سطح فلز:

باکتری ها آهن و تولید FeO را به Fe_2O_3 اکسید کردن و به این خود از زیر کسب کنند. همچنین با مصرف اکسیژن باعث پیدایش پیل ها اختلاف غلظت اکسیژن (پیل غلظت اکسیژن) می شوند.

3. ایجاد محیط ها خورنده:

باکتری ها حوازی می توانند تولید رابینولفوریک اسید تبدیل کردن و محیط خورنده اسیدی قوی ایجاد کنند.



این اسید قوی می تواند توله ها را سیمانی فاضلاب را سوراخ کند.

4. تولید رسوبات:

فشارت باکتری ها می تواند لجن ها را چسبند بر روی سطح فلز ایجاد کند. برخی از باکتری ها مانند باکتری آهن می توانند رسوب



استفاده از مواد میکروبی کش، پودش ها، پلاستیکی، قیری، لعاب، حفاظت کاتدی و موارد ممانعت کننده در جلوگیری

از خوردگی میکروبیولوژی می شوند.

خوردگی تنش مقاوم است. هوشیاری این نوع فولاد در آب‌های کلردار نیز مقاوم می‌باشد.

ج) استنسی: نوع مستعد این فولاد را اصطلاحاً فولاد 8-8 می‌نامند که جادری 18٪ و Ni 8٪ است. این فولاد در اتمسفر رطوبت نم‌زدن این فولاد در دماهای پایین انعطاف پذیر بود را حفظ می‌کند و می‌توان از آن تانک‌های ذخیره N_2 و O_2 به‌صورت سافت.

3- آلومینیوم و آلیاژهای آن:

آلومینیوم در محلول‌های خنثی و اسیدی پایدار است اما در محیط قلیایی به‌سرعت خوردگی می‌شود. با انجام عملیات Anodizing می‌توان روی این فلز لایه‌ای با ضخامت مناسب از Al_2O_3 ساخت. Al خالص بسیار نرم است و آلیاژ کردن آن با فلزات دیگر باعث بهبود خواص مکانیکی این فلز می‌شود که در صنایع هوایی و فضا کاربرد دارد.

4. منیزیم:

Mg از نظر خوردگی بسیار فعال است و به‌عنوان آند قربانی می‌شوند به‌کار می‌رود. در خوردگی اتمسفری به‌علت تشکیل MgO روی سطح آن، مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد اما در اتمسفرهای غنی دار (کنار دریا) به‌سرعت خوردگی می‌شود. آلیاژهای آن در برابر خوردگی تنش بسیار ضعیف هستند. Mg در برابر HF و کرومیک اسید مقاوم است.

5. سرب:

سرب در حجم کار و مصداق سازی و بازی سازی کاربرد دارد. سرب به‌علت وزن در معرض خوردگی سایش و لایه‌برداری در H_2SO_4 ، HF و H_3PO_4 و کرومیک اسید مقاوم است اما در HNO_3 و HCl خوردگی می‌شود.

6. مس و آلیاژهای آن

مس فلز نجیبی است. مس در محیط نزدیک اسید که عاری از O_2 باشد، خوردگی می‌شود اما در محیط‌های اسیدی دیگر که عاری

* قطع تجربی انتخاب براساس طوم و مخازن است که برابر اشتغال و ذخیره کردن آب مقرر استفاده می شوند.

* قطع برابر مواد فلزایی و آلیدها معدنی قوی مناسب است.

10. تیتانیوم (Ti):

فلز تیتانیوم با توجه به مقدار E° آن از نظر اکتروشیمیایی باید فعال باشد ولی به دلیل تشکیل TiO_2 روی سطح آن، در برابر خوردگی بسیار مقاوم است.

تیتانیوم در آب دریا هیچگونه محلولی که دارای یونهای کلر زیادی هستند، بسیار پایداری است.

تیتانیوم در برابر هیپوکلریت ها ClO و گاز کلر (Cl_2) در محلول بسیار مقاوم است. این فلز در مقابل HNO_3 در گذشته و

محلول های $FeCl_3$ و $CuCl_2$ که بقیه فلزات را حفره دار می کند، بسیار مقاوم است.

