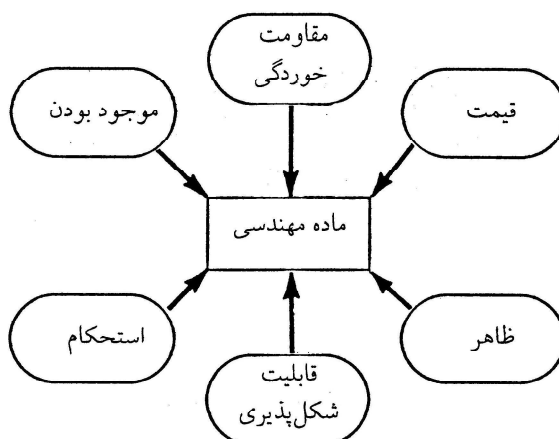


فصل (۲)

اصول خوردگی

۲-۱ مقدمه

برای ترسیم دورنمای صحیح مهندسی خوردگی، لازم به یادآوری است که انتخاب مواد^(۱) برای کاربردهای مورد نظر بستگی به فاکتورهای مختلفی دارد که یکی از آنها مقاومت در برابر خوردگی است. در شکل ۱ - ۲ بعضی از خواصی که در انتخاب مواد ساختمانی بایستی در نظر گرفته شوند نشان داده شده است. اگر چه عمده‌تاً مقاومت خوردگی فلزات مورد نظر ماست. لکن انتخاب نهائی غالباً به فاکتورهای دیگر بستگی خواهد داشت. همانطور که در فصل ۱ گفته شد، در اکثر کاربردهای مهندسی که مقاومت شیمیائی بالائی مورد نیاز است قیمت و مقاومت خوردگی مهمترین فاکتورها می‌باشند، اگرچه در کاربردهای معماری غالباً که نشان ظاهر مهمترین مسئله است.

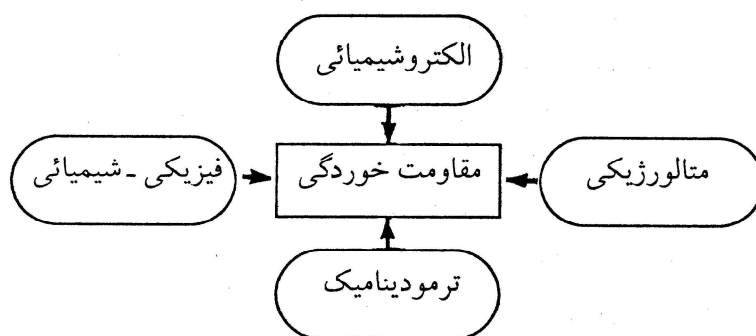


شکل ۱-۲ فاکتورهای موثر در انتخاب مواد مهندسی

قابلیت تولید^(۱) که نشان دهنده سهولت شکل دادن جوشکاری و عملیات مکانیکی دیگر است نیز بایستی در نظر گرفته شود. در کاربردهای مهندسی، رفتار مکانیکی یا استحکام نیز مهم است و حتی در مواردی که انتخاب برای مقاومت در برابر خوردگی صورت می گیرد بایستی در نظر باشد. بالاخره، در مورد بعضی مواد بسیار مقاوم در برابر خوردگی مثل طلا، پلاتین و بعضی آلیاژهای سوپر غالباً مسئله موجود بودن^(۲) این مواد عامل تعیین کننده می باشد. در بعضی موارد زمان تحویل سفارش قطعاتی از فلزات و آلیاژهای خیلی خاص طولانی است بطوریکه ممکن است از کاربرد آنها صرف نظر شود. جنبه های مهندسی مقاومت خوردگی نیز نبایستی نادیده گرفته شوند. مقاومت کامل در برابر خوردگی در تقریباً تمام محیطها با استفاده از پلاتین یا شیشه امکانپذیر است، لکن در اکثر موارد استفاده از این مواد عملی نیست.

مقاومت خوردگی یا مقاومت شیمیایی بستگی به فاکتورهای مختلفی دارد و همانطور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، مطالعه کامل و جامع آن مستلزم داشتن

اطلاعات در چندین زمینه علمی می باشد. ترمودینامیک و الکتروشیمی برای درک و کنترل خوردگی بسیار مهم هستند.



شکل ۲-۲ فاکتورهای موثر بر مقاومت خوردگی یک فلز

مطالعات و محاسبات ترمودینامیکی نشان دهنده جهت انجام یک واکنش می باشند. در مورد خوردگی، محاسبات ترمودینامیکی می تواند امکان یا عدم امکان تئوریکی خوردگی را تعیین کند. الکتروشیمی زمینه مربوطه و کینتیک الکترودها در این فصل شروع و در فصلهای ۹ و ۱۰ بطور مفصل بحث خواهند شد. غالباً فاکتورهای متالورژیکی تاثیر زیادی بر مقاومت خوردگی می گذارند. موارد زیادی وجود دارد که در آنها از کنترل ساختمان متالورژیکی آلیاژها برای تقلیل خوردگی می توان استفاده کرد. شیمی فیزیک و زمینه های مختلف آن در مطالعه مکانیزمهای واکنشهای خوردگی، شرایط سطحی و بعضی خواص اصلی فلزات بسیار مفید می باشند. در این فصل و فصلهای بعدی، تمام زمینه هایی که در درک و کنترل خوردگی مهم هستند مورد استفاده قرار خواهند گرفت. چون در کاربردهای مهندسی سرعت خوردگی از اهمیت ویژه ای برخوردار است، تئوری و نظریه های الکتروشیمیائی مفصل تر بحث خواهند شد.

۲-۲ روشهای بیان سرعت خوردگی

در این کتاب، فلزات و غیر فلزات بر اساس مقاومت خوردگی با یکدیگر مقایسه خواهند شد. برای اینکه این مقایسه هամفهرمی داشته باشد، سرعت خوردگی مواد بایستی بطور کمی بیان گردد. برای بیان سرعت خوردگی از روشهای مختلفی مثل درصد کاهش وزن، میلی گرم بر سانتیمتر مربع بر روز و گرم بر اینچ مربع بر ساعت استفاده می گردد. این روشها ضخامت از دست رفته را نمی توانند نشان دهند. از نقطه نظر مهندسی، سرعت نازک شدن یک قطعه ساختمانی می تواند مستقیماً برای پیش بینی عمر آن بکار رود.

بدلیل فوق، ضخامت از دست رفته بر حسب هزارم اینچ در سال (mpy) بهترین روش بیان سرعت خوردگی است و در این کتاب مورد استفاده قرار خواهد گرفت. با داشتن تقلیل وزن نمونه در آزمایش خوردگی بوسیله رابطه زیر می توان mpy را محاسبه نمود.

$$\text{mpy} = \frac{534W}{\text{DAT}}$$

در این رابطه W = تقلیل وزن، میلی گرم

D = دانسیته نمونه، گرم بر سانتیمتر مکعب

A = سطح نمونه، به اینچ مربع

T = زمان آزمایش، ساعت

سرعت خوردگی که بدین ترتیب حاصل می گردد از اعداد صحیح تشکیل شده که کارکردن با آن راحت تر است

در بخش ۱۳-۴ از فصل ۴ روابط سرعت خوردگی با جزئیات بیشتر و در سیستم متریک مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

جنبه های الکتروشیمیائی خوردگی

۲-۳ واکنشهای الکتروشیمیائی: طبیعت الکتروشیمیائی خوردگی را می توان با خورده شدن فلز روی بوسیله اسید کلریدریک نشان داد. موقعی که یک قطعه روی را داخل اسید کلریدریک وارد می کنیم، واکنش سریع و مداومی اتفاق می افتد، گاز هیدروژن آزاد شده و روی وارد محلول می شود و تشکیل محلول کلرور روی می دهند. واکنش

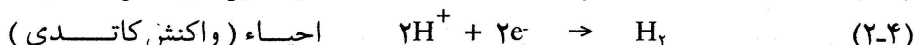
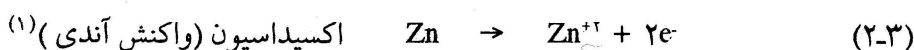
انجام شده به شکل زیر است:



با توجه به اینکه یون کلر در واکنش دخالتی ندارد، این معادله را بصورت زیر می توان نوشت:



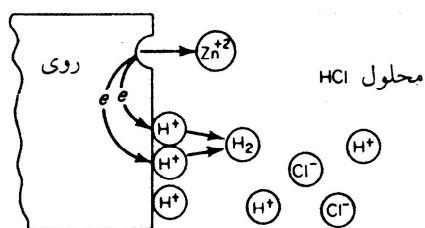
بدین ترتیب، روی با یونهای هیدروژن اسید ترکیب شده و تشکیل یونهای روی و گاز هیدروژن می دهد. در طی این واکنش، روی اکسید شده و تبدیل به یونهای روی می شود و یونهای هیدروژن با گرفتن الکترونهای آزاد شده توسط روی احیاء شده و تبدیل به هیدروژن شده اند. بدین ترتیب معادله (۲-۲) را می توان بسادگی به دو واکنش، اکسیداسیون روی و احیاء یونهای هیدروژن تقسیم نمود:



در واکنش اکسیداسیون ظرفیت افزایش می یابد یا بعبارت دیگر الکترون تولید می شود. در صورتی که در واکنش احیاء ظرفیت کم می شود یا الکترون مصرف می شود. واکنش اکسیداسیون را آندی و واکنش احیاء را کاتدی نیز می نامند. معادلات (۲-۳) و (۲-۴) واکنش های جزئی بوده^(۲) و هر دو بایستی در یک زمان و با سرعت یکسان روی سطح فلز اتفاق بیفتند. در غیر اینصورت، فلز بطور ناگهانی دارای بارالکتریکی خواهد شد، که غیر ممکن است. این یکی از مهمترین اصول خوردگی است، در مرحله خوردگی فلزات، سرعت اکسیداسیون مساوی سرعت احیاء است (از نقطه نظر تولید و مصرف الکترون).