* تیتانیوم در H_2SO_4 و HCl خالص مقاوم نیست اما در محلول یون های Fe^{3+} و Cu^{2+} پایداری دارد و در برابر خوردگی مقاوم

نمی شود. تیتانیوم را در ساخت ظروف HCl ، H_2SO_4 و HF و Cl_2 خشک نباید به کار برد.

11. کلومبیم (Cb):

کلومبیم نام قدیم فلز تنوبیم (Nb) است. بر روی سطح این فلز لایه مقاوم Nb_2O_5 تشکیل می شود اما در HF

H_2SO_4 ، HCl گرم و غلیظ پایداری نیست. این فلز در فلزها هم پایداری نیست.

12. تانتال (Ta):

برای قطعاتی که با عمل جراح در بدن انسان کار گذاشته می شوند، کاربرد داشته و در بین فلزات مختلف، بالاترین مقاومت را

در برابر خوردگی دارد.

8. یتانیوم برای عمل‌های اکسیدان قوی در گرم (H_2CrO_4 ، $KMnO_4$ ، $NaClO_4$ ، $K_2Cr_2O_7$)

9. مانند برای حالتی که بیشترین مقاومت در برابر خوردگی نیاز باشد. (مانند ساخت اندام مصنوعی برای ترمیم

اعضای آسیب دیده بدن).

10. فولاد برای H_2SO_4 غلیظ.

(د) غلظت و تأثیر آن → در فصل هار قبل بررسی شده است.

(و) استفاده از ممانعت کننده ها (Inhibitors) یا بازدارنده های خوردگی:

ممانعت کننده ها ترکیبایی هستند که وقتی در غلظت هار کم به یک محیط خوردنده افتاده می شوند باعث کاهش سرعت خوردگی فلز می گردند. ممانعت کننده ها به شدت یک کاتالیزور ممانعت کننده هستند که سرعت خوردگی را کاهش می دهند. نوع این مواد را با استفاده از روش هار آزمایشگاه برای فلزات و آلیاژها انتخاب می کنند و معمولاً در صنعت با نام هار تجارتی شناخته می شوند.

* بر اساس نحوه کار ممانعت کننده ها می توان آن ها را پنج گروه تقسیم کرد:

(1) ممانعت کننده های جذب (جذب - سطح) (adsorption):

این ممانعت کننده ها از نوع ترکیبایی آرس هستند و بهترین گروه ممانعت کننده ها را تشکیل می دهند و برای هم این مواد این است که به شکل یک لایه جذب سطح فلز یا آلیاژ می آید و سرعت واکنش هار اکسایش فلز در آنند و واکنش با اشیاء در کاتد را کاهش می دهند. بهترین مواد این گروه عبارتند از: آمین هار آلکال مانند هگزامین تترامین، آمین در بنزین آمین، انواع آمین هار آروماتیک و در این آمین.

(2) ممانعت کننده های نوع سموم تصاعد هیدروژن:

یون هار آرسنیک و آنتیمون مانع تولید گاز H_2 می شوند و برای محیط هار اسیدی خیلی مؤثرند. ولی اگر علاوه بر واکنش اشیاء $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ واکنش اشیاء گاز O_2 هم صورت گیرد این ممانعت کننده ها جواب نمی دهند؟ علت آن تنوع واکنش هار کاتدی در این حالت است.

(3) ممانعت کننده های اسکوینر (scavenger):

این مواد می توانند عوامل زیان آور و مضر محیط را حذف کنند. مانند هیدرازین و سدیم سولفیت که می توانند گاز O_2

* غلظت مجرانی یک اویسن کننده (passivator):

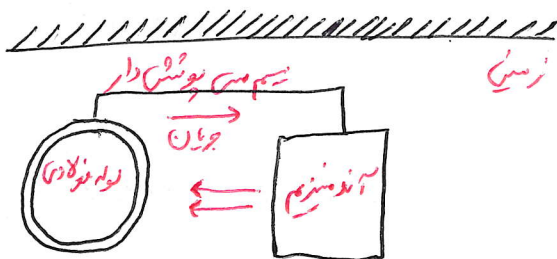
مداخل غلظتی است که اگر غلظت بازدارنده مصرف زیر این حد باشد نه تنها بازدارنده غیر فعال نشده نیست، بلکه ایجاد خوردگی حفره ای را تسریع می کند.

* حفاظت کاتدی (Cathodic protection):

در این روش با فراهم کردن الکترون برای فلز، که باید محافظت شود، جلوگیری از خوردگی آن گرفته می شود. به این عمل اصطلاحاً حفاظت کاتدی گفته می شود. در روش حفاظت کاتدی عبارتند از:

1. ایجاد زوج گالوانیک مناسب و انتخاب یک آند قربانی شونده:

در این روش یک فلز فعال (آند قربانی شونده) را به فلز مورد نظر وصل می کنیم، در نتیجه این آند حفره خورده (اکسید شده) و فلز مورد نظر حفاظت می شود. مثلاً در زوج فولاد-منیزیم، فلز منیزیم نقش آند خا شونده را دارد و خوردگی می شود و در عوض فولاد حفاظت می شود و نقش کاتد را دارد.



2. استفاده از یک مولد برق DC (مولد جریان مستقیم):

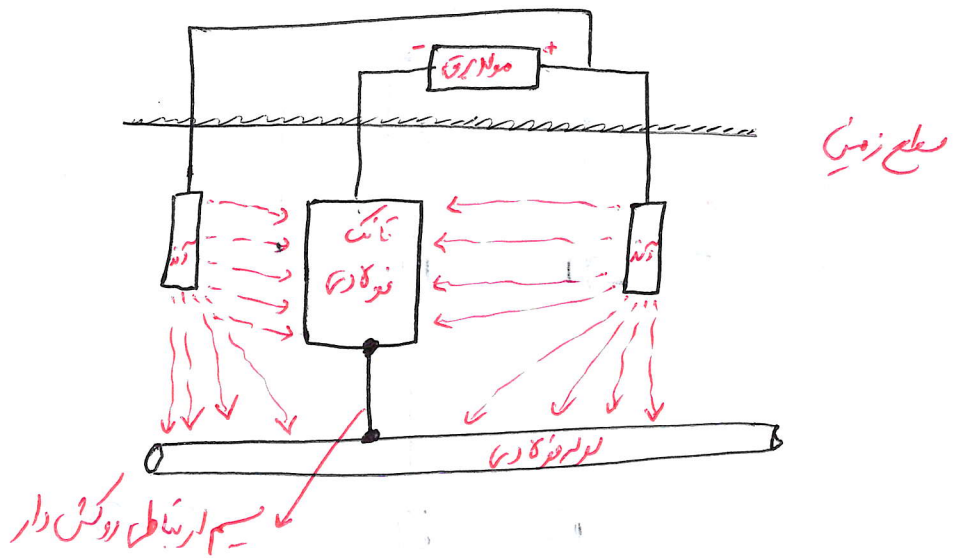
در این روش فلز مورد نظر (مثلاً لوله یا یک مخزن فلزی زیر زمین) را به قطب مثبت یک مولد جریان DC

متصل کرده و قطب مثبت مولد جریان را نیز به یک آند به اثر مثلاً کرافیت وصل می کنند. جریان از طریق زمین وارد

لوله یا مخزن فلزی شده و باعث حفاظت آن و کاهش خوردگی می گردد.

69
 همان طور که در شکل مشخص است، در اثر میدانی جریان سگردان ناشی از حفاظت کاتدی تانک مدفون شده در خاک که در مجاورت یک خط لوله زیر زمینی قرار دارد، ناصیه ای از این خط لوله که به این تانک نزدیک است دچار خوردگی می شود.

* راه حل ساده ای برابر رفع مشکل جریان سگردان وجود دارد. برابر رفع این مشکل می توان از دو آند در اطراف تانک فلزی مدفون شده در خاک استفاده کرد. همچنین باید تانک را با یک سیم روکش دار به خط لوله متصل کرد. در اثر این عمل خوردگی خط لوله متوقف می شود.