۱ - تا این اواخر تئوری خوردگی معمولاً بر اساس مفهوم نواحی موضعی آندی و کاتدی موجود در سطح استوار بوده است. لکن بیان پدیده خوردگی براساس اصول مدرن سینتیک الکتروود (تئوری پتانسیل فلز مختلط) حالت عمومی تری دارد زیرا این تئوری قابل کاربرد به انواع سیستمهای خورنده می باشد. همچنین این تئوری به فرضیات توزیع واکنشهای آندی و کاتدی بستگی ندارد. قابل ذکر است که این دو روش تجربه و تحلیل پدیده خوردگی با یکدیگر مغایرت نداشته و تنها نشان دهنده دو نوع روش مختلف برای نزدیک شدن به مسئله می باشند، در این کتاب بواسطه سادگی و عمومی تر کاربرد از مفهوم سینتیک الکتروود استفاده می گردد.

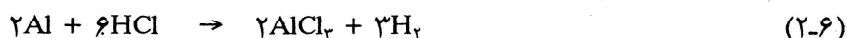
مسئله فوق در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. در اینجا یک اتم روی تبدیل به یون روی و دو الکترون شده است. این الکترون‌ها که در فلز باقی می‌مانند، در واکنش احیاء یونهای هیدروژن سرعت مصرف می‌شوند. در شکل (۲-۳) این دو واکنش بخاطر واضح‌تر بودن، جدا از هم نشان داده شده‌اند. این مسئله که آنها عملاً در یک نقطه اتفاق می‌افتند، یا خیر، اصل بقاء الکتریکی را نقض نمی‌کند. در بعضی حالات، واکنش



شکل ۲-۳ واکنشهای الکتروشیمیایی که هنگام خوردن فلز روی در اسید کلریدریک عاری از هوا (فاقد اکسیژن حل شده) اتفاق می‌افتند.

اکسیداسیون بطور یکنواخت روی سطح فلز واقع می‌شود، در حالی که در برخی موارد دیگر موضعی بوده و در نواحی خاصی اتفاق می‌افتد. این اثرات بطور مفصل در فصلهای بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

خوردگی روی در اسید کلریدریک یک فرآیند الکتروشیمیایی است. هر واکنش را که بتوان تقسیم به دو یا چند واکنش جزئی اکسیداسیون و احیاء نمود، واکنش الکتروشیمیایی می‌نامند. تقسیم واکنشهای الکتروشیمیایی خوردگی به واکنشهای جزئی، مطالعه آنها را آسان‌تر می‌کند. آهن و آلومینیم نیز بوسیله اسید کلریدریک سرعت خورده می‌شوند و واکنشهای خوردگی آنها عبارتند از:



اگر چه در اولین نگاه این واکنشها کاملاً مختلف بنظر می‌رسند، مقایسه واکنشهای جزئی اکسیداسیون و احیاء نشان می‌دهد که واکنشهای (۱-۲)، (۲-۵) و (۲-۶) کاملاً مشابه یکدیگر هستند. تمام این واکنشها مشتمل بر احیاء یون هیدروژن بوده و تنها واکنشهای

آندی یا اکسیداسیون آنها با یکدیگر فرق دارد.



بدین ترتیب مسئله جگونگی خوردگی اسید کلریدریک، حل می شود زیرا در هر مورد واکنش کاتدی آزاد شدن گاز هیدروژن بر طبق واکنش (۲-۴) است. این مطلب در مورد خوردگی اسیدهای دیگر مثل اسید سولفوریک، فسفریک، فلوریدریک و اسیدهای آلی محلول در آب مثل اسیدفرمیک و اسید استیک نیز صادق است. در هر مورد، تنها یون هیدروژن عامل فعال است و یونهای دیگر مثل سولفات، فسفات و استات در واکنش الکتروشیمیائی شرکت نمی کنند.

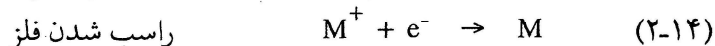
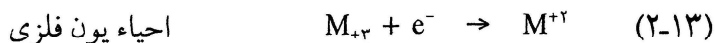
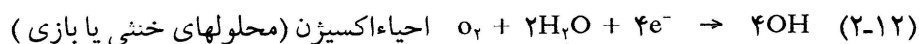
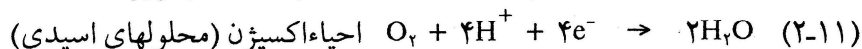
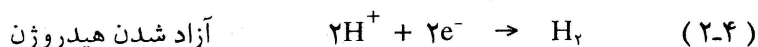
هنگامی که از نقطه نظر واکنشهای جزئی اکسیداسیون و احیاء مسئله را در نظر بگیریم، کلیه انواع خوردگی را می توان در تعداد معدودی از واکنشهای عمومی خلاصه نمود. واکنش آندی در هر فرآیند خوردگی، اکسیداسیون فلز به یونهای آن می باشد. این مطلب را بصورت کلی زیر می توان نوشت:



چند مثال در این باره:



در هر مورد تعداد الکترونها تولید شده مساوی با ظرفیت یون می باشد. در خوردگی فلزات چند نوع واکنش کاتدی مختلف وجود دارد که غالباً بصورت یک یا چند تا از واکنشهای زیر می تواند اتفاق بیفتد:



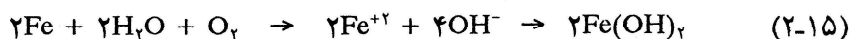
آزاد شدن هیدروژن یک واکنش کاتدی متداول است زیرا محلولهای اسید یا اسیدی در عمل فراوانند. احیاء اکسیژن نیز خیلی معمول است زیرا هر محلول آبی که در تماس با هوا باشد قادر خواهد بود این واکنش را انجام دهد. احیاء یون فلزی یا راسب شدن فلز، واکنشهای نادرتری بوده و بیشتر در مسیرهای فرآیندهای شیمیائی اتفاق می افتند. تمام این واکنشها کاملاً مشابه هستند - تمام آنها الکترون مصرف می کنند. واکنشهای جزئی فوق را می توان برای تفسیر تقریباً تمام مسائل خوردگی بکاربرد. مثلاً وقتی که آهن را درون آب یا آبی که در تماس با اتمسفر قرار دارد، فرو ببریم خوردگی واقع می شود (مثال عملی در این مورد، زنگ زدن بدنه اتومبیل در اثر رطوبت هوا، یا زنگ زدن یک ستون فولادی در آب دریا می باشد). واکنش آندی عبارت است از:



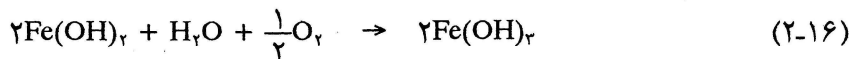
چون محیط مورد نظر در تماس با اتمسفر قرار دارد بنابراین حاوی اکسیژن حل شده می باشد. آب و آب دریا تقریباً خنثی هستند و بدین ترتیب واکنش کاتدی عبارت خواهد بود از:



با توجه باینکه یونهای سدیم و کلر در واکنش شرکت نمی کنند، واکنش کلی از جمع دو واکنش (2-7) و (2-12) بدست می آید:



رسوبات هیدروکسیدفروز محلول جدا می شوند. لکن این ترکیب در محلولهای اکسیژن دار ناپایدار بوده و به نمکهای فربک اکسید می شود.



محصول نهائی همان "زنگ" معروف آهن است.

مثال کلاسیک واکنشهای جابجائی، واکنش روی با محلول سولفات مس، راسب شدن فلز را نشان می دهد.



یا از نقطه نظر واکنشهای جزئی

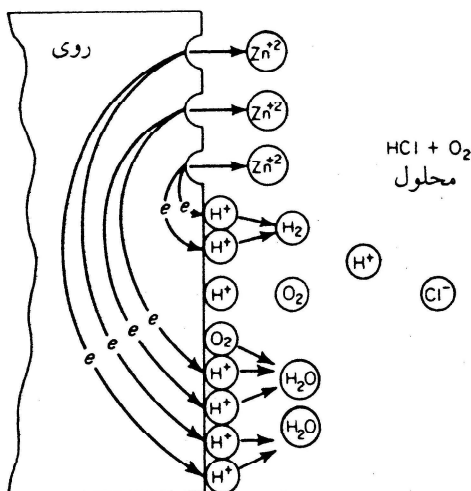


ابتد روی بوسیله لایه‌ای از مس پوشیده شده و در نهایت جرم متخلخلی از مس و محلول سولفات روی خواهیم داشت.

هنگام خوردگی ممکن است بیشتر از یک واکنش اکسیداسیون و احیاء صورت بگیرد. هنگام خوردگی یک آلیاژ، فلزات تشکیل دهنده آن بصورت یونهای خود به داخل محلول می‌روند. زمانی موضوع اهمیت بیشتر پیدا می‌کند که بیش از یک واکنش احیاء انجام می‌پذیرد. مثلاً وضعیتی را در نظر بگیرید که در آن روی در اسید کلریدریک هوادار خورده می‌شود. در این حالت دو واکنش کاتدی امکان پذیر است. آزاد شدن هیدروژن و احیاء اکسیژن، این مسئله در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. روی سطح فلز روی دو واکنش مصرف کننده الکترون وجود دارد. چون سرعت‌های اکسیداسیون و احیاء بایستی مساوی باشند، افزایش کل سرعت احیاء باعث افزایش سرعت حل شدن روی در محلول می‌گردد. بنابراین محلولهای اسیدی حاوی اکسیژن حل شده، خورنده‌تر از اسیدهای عاری از اکسیژن می‌باشند. احیاء اکسیژن یک وسیله دیگر مصرف الکترون را آماده می‌سازد. اگر عوامل اکسید کننده دیگری نیز در محلولهای اسیدی وجود داشته باشند، حالت مشابهی بوجود می‌آید. یک ناخالصی که در اسید کلریدریک صنعتی تقریباً همیشه وجود دارد، یون فریک بصورت کلرورفریک می‌باشد. در چنین اسید صنعتی، فلزات خیلی سریعتر خورده می‌شوند زیرا در این حالت نیز دو واکنش کاتدی وجود دارد، آزاد شدن هیدروژن و احیاء یون فریک:



بدلیل وابسته بودن واکنشها آندی و کاتدی به یکدیگر، می‌توان با تقلیل سرعت هر یک از این واکنشها، سرعت خوردگی را کاهش داد. در مورد فوق که اسید ناخالص وجود دارد اگر یونهای فریک آنرا حذف نمائیم، کل مقدار واکنشهای کاتدی کم می‌شود. با قطع ارتباط هوا با محلولهای آبی یا حذف هوایی که در آن حل شده، واکنش احیاء اکسیژن نیز حذف می‌گردد. اگر آب یا آب دریا بدون اکسیژن داشته باشیم، آهن در آن خورده نخواهد شد زیرا در این حالت واکنش کاتدی وجود ندارد.



شکل ۲-۴ واکنشهای الکتروشیمیایی که هنگام خورده شدن فلز روی در اسیدکلریدریک هوادار (دارای اکسیژن حل شده) اتفاق می افتند.

هنگامی که سطح یک فلز را با رنگ یا پوسته های عایق دیگر می پوشانیم، سرعت واکنشهای کاتدی و آندی هر دو تقلیل یافته و خوردگی متوقف می گردد. ممانعت کننده های خوردگی^(۱) موادی هستند که وقتی مقدار کم از آنها را به محلول خورنده اضافه نمائیم، خوردگی آن محلول کم می شود. طرز عمل ممانعت کننده های خوردگی ایجاد اختلال در واکنشهای کاتد یا آندی، یا هر دو می باشد. اکثر این ممانعت کننده ها ترکیبات آلی هستند و طرز عمل آنها تشکیل پوه ته نازک و نفوذ ناپذیری روی سطح فلز یا ایجاد اختلال در یکی از واکنشهای کاتدی یا آندی می باشد.

آمینهای که جرم مولکولی بالائی دارند مانع از واکنش آزاد شدن هیدروژن می شوند و در نتیجه سرعت خوردگی کاهش می یابد. واضح است که خوردگی یک فلز مستلزم هدایت الکتریکی بالا در فلز و الکترولیت مربوطه است. البته افزایش مقاومت

فلز عملی نیست زیرا وقتی که نقاط آندی و کاتدی روی یک سطح قرار دارند محل آنها کاملاً مشخص نیست و همچنین قابل پیش بینی هم نیستند، ولی می توان مقاومت الکتریکی الکترولیت یا محیط خورنده را افزایش داد و بدین ترتیب سرعت خوردگی را کم نمود. آب خیلی خالص خوردگی خیلی کمتری نسبت به آبهای ناخالص یا آبهای طبیعی دارد. علت این امر بالا بودن مقاومت الکتریکی آب خیلی خالص می باشد. روشهای افزایش مقاومت در مقابل خوردگی در فصلهای بعدی بطور مفصل مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۲-۴ پولاریزاسیون

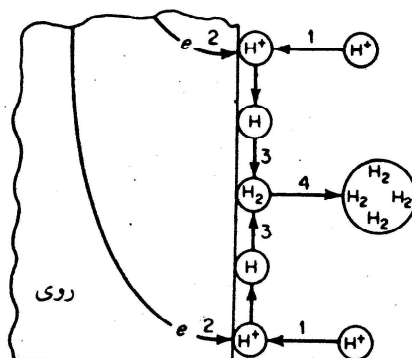
بدلیل اهمیت پولاریزاسیون در درک رفتار خوردگی و واکنشهای آن، در اینجا مسئله پولاریزاسیون بطور مختصر بحث می شود و بحث کمی و جامع آن در فصلهای ۹ و ۱۰ انجام خواهد شد.

سرعت یک واکنش الکتروشیمیایی بوسیله فاکتورها شیمیایی و فیزیکی مختلفی کنترل می شود. بدین ترتیب گفته می شود واکنش الکتروشیمیایی در اثر فاکتورهای محیطی پولاریزه یا مختل شده است. دو نوع پولاریزاسیون، یعنی پولاریزاسیون اکتیواسیون و پولاریزاسیون غلظتی را در اینجا مورد بحث قرار می دهیم.

پولاریزاسیون اکتیواسیون به یک واکنش الکتروشیمیایی که بوسیله ترتیب مراحل مختلف واکنش در فصل مشترک فلز-الکترولیت کنترل می گردد، اطلاق می شود. این مطلب را بسادگی می توان با در نظر گرفتن اتفاقاتی که در واکنش آزاد شدن هیدروژن روی سطح فلز روی در حین خوردگی در اسید اتفاق می افتد، نشان داد.

در شکل (۲-۵) بطور شماتیکی مراحل مختلفی که احیاء هیدروژن روی سطح روی می تواند طی کند، نشان داده شده است. این مراحل همچنین می توانند در حین احیاء هر یونی بر روی سطح فلز، انجام شوند. قبل از آنکه واکنش بتواند انجام شود یونهای هیدروژن بایستی جذب سطح بشوند یا به سطح متصل شوند (مرحله ۱). بعد از این مرحله، انتقال الکترون (مرحله ۲) بایستی اتفاق بیفتد، در این مرحله یون هیدروژن احیاء می شود. سپس بایستی دو اتم هیدروژن با همدیگر ترکیب شده و تشکیل مولکول هیدروژن بدهند (مرحله ۳). مرحله بعدی، تجمع مولکولهای هیدروژن برای تشکیل حباب هیدروژن (مرحله ۴) می باشد. سرعت احیاء یونهای هیدروژن بوسیله کندترین

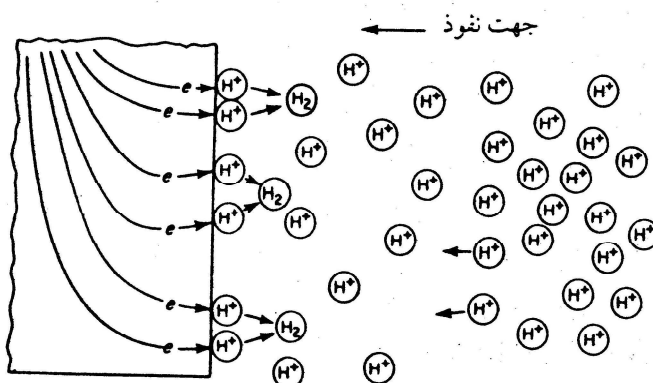
مرحله کنترل می‌گردد. مکانیزمهای مختلفی برای احیاء هیدروژن پیشنهاد شده که اکثر آنها پیچیده تر از تصویر فوق‌الذکر هستند.



شکل ۲-۵ واکنش احیاء هیدروژن که تحت تأثیر پولاریزاسیون اکتیواسیون قرار دارد.

پولاریزاسیون غلظتی به واکنشهای الکتروشیمیایی که بوسیله نفوذ یا دیفوزیون^(۱) در الکترولیت کنترل می‌شود، اطلاق می‌گردد. این مسئله در شکل ۲-۶ در مورد واکنش آزاد شدن هیدروژن نشان داده شده است. ، در اینجا، مقدار یونهای هیدروژن در محلول کاملاً پائین است، و سرعت واکنش بوسیله دیفوزیون یونهای هیدروژن به سطح فلز کنترل می‌گردد.

توجه کنید که در این مورد سرعت احیاء بیشتر بوسیله اتفاقاتی که در داخل محلول اتفاق می‌افتد، کنترل می‌گردد تا بوسیله فعل و انفعالاتی که در سطح واقع می‌شوند. پولاریزاسیون اکتیواسیون معمولاً در خوردگی در محیطی که شامل غلظت بالائی از یونهای فعال است (مثل اسیدهای غلیظ) واقع می‌شود. پولاریزاسیون غلظتی موقعی کنترل کننده است که غلظت یونهای احیاء شونده پائین باشد (مثلاً اسیدهای رقیق، محلولهای نمکی اکسیژن‌دار). در اکثر موارد پولاریزاسیون غلظتی در مرحله حل شدن در داخل محلول (واکنشهای اکسیداسیون) معمولاً کم بوده و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد، پولاریزاسیون غلظتی تنها در واکنشهای احیاء اهمیت دارد. تشخیص بین پولاریزاسیون اکتیواسیون و پولاریزاسیون غلظتی اهمیت زیادی دارد.



شکل ۲-۶ پولاریزاسیون غلظتی در مرحله احیاء هیدروژن

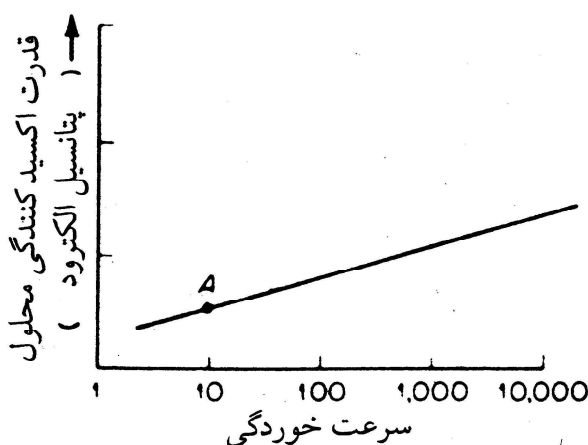
برحسب نوع پولاریزاسیونی که واکنش احیاء را کنترل می‌کند، متغیرهای محیط اثرات مختلفی می‌توانند داشته باشند. مثلاً هر نوع تغییری در سیستم که سرعت دیفوزیون را افزایش دهد اثرات پولاریزاسیون غلظتی را از بین خواهد برد و در نتیجه سرعت خوردگی افزایش خواهد یافت. بنابراین، موقعی که واکنش کاتدی بوسیله پولاریزاسیون غلظتی کنترل می‌شود، اضافه کردن سرعت یا تلاطم محیط خورنده باعث افزایش سرعت خوردگی خواهد گردید. اگر هر دوی واکنشهای آندی و کاتدی بوسیله پولاریزاسیون اکتیواسیون کنترل شوند، تلاطم محیط خورنده، تاثیری بر سرعت خوردگی نخواهد داشت. این اختلافات و موارد دیگر در فصلهای ۹ و ۱۰ به تفصیل مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۲-۵ روئین شدن یا غیر فعال شدن^(۱)

از زمان فارادی تاکنون، بیشتر از ۱۲۰ سال، غیر فعال شدن باعث اعجاب و تحسین دانشمندان بوده است. این پدیده رابسختی می‌توان تعریف نمود، زیرا طبیعت آن پیچیده است و شرایطی که تحت آن بوجود می‌آید شرایط خاصی است. می‌توان گفت غیر فعال شدن، از بین رفتن میل ترکیب شیمیائی است که در مورد بعضی فلزات و آلیاژها تحت شرایط معینی بوجود می‌آید. بدین معنی که بعضی فلزات و آلیاژها تقریباً

کاملاً نجیب و خنثی شده و طوری رفتار می‌کنند که گویا فلزات نجیبی مثل پلاتین و طلا هستند. خوشبختانه مستعدترین فلزات از این نظر، فلزات ساختمانی معمولی و مهندسی، مثل آهن، نیکل، سیلیسیم، کرم، تیتانیم و آلیاژهای شامل این فلزات می‌باشند. همچنین تحت شرایط محدودتری فلزات دیگری مثل روی، کادمیم، قلع، اورانیم و توریم نیز خاصیت غیر فعال شدن از خود نشان می‌دهند.

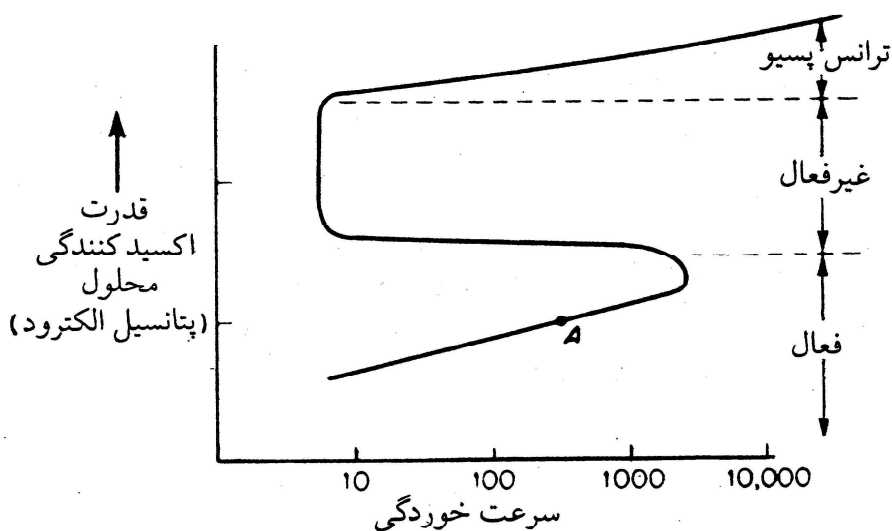
اگر چه غیر فعال شدن را بسختی و مشکل می‌توان تعریف کرد، لکن با مشخص کردن نحوه رفتار فلزاتی که این اثرات را از خود نشان می‌دهند، می‌توان آنرا بطور کمی بیان نمود. ابتدا رفتار فلزی که می‌توان آنرا فلز نرمال نامید در نظر گرفته می‌شود (فلزی که خاصیت غیر فعال شدن را از خود نشان نمی‌دهد). در شکل ۷-۲ نحوه رفتار این فلز نشان داده شده است. فرض کنید فلزی را در اسید عاری از اکسیژن فرو کرده ایم. قدرت اکسیدکنندگی اسید و سرعت خوردگی حاصل نقطه A را بدست می‌دهد.



شکل ۷-۲ سرعت خوردگی فلز بر حسب اکسیدکنندگی محلول (پتانسیل الکترود)

حال اگر قدرت اکسیدکنندگی محلول را افزایش دهیم (مثلاً با اضافه کردن اکسیژن یا یون فریک)، سرعت خوردگی فلز بر سرعت افزایش می‌یابد. توجه کنید که در مورد این فلز، با افزایش قدرت اکسیدکنندگی محلول، سرعت خوردگی نیز مدام افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت خوردگی بصورت اکسپونانسیل بوده و اگر در مقیاس نیمه لگاریتمی

رسم شود، شکل ۷-۲، خط مستقیمی بدست خواهد آمد. قدرت اکسیدکنندگی محلول به قدرت اکسیدکنندگی یونهای محلول و غلظت آنها بستگی دارد. در فصل ۹ و ۱۰ خواهیم دید که قدرت اکسیدکنندگی دقیقاً با پتانسیل الکتروود نشان داده می شود. شکل ۸-۲ نشان دهنده رفتار عمومی فلزاتی است که خاصیت غیر فعال شدن را از خود نشان می دهند. رفتار این فلزات را بسهولت می توان به سه منطقه فعال، غیر فعال و ترانس پسیو تقسیم نمود. در منطقه فعال، رفتار فلز شبیه رفتار یک فلز نرمال است. افزایش جزئی قدرت اکسیدکنندگی محلول باعث افزایش سریع سرعت خوردگی می شود. چنانچه افزایش عامل اکسیدکننده ادامه یابد، سرعت خوردگی بطور ناگهانی کم می شود. این حالت مربوط به آغاز ناحیه غیر فعال^(۱) می باشد. افزایش بیشتر عامل اکسید کننده (در صورتی که اثر داشته باشد) تاثیر بسیار کمی بر سرعت خوردگی فلز مورد نظر خواهد داشت. بالاخره، در غلظتهای خیلی بالای ماده اکسیدکننده یا در حضور اکسیدکننده های خیلی قوی، سرعت خوردگی دوباره افزایش یافته و این ناحیه را ناحیه ترانس پسیو^(۲) می نامند.



شکل ۸-۲ رفتار خوردگی فلزی که دارای انتقال فعال - غیر فعال است بر حسب قدرت اکسیدکنندگی محلول (پتانسیل الکتروود)

توجه نمائید که در مرحله انتقال از منطقه فعال به غیر فعال، معمولاً سرعت خوردگی 10^2 تا 10^4 برابر کم می شود. علت دقیق انتقال حالت فعال - غیر فعال - ترانس پسیو، کاملاً مشخص نیست. این یک حالت خاص از پولاریزاسیون اکتیواسیون است که ناشی از تشکیل یک پوسته یا فیلم سطحی یا یک مانع محافظ می باشد. این پوسته سطحی در محدوده وسیعی از قدرت اکسیدکنندگی پایدار بوده و نهایتاً در محلولهای اکسیدکننده بسیار قوی از بین می رود. طبیعت یا ماهیت این پوسته محافظ نامعلوم است، لکن برای کاربرد های مهندسی دانستن مکانیزم این پدیده غیر عادی حیاتی نیست، زیرا بسهولت می توان بوسیله اطلاعاتی شبیه شکل ۲-۸ آنرا کاملاً مشخص نمود و مورد استفاده قرار داد.

بطور خلاصه، فلزاتی که دارای خاصیت انتقال فعال - غیر فعال هستند در محیطهای اکسیدکننده خیلی قوی تا محیطهای اکسیدکننده متوسط غیر فعال می شوند یعنی در مقابل خوردگی بسیار مقاوم می شوند. این فلزات در شرایط بسیار قوی مقاومت در برابر خوردگی خود را از دست داده و سرعت خوردگی افزایش می یابد. این ویژگی بطور موفقیت آمیزی در توسعه و اصلاح روشهای جدید مقابله با خوردگی و پیش بینی مقاومت خوردگی بکار رفته است. این کاربردها بطور مفصل تر در فصول بعدی مورد بحث قرار گرفته اند.

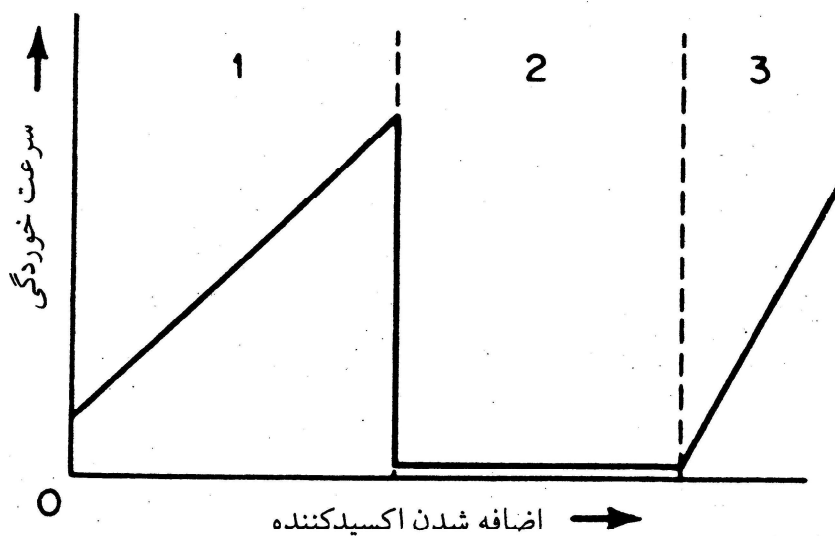
اثرات یا فاکتورهای محیطی

غالباً در صنایع فرآیندی مواقعی پیش می آید که لازم است بعضی متغیرها و فاکتورهای سیستم را تغییر داد. یکی از متداول ترین سئوالات این است که اثر این تغییرات روی سرعت خوردگی چگونه است. در قسمت بعدی اثر تغییر بعضی متغیرهای متداول بر اساس پدیده هایی که در قسمتهای قبلی بآنها اشاره شده است، مورد بحث قرار می گیرند.

۲-۶ اثر اکسیژن و اکسیدکننده ها

اثر اکسیدکننده ها و قدرت اکسیدکنندگی در رابطه با رفتار فعال - غیر فعال فلز در بالا بحث شد. اثر اکسیدکننده ها بر سرعت خوردگی بوسیله شکل ۲-۹ نشان داده

شده است. توجه کنید که شکل این منحنی شبیه شکل منحنی ۸-۲ است و این شکل نیز به سه ناحیه تقسیم شده است. رفتاری شبیه رفتار در منطقه ۱ خصوصیت یک فلز نرمال است و همچنین نشان دهنده رفتار یک فلز فعال - غیر فعال است که در حالت فعال قرار دارد. فلزاتی که انتقال فعال - غیر فعال از خود نشان می دهند، تنها در صورتی غیر فعال می شوند که مقدار کافی عامل اکسیدکننده قوی به محیط آنها اضافه شود. افزایش سرعت خوردگی با افزایش غلظت اکسیدکننده، منطقه ۱، ویژه مونل و مس در محلولهای اسیدی محتوی اکسیژن می باشد، بطوریکه این دو فلز غیر فعال نمی شوند.



مثالها

- ۱: مونل در $\text{HCl} + \text{O}_2$
 مس در $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2$
 آهن در $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$
 ۸-۲: $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Fe}^{+3}$ در ۱۸Cr-۸Ni
 تیتریم در $\text{HCl} + \text{Cu}^{+2}$
 ۲: HNO_3 در ۱۸Cr-۸Ni
 هستولی C در FeCl_3
 ۲-۳: $\text{HNO}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ در ۱۸Cr-۸Ni
 ۱-۲-۳: $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ در دماهای بالا

شکل ۹-۲ تأثیر اکسیدکننده ها و هوادهی بر سرعت خوردگی

اگر چه آهن می تواند در آب غیر فعال شود، لکن قابلیت انحلال اکسیژن در آب محدود است، و در اکثر موارد برای بوجود آوردن یک حالت غیر فعال در آهن کافی نخواهد بود، (شکل ۸-۲).

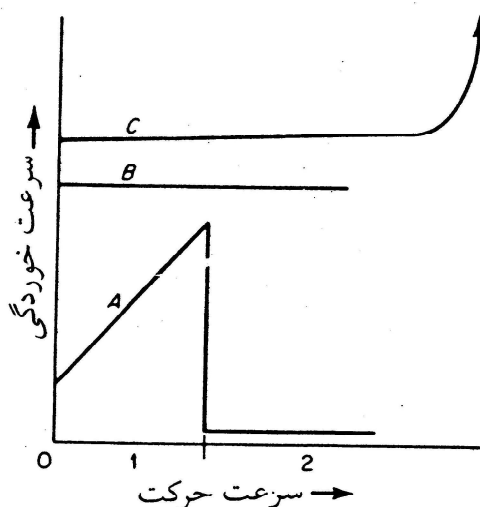
افزایش سرعت خوردگی و بدنبال آن کاهش سریع سرعت خوردگی و ثابت ماندن سرعت خوردگی علیرغم افزایش غلظت اکسیدکننده، ویژه فلزات و آلیاژهای فعال - غیر فعال مثل فولاد ۱۸ Cr-۸Ni (فولاد زنگ نزن) و تیتانیم می باشد. اگر یک فلز فعال - غیر فعال در آغاز در یک محیط در حالت غیر فعال باشد، افزایش عوامل اکسیدکننده اثر ناچیزی بر سرعت خوردگی خواهد داشت. این حالت غالباً وقتی که یک فلز فعال - غیر فعال را به درون یک محیط اکسیدکننده مثل اسیدنیتریک یا کلرورفریک فرو می کنیم، اتفاق می افتد. رفتاری که بوسیله مناطق ۲ و ۳ نشان داده شده است، موقعی اتفاق می افتد که یک فلز که ابتدا در حالت غیر فعال قرار دارد، در معرض اکسیدکننده های خیلی قوی قرار گرفته و به منطقه ترانس پسیو منتقل می شود. این نوع رفتار غالباً در مورد فولادهای زنگ نزن که در معرض محیطهای خورنده محتوی عوامل اکسیدکننده بسیار قوی مثل کرومات هامی باشند، اتفاق می افتد. در مخلوطهای نیترا ته کردن گرم شامل اسید سولفوریک غلیظ و اسید نیتریک، کل نواحی فعال - غیر فعال - ترانس پسیورا با افزایش نسبت اسید نیتریک به اسید سولفوریک می توان بدست آورد.

واضح است که اثر افزایش عامل اکسیدکننده یا وجود اکسیژن بر سرعت خوردگی بستگی به دو عامل محیط و فلز دارد. سرعت خوردگی با افزایش اکسیدکننده ها ممکن است افزایش یابد، اکسیدکننده ها ممکن است اثری بر سرعت خوردگی نداشته باشند یا یک رفتار خیلی پیچیده مشاهده گردد. با اطلاع از خصوصیات اصلی فلز و آلیاژ و محیطی که با آن در تماس است، می توان در اکثر موارد، اثر افزایش عامل اکسید کننده را پیش بینی نمود.

۲-۷ اثرات سرعت حرکت

اثرات سرعت حرکت بر خوردگی، مثل افزایش قدرت اکسیدکنندگی، پیچیده است و بستگی به خصوصیات فلز و محیط آن دارد. شکل ۱۰-۲ اثر بهم خوردن و سرعت حرکت محلول را بر سرعت خوردگی نشان

می دهد. در واکنشهای خوردگی که بوسیله پولاریزاسیون اکتیواسیون کنترل می شوند، سرعت یا تلاطم بر سرعت خوردگی بی اثر است، این حالت در منحنی B، از شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. اگر فرآیند خوردگی تحت پولاریزاسیون غلظتی کاتدی قرار داشته باشد، در اینصورت بهم خوردن یا تلاطم محلول سرعت خوردگی را افزایش می دهد، (ناحیه ۱ از منحنی A در شکل ۲-۱۰). این اثر معمولاً موقعی اتفاق می افتد که یک عامل اکسید کننده در مقادیر خیلی کم وجود دارد، مثلاً وقتی که در آب یا اسید مقداری اکسیژن حل شده وجود داشته باشد.



مثالها

منحنی A:

۱: آهن در $H_2O + O_2$

مس در $H_2O + O_2$

۱-۲: $18Cr-8Ni$ در $H_2SO_4 + Fe^{+3}$

تیتانیم در $HCl + Cu^{+2}$

منحنی B:

آهن در HCl رقیق

$18Cr-8Ni$ در H_2SO_4

منحنی C:

سرب در H_2SO_4 رقیق

آهن در H_2SO_4 غلیظ

شکل ۲-۱۰ تاثیر سرعت حرکت بر سرعت خوردگی

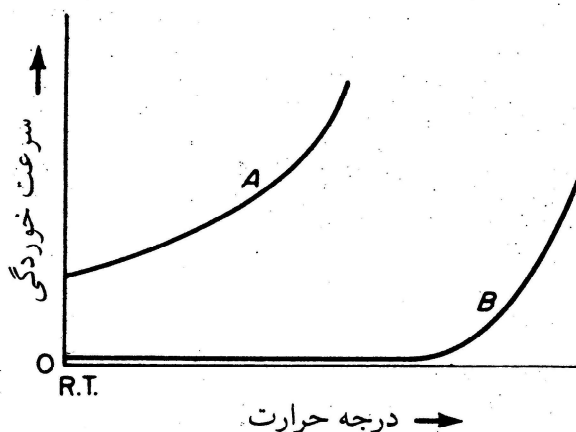
اگر واکنش تحت کنترل دیفوزیونی باشد و فلز بسادگی غیرفعال بشود، در اینصورت مناطق ۱ و ۲ از منحنی A، مشاهده خواهند شد. یعنی با افزایش سرعت، فلز از حالت فعال به حالت غیرفعال منتقل می‌شود. آلیاژها یا فلزاتی که سهولت غیرفعال می‌شوند مثل فولاد زنگ‌زن و تیتانیم، در مواقعی که سرعت محیط خورنده بالاست، مقاومت بیشتری در مقابل خورده شدن دارند.

بعضی فلزات مقاومت در مقابل خوردگی در بعضی محیطها را مدیون پوسته‌های محافظ و ضخیمی می‌باشند که روی سطح آنها تشکیل می‌شود. این پوسته‌ها از لایه‌های نازک غیر فعال کننده متمایز هستند زیرا به سهولت قابل رویت بوده و دارای چسبندگی کمتری به سطح فلز نسبت به پوسته‌های غیر فعال می‌باشند. عقیده بر آن است که سرب و فولاد بوسیله پوسته‌های نامحلول سولفات از خوردگی اسید سولفوریک در امان می‌مانند. اینگونه فلزات چنانچه در معرض محیط خورنده با سرعت حرکت بسیار بالا قرار قرار بگیرند، خسارات مکانیکی یا کنده شدن این پوسته‌ها می‌تواند اتفاق بیفتد و منجر به خوردگی سریع و ناگهانی، مشابه منحنی C در شکل ۱۰-۲ بشود. این نوع خوردگی را خوردگی سایشی می‌نامند که در فصل ۳ مورد بحث قرار خواهد گرفت. در مورد منحنی C، توجه کنید که تا موقعی که خسارت مکانیکی اتفاق نیافتاده است تاثیر افزایش سرعت یا تلاطم محیط خورنده، تقریباً ناچیز است.

۸-۲ اثر درجه حرارت

درجه حرارت باعث افزایش سرعت اکثر واکنشهای شیمیائی می‌شود. شکل ۱۱-۲ تاثیر درجه حرارت بر سزعت خوردگی فلزات را نشان می‌دهد. منحنی A رفتاری که در بالا به آن اشاره شد را نشان می‌دهد، یعنی با بالا رفتن درجه حرارت سرعت خوردگی خیلی سریع و یا اکسپونانسیلی افزایش می‌یابد. رفتاری که بوسیله منحنی B نشان داده شده نیز متداول است.

یعنی افزایش درجه حرارت ابتدا اثر بسیار کمی بر سرعت خوردگی داشته و در درجه حرارتهای بالاتر بطور ناگهانی سرعت خوردگی افزایش می‌یابد. در مورد فولاد زنگ‌زن ۸-۱۸ در اسیدنیتریک، این اثر را بسادگی می‌توان توضیح داد. افزایش درجه حرارت اسیدنیتریک قدرت اکسیدکنندگی آنرا بشدت افزایش می‌دهد. در درجه حرارتهای پائین تا متوسط، فولاد زنگ‌زن در حالت غیر فعال و نزدیک منطقه ترانس



مثالها

منحنی A:

H_2SO_4 در 18Cr-8Ni

HCl در نیکل

HF آهن در

منحنی B:

18Cr-8Ni در HNO_3 ، مونل در HF ، نیکل در NaOH

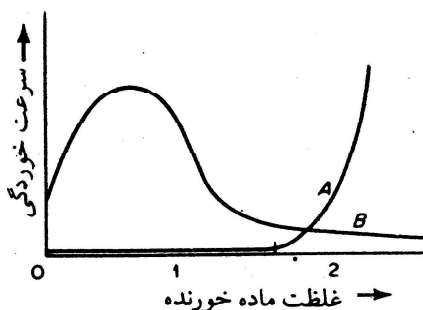
شکل ۲-۱۱ تاثیر درجه حرارت بر سرعت خوردگی

پسیو قرار دارد. بدین ترتیب، افزایش قدرت اکسیدکنندگی، فلز را به منطقه ترانس پسیو برده و در نتیجه سرعت خوردگی آن بشدت افزایش می یابد. مکانیزم مشابهی نیز برای توجیه رفتار مونل و نیکل، در شکل ۲-۱۱ وجود دارد. در بعضی موارد ممکن است نمودار B اشتباهاً نشان دهنده رفتار واقعی باشد. در صورتی که سرعت خوردگی در درجه حرارت های پائین خیلی کم بوده و بصورت اکسپونانسیل افزایش یابد نمودار خطی همانند منحنی B خواهد بود؛ بدین معنی که سرعت خوردگی سریعاً با درجه حرارت

افزایش خواهد یافت، چیزی که بواسطهٔ مقیاس انتخاب شده در نمودارهای معمولی سرعت خوردگی بر حسب درجهٔ حرارت، مشاهده نمی‌شود.

۲-۹ اثرات غلظت محیط خورنده

شکل ۲-۱۲ بطور شماتیکی اثرات غلظت محیط خورنده را بر سرعت خوردگی نشان می‌دهد. توجه کنید که در این شکل، منحنی A، دارای دو قسمت است. اکثر موادی که خاصیت غیر فعال شدن دارند بطور نامحسوسی تحت تاثیر تغییرات وسیعی از غلظت محیط خورنده قرار می‌گیرند، این مطلب در منطقهٔ ۱ از منحنی A مشاهده می‌گردد.



مثالها

منحنی A :

۱: نیکل در NaOH

HNO_3 در $18\text{Cr}-8\text{Ni}$

هاستولی B در HCl

Ta در HCl

۱-۲: مونل در HCl

سرب در H_2SO_4

منحنی B :

Al در اسید استیک CH_3COOH و HNO_3

H_2SO_4 در $18\text{Cr}-8\text{Ni}$

آهن در H_2SO_4

شکل ۲-۱۲ تاثیر غلظت محیط خورنده بر سرعت خوردگی

بعضی دیگر رفتار مشابهی دارند با این تفاوت که در غلظت‌های خیلی بالا سرعت خوردگی بشدت افزایش می‌یابد. این موضوع در مناطق ۱ و ۲ از نمودار A نشان داده شده است. سرب دارای این خاصیت است و عقیده بر آن است که سولفات سرب که در غلظت‌های پائین اسید سولفوریک پوسته محافظی است، در اسید سولفوریک غلیظ قابل حل است.

اسیدهایی که به هر غلظتی در آب قابل حل هستند غالباً باعث ایجاد منحنی‌هایی مثل منحنی B می‌شوند. ابتدا با افزایش غلظت محیط خورنده، سرعت خوردگی نیز افزایش می‌یابد. این خاصیت عمدتاً بخاطر این است که مقدار یون‌های هیدروژن که عوامل فعال هستند با افزایش غلظت اسید، افزایش می‌یابد. لکن با ادامه افزایش غلظت اسید، سرعت خوردگی به یک ماکزیمم رسیده و از آن به بعد تقلیل می‌یابد که بدون شک بخاطر این واقعیت است که در غلظت‌های خیلی بالای اسیدها، یونیزاسیون کم می‌شود. بخاطر این مسئله، اکثر اسیدهای متداول مثل اسید سولفوریک، استیک، فلوریدریک و غیره در حالت خالص و با غلظت صد درصد، در درجه حرارت‌های متوسط تقریباً خنثی هستند.

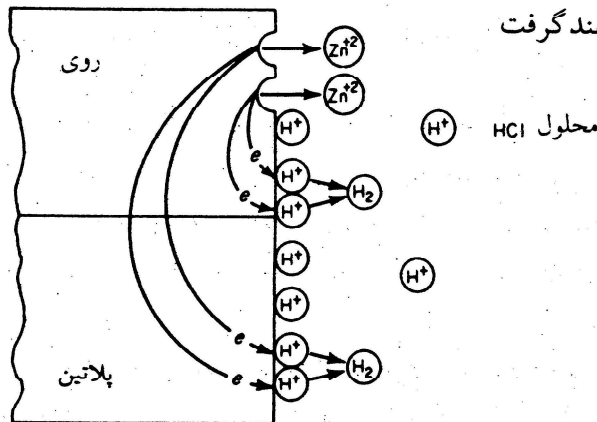
۱۰-۲ اثر اتصال گالوانیکی

در اکثر کاربردها در عمل، تماس یک فلز با یک غیرهمجنس، اجتناب ناپذیر است. در فرآیندهای شیمیائی پیچیده و سیستم‌های لوله‌کشی، فلزات و آلیاژهای مختلف غالباً در تماس با یکدیگر در معرض محیط خورنده قرار دارند. اثرات اتصال گالوانیکی بعداً بطور مفصل مورد بحث قرار خواهد گرفت و تنها در اینجا باختصار بیان می‌گردد. در شکل ۱۳-۲ یک قطعه روی را که به یک قطعه فلز نجیب^(۱) متصل است، در داخل محلول اسید کلریدریک نشان داده شده است. چون پلاتین در این محیط خنثی است^(۲) تنها سطحی که روی آن آزاد شدن هیدروژن می‌تواند انجام شود، افزایش می‌یابد، بعلاوه واکنش آزاد شدن هیدروژن روی سطح پلاتین بسیار سریعتر از سطح روی انجام می‌شود. این دو فاکتور سرعت واکنش کاتدی و نتیجتاً سرعت خوردگی روی را افزایش می‌دهند. توجه کنید که اثر اتصال گالوانیکی در این حالت تقریباً شبیه اضافه کردن یک ماده اکسیدکننده به محلول خورنده می‌باشد. در هر دو حالت، سرعت مصرف

1- Noble

2- Inert

الکترون افزایش می‌یابد و بدین ترتیب سرعت حل شدن فلز نیز افزایش می‌یابد. باید دانست که اتصال گالوانیکی همواره سرعت خوردگی یک فلز را افزایش نمی‌دهد. در بعضی موارد سرعت خوردگی فلز را کم می‌کند. این موارد خاص در فصول بعدی مورد بررسی قرار خواهند گرفت



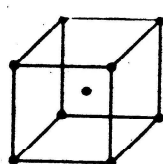
شکل ۲-۱۳ واکنشهای الکتروشیمیایی که روی کوپل گالوانیکی روی و پلاتین اتفاق می‌افتند

جنبه های متالورژیکی

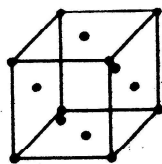
۲-۱۱ خواص فلزی جامداتی

فلزات و آلیاژها جامداتی کریستالی هستند، بدین معنی که اتمهای یک فلز در شبکه های معینی قرار دارند که از تکرار آنها جامد فلزی حاصل می‌گردد. متداول ترین شبکه های فلزی در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده‌اند. ساختمان شبکه آهن و چدن، مکعبی مرکزدار، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، مکعبی با وجوه مرکزدار، و منیزیم، منشور فشرده می‌باشد. خواص فلزی با خواص جامدات کریستالی دیگر مثل سرامیکها و نمکهای شیمیایی دیگر فرق دارد. فلزات انعطاف پذیر هستند (می‌توان آنها را تغییر شکل پلاستیکی داد) و همچنین هدایت الکتریسیته و گرمایی خوبی دارند. این خواص باعث پیوندهای غیر جهت دار بین اتمها در فلزات می‌باشد. هر اتم با حداکثر تعداد اتمی که از نظر هندسی امکان دارد تشکیل پیوند می‌دهد. بدین ترتیب همانطور که در شکل ۲-۱۴ مشاهده می‌شود، ساختمانهای کریستالی فلزات اکثراً ساده و پردانسیته می‌باشند. انعطاف پذیری احتمالاً مهمترین خاصیت فلزی است. در اثر اعمال نیرو، فلزات معمولاً قبل از شکست، متحمل تغییر شکل پلاستیکی یا دائم می‌شوند. در کاربردهای

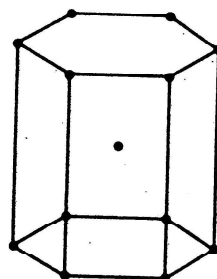
مهندسی این خاصیت بسیار با ارزش است. در مرحله ریختگری وقتی که فلز منجمد می شود، اتمها که در حالت مذاب بدون نظم خاصی قرار دارند، در شبکه های منظم که ویژگی حالت جامد است قرار می گیرند، لکن، بدست آوردن نظم حالت جامد در نقاط متعددی در داخل مذاب شروع می گردد و وقتی که این مجموعه های کریستالی یا دانه ها یکدیگر می رسند، در فصل مشترک کریستالها دچار عدم تطابق می شوند.



مکعبی مرکزدار



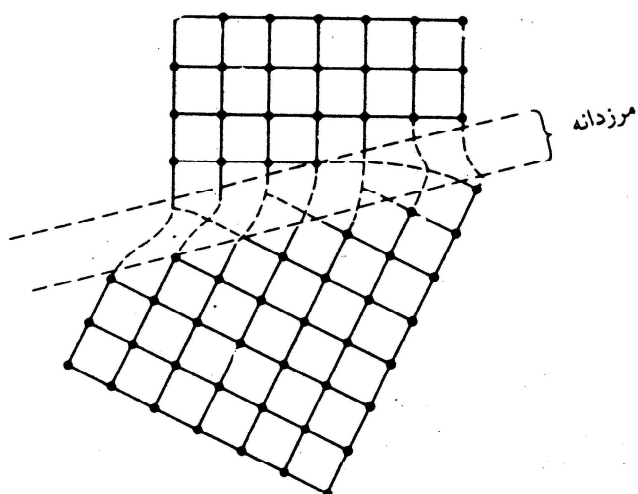
مکعبی با وجوه مرکزدار



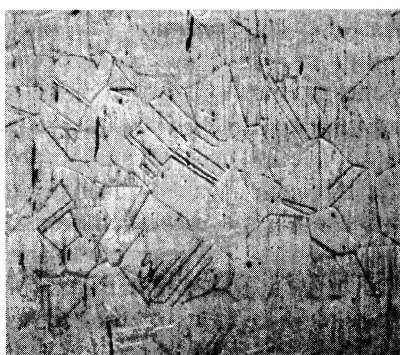
هگزاگونال پزدانسته

شکل ۱۴-۲ ساختمان کریستالی فلزات

فصل مشترک بین دو دانه را مرزدانه می گویند. در شکل ۱۵-۲ مرزدانه ها بصورت دو بعدی نشان داده شده است. چون پایدارترین حالت اتمها وقتی است که در شبکه کریستالی معین خود قرار می گیرند، مرزدانه ها نواحی پر انرژی بوده و از نظر شیمیایی فعالتر می باشند. بدین علت موقعی که سطح یک فلز در معرض یک ماده خورنده قرار می گیرد، مرزدانه ها اندکی سریعتر از سطح دانه ها خورده می شوند. همین اختلاف میل ترکیبی شیمیایی بین دانه ها و مرزدانه ها اساس اچ کردن در متالوگرافی است که بدینوسیله دانه های فلزات قابل رویت می شوند. در شکل ۱۶-۲ تصویر بزرگ شده سطح یک فولاد زنگ نزن ۸٪ Ni - ۱۸٪ Cr که در محلول اسید اچ شده است نشان داده شده است. مرزدانه ها بیشتر از دانه ها خورده شده اند و در نتیجه تیره رنگ بنظر می آیند.



شکل ۲-۱۵ مرزدانه در یک جامد چند کریستالی (نمایش دو بعدی)



شکل ۲-۱۶ تصویر میکروسکوپی فولاد زنگ‌نزن ۸ Ni - ۱۸ Cr که برای نشان دادن مرزدانه‌ها اچ شده است (۱۰۰x)

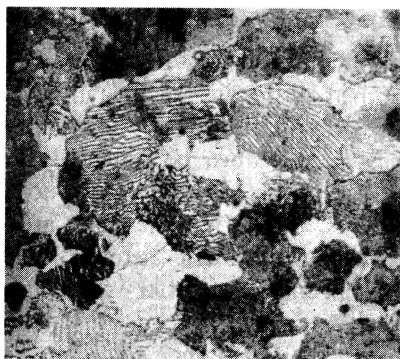
آلیاژها مخلوطهائی از دو یا چند فلز یا عنصر می باشند. آلیاژها را می توان به دو نوع همگن و غیر همگن تقسیم بندی کرد. آلیاژهای همگن در حقیقت محلولهای جامد^(۱) هستند. در این آلیاژها اجزا بهر نسبت در یکدیگر حل می شوند. (حلالیت کامل در حالت جامد) و آلیاژ تنها از یک فاز تشکیل می شود. فولاد زنگ نزن ۱۸-۸ (شکل ۲-۱۶) مثالی از یک آلیاژ همگن یا محلول جامد می باشد. نیکل، کرم، و کربن در آهن حل شده اند و آلیاژ دارای یک ترکیب یکنواخت در تمام نقاط می باشد. آلیاژهای غیر همگن مخلوطهائی از دو یا چند فاز جداگانه می باشند. عناصر تشکیل دهنده این آلیاژها بطور کامل در یکدیگر حل نشده و بصورت فازهای جداگانه وجود دارند. ترکیب و ساختمان داخلی این آلیاژها یکنواخت نیست. شکل ۲-۱۷ تصویر میکروسکوپی یک فولاد کم کربن را نشان می دهد. کربن با تعدادی از اتمهای آهن ترکیب شده و تشکیل کاربید آهن می دهد. کاربید آهن معمولاً بصورت لایه لایه ای ظاهر می شود. هر کدام از این دو نوع آلیاژها دارای معایب و مزایائی هستند، آلیاژها همگن معمولاً انعطاف پذیرتر بوده و دارای استحکام کمتری نسبت به آلیاژهای غیر همگن هستند. انتخاب بین این دو نوع براساس خواص مکانیکی مورد نیاز صورت می گیرد. آلیاژهای همگن معمولاً از نظر خوردگی مقاومتر از آلیاژهای دو (یا چند) فازی هستند. زیرا در آلیاژهای همگن اثری از کوپل گالوانیکی وجود ندارد. لکن استثنائات مهمی نیز وجود دارد که در فصلهای بعدی بررسی خواهند شد.

آلیاژها خیلی شبیه محلولها می باشند. بعضی مواد در یکدیگر حل شده و بعضی دیگر در یکدیگر نامحلولند. قابلیت انحلال معمولاً با افزایش درجه حرارت بسرعت افزایش می یابد، بدین ترتیب موقعی که یک فولاد کربنی را به درجه حرارتهای بالا برریم، تبدیل به یک محلول جامد می شود. راسب شدن فاز دوم می تواند از محلولهای جامد فوق اشباع مشابه محلولهای دیگر انجام شود. همانطور که قبلاً گفته شد، مرزدانه ها نواحی پر انرژی هستند، لذا راسب شدن فاز دوم معمولاً از مرزدانه ها شروع می شود. تفاوتهای دیگر در فلزات ممکن است ماهیت شیمیائی، متالورژیکی، یا مکانیکی داشته باشند. مثالهایی در این موارد عبارتند از: ناخالصیهائی مثل اکسیدها و آخالهای^(۲) دیگر، پوسته های اکسیدی^(۳)، جهت قرار گرفتن دانه ها، تجمعهای

1- Solid Solution

2- Inclusions

3- Mill Scale



شکل ۱۷-۲ تصویر میکروسکوپی فولادکربنی که برای نشان دادن لایه‌های کاربید آهن اچ شده است (۶۰۰×).

نابجائی‌ها، غیر یکنواختی ترکیب شیمیائی در ساختمان میکروسکوپی، فازهای راسب شده، تنش‌های موضعی، خراشها و شیارهای سطحی. تنها در موارد خاصی از فلزات با سطوح صیقل داده شده استفاده می‌شود. فلزات خیلی خالص از نظر خوردگی مقاومتر از انواع تجارتي آنها هستند. مثلاً، فلز روی خیلی خالص با سطح صیقلی شده در اسید کلریدریک خیلی خالص خورده نخواهد شد ولی انواع تجارتي این دو بشدت با یکدیگر ترکیب می‌شوند. ولی فلزات خالص گران هستند و معمولاً استحکام کمی دارند. اختلاف محیطها در فصل ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سرعت خوردگی نسبی درصد خلوص آلومینیم

۹۹/۹۹۸	۱	در جدول مقابل تاثیر خلوص آلومینیم بر خوردگی
۹۹/۹۷	۱,۰۰۰	آن توسط اسید کلریدریک نشان داده شده است.
۹۹/۲	۳۰,۰۰۰	

۲-۱۲ ملاحظات اقتصادی

کنترل خوردگی عمدتاً یک مسئله اقتصادی است. اینکه یک روش کنترل خوردگی بکاربرده شود یا خیر، بستگی به مقدار صرفه جویی‌های بدست آمده خواهد داشت. روش یا روشهای مورد استفاده براساس ملاحظات اقتصادی انتخاب می‌شوند. کاهش سرمایه‌گذاری به معنی در آمد کمتر است. هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری پائین تر، سود بیشتری در بر خواهد داشت. کارخانجات مختلف صرفاً برای تولید فولاد، اتومبیل و مواد شیمیائی نیستند. هدف اصلی بدست آوردن سود است. در صد برگشت سرمایه‌گذاری (قبل یا بعد از کم شدن مالیات) معیار متداولی است. اگر با انتخاب یک فلز یا آلیاژ ارزاتر همان کارآیی فلز یا آلیاژ گرانقیمت تر حاصل گردد (که بندرت پیش می‌آید) تصمیم‌گیری ساده خواهد بود. سیستمهای حفاظت از خوردگی از نظر هزینه با یکدیگر متفاوتند و هزینه‌های بالا بایستی قابل توجیه باشند. کارخانجات مختلف معیارهای مختلفی بکار می‌برند. زمان برگشت سرمایه یک کارخانه شیمیائی کوتاهتر از یک نیروگاه است، زیرا احتمال اینکه کارخانه شیمیائی در زمان کوتاهتری از رده خارج شود بیشتر است.

بعضی واحدها برای زمانهای کوتاه مثل ۱ سال طراحی می‌شوند بعضی دیگر برای ۵۰ سال یا بیشتر. یک پل برای ۱۰۰ سال کار طراحی می‌شود، یک اتومبیل ۵ تا ۱۰ سال و یک موشک برای یک دقیقه یا کمتر. مهندس خوردگی باید با فرآیندهای کارخانه خود آشنا باشد، تابتواند تصمیم صحیح و موثر موارد مربوط به کار خود را به مدیریت (که هزینه را تصویب می‌کند) ارائه نماید. اگر برگشت هزینه تغییر یک فرآیند یا ساخت یک کارخانه جدید تنها مثلاً ۳٪ باشد، بجای این کار می‌توان پول را در بانک گذاشت و سود بیشتری بدست آورد.

برای جزئیات بیشتر به مقاله بسیار جالب دیلون^(۱) رجوع شود. در این مقاله فاکتورهایی مثل هزینه، عمر تجهیزات، نرخ بهره، نرخ مالیات، استهلاک، و همچنین روشهای ارزیابی اقتصادی مورد بحث قرار گرفته‌اند. یک مثال ساده از مقاله وی بشرح زیر است:

برگشت سرمایه‌گذاری (ROI) جایگزین کردن یک مبدل حرارتی به ارزش

1- C.P.Dillon, Economic Evaluation of Corrosion Control Measures, *Materials Protection*, 4: 38-45 (May, 1965).

۱۰,۰۰۰ دلار، با عمر ۲ سال بوسیله یک میدل حرارتی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ به ارزش ۲۰,۰۰۰ دلار که ۸ سال عمر می‌کند عبارت است از:

$$ROI = 100 \cdot \frac{(10,000/2) - (20,000/8)}{20,000 - 10,000} = 25\%$$

فرمول عمومی و جامع تر در این زمینه بصورت زیر است:

$$ROI = 100 \cdot \frac{(Oa + Ia / na) - (Ob + Ia / nb)}{Ib - Ia}$$

در این رابطه $O =$ مخارج سالانه شامل مخارج تعمیرات و نگهداری، تولید، ضررها و غیره است، I/n استهلاک خطی، بدین ترتیب که I هزینه سرمایه‌گذاری یا نصب n عمر پیش‌بینی شده به سال و اندیسهای a و b مربوط به دو حالت مختلف می‌باشد. در رابطه با قیمت فلزات و آلیاژها، ترکیب شیمیائی اولین راهنما است. فولاد زنگ‌نزن نوع ۴۳۰ بخاطر دارا بودن ۱۷٪ کرم گرانتر از فولاد معمولی است، نوع ۳۰۴ بخاطر دارا بودن ۱۸٪ کرم و ۸٪ نیکل گرانتر از نوع ۴۳۰ است و نوع ۳۱۶ که علاوه بر عناصر فوق دارای ۲ درصد مولیبدن که عنصر گرانیمیتی است، گرانتر می‌باشد. قیمت مس بیشتر از آهن است، ولی فاکتورهای مهم دیگری نیز بر قیمت تمام شده تاثیر می‌گذارند. مثلاً ارزش یک میله فولادی ممکن است بصورت وزنه ۵ دلار باشد ولی همان مقدار فولاد بصورت سوزن چرخ خیاطی ۵۰۰۰ دلار و بصورت وزنه های مورد استفاده برای بالانس کردن رقاصک ساعت ۲۰۰,۰۰۰ دلار قیمت داشته باشد. قیمت یک موتور الکتریکی کوچک برای یک موشک ۳۰۰ دلار است در حالیکه قیمت موتورهای ۱ اسب ۵۰ دلار است. قطعات چدنی ارزانتر از قطعات فولاد ریختگی هستند، زیرا ریختگری فولاد مشکلتر است. بخاطر هزینه نیروی انسانی قیمت وزنی قطعات ریختگی کوچکتر، بیشتر از قطعات ریختگی بزرگتر از همان جنس خواهد بود. فولاد زنگ‌نزن نوع ۴۰۳ (نوع ۴۱۰ برای استفاده در هواپیما) نیاز به بازرسی بهتری دارد و در نتیجه گرانتر است. فلزات و آلیاژهایی مثل هاستولی C گرانیمیت هستند نه فقط بخاطر مقدار عناصر آلیاژی بالای آنها، بلکه بخاطر نیاز به نورد در درجه حرارت‌های بالا. برای ساخت مبدلهایی که با آب دریا کار می‌کنند، تیتانیوم که فلز گرانتری است، بخاطر

امکان گرفتگی کمتر در اثر جانداران دریایی و انتقال حرارت بیشتر، ممکن است اقتصادی تر از فولاد باشد. در حقیقت یکی از دلایل اصلی استفاده از لوله های تفلونی در مبدل های حرارتی همین است. کارخانه ای که عمدتاً تجهیزاتی از نوع ۳۱۶ تولید می کند، برای نوع ۳۰۴ قیمت بیشتری در خواست خواهد نمود چون برای وی ۳۰۴ "خاص" تلقی می شود. اقلامی که میزان تولید آنها کمتر است گرانتر از اقلامی هستند که در مقیاس بزرگ تولید می شوند. پیچیدگی قطعه نیز قیمت را بالا می برد. کمبودها نیز بر قیمت تاثیر می گذارند. در بحران کمبود نیکل، مقاومت خوردگی نوع ۴۳۰ افزایش می یابد. در یک واحد شیمیائی که محصولات متنوعی تولید می شوند، نوع ۳۱۶ بر نوع ۳۰۴ ارجح تر خواهد بود، زیرا نوع ۳۱۶ از نقطه نظر مقاومت خوردگی جامع تر است. تعداد بسیاری از قطعات مورد استفاده در اولین کارخانه تولید نایلون از نوع ۳۰۴ ساخته شده بودند (در واحدهای بعدی از فولاد و چدن استفاده شد) زیرا در یک فرآیند جدید "نواقص" را در حداقل بایستی نگه داشت. ظاهر، خواباندن کارخانه، آلوده شدن محصول و خطرات جانی در فصل ۱ بحث شده اند.

خوردگی امر اجتناب ناپذیری نیست