* حفاظت آنودی (Anodic protection):

اساس این روش بر پایه تشکیل یک پوسته محافظ روی فلز در اثر اعمال جریان های آنودی می باشد. در فلزاتی که حالت فعال-غیرفعال دارند مانند نیکل، آهن، کروم، پتاسیوم و آلومیناها، آهن ها، می توان با اعمال دقیق یک جریان آنودی آن ها را غیرفعال کرد و سرعت خوردگی را کاهش داد. در این حالت، پوسته تشکیل شده روی این فلزات آن ها را محافظت می کند. برای حفاظت آنودی نیاز به دستگاه پتانسیو است (potentiostat) داریم.

حفاظت می‌کند و هم یک روش برای اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای خودروی یک فلزن می‌باشد.

2. شرایط لازم برای حفاظت آند را می‌توان با رسم مثلی پلازما سون در آن شرایط تعین کرد.

مقایسه روش حفاظت کاتدی و آندی

نوع پارامتر	حفاظت آندی	حفاظت کاتدی
قابلیت کاربرد	فقط برای فلزاتی که در حالت فعال-غیرفعال دارند.	برای تمام فلزات کاربرد دارد.
محیط خورنده	برای محیط‌های خورنده ضعیف تا خورنده قوی کاربرد دارد.	برای محیط‌های خورنده ضعیف تا متوسط کاربرد دارد.
عوارض عملیات حفاظت و نصب و سیم	بالا است.	پایین است.
هزینه برداری	پایین است.	متوسط تا زیاد (فیلم سداول است)
منطقه سرد حفاظت یا قدرت پرتاب power throwing	پایین است.	پایین است.
اهمیت جریان اعمال شده	قابلیت کمتر سرعت خودروی فلز تحت حفاظت است.	نشان دهنده سرعت خوراک است و سیم و سیم است.
مقدار جریان اعمال شده	غالباً برابر مقدار جریان مورد نیاز است.	مقدار آن تا چندین برابر مقدار مورد نیاز است.
شرایط کار	می‌توان آن را سریعاً با اندازه‌گیری دقیق الکترود تعین کرد و نیز می‌توان جریان اعمال شده را هم به وقت تعین نمود.	حقاً نیاز به اندازه‌گیری حال تجربه دارد و جریان اعمال شده با روش حدس و خطا تعین می‌شود.

* فولاد مارتنزیتی: بیشتر فولادها در دماهای زیر ۲۷۰ درجه سانتیگراد مارتنزیتی شکل ندارند و قابلیت این را دارند که با عملیات حرارتی سخت شوند. در صد کربن آن ها ممکن است تا ۱.۸٪ برسد. این فولادها مقاطع دارند و دارای استحکام، سختی و مقاومت پخش بالا، انعطاف پذیر خوب و مقاومت به خوردگی متوسط هستند. فولادها در دماهای زیر ۲۷۰ درجه سانتیگراد مارتنزیتی برآیند فاسق و چگال، ابزارها، جراحی، لوازم، شیرآلات و قطرها به کار می روند.

* فولاد فریتی: این فولادها در صد کربن بالایی دارند (تا ۰.۲۷٪) و مقاطع دارند. مقاومت به خوردگی خوبی دارند و در انعطاف پذیر میان از فولادها در دماهای زیر ۲۷۰ درجه سانتیگراد فریتی با سرعت کاری سخت می شوند و قابل عملیات حرارتی نیستند. اغلب به کار در دماهای غیر از دماهای مایه لازم آئینه خانه و لوازم تزئینی خودرو به کار گرفته می شوند.

* فولاد آستنیتی: این فولادها اغلب از کربن کم، شکل و شکل دهی آهسته می شوند. غیر مقاطع دارند و مقاومت به خوردگی دارند و در دماهای بالا به کار می روند. این فولادها در دماهای بالا به کار می روند و در دماهای بالا به کار می روند. FCC هستند. این فولادها در دماهای بالا به کار می روند و در دماهای بالا به کار می روند. آئینه خانه، اتصالات، سازه ها، جوش، تجهیزات سبک وزن، حمل و نقل، تجهیزات پزشکی و دارویی، قطعات کوره و مبدل ها، حرارتی و قطعات به کار می روند و در دماهای بالا به کار می روند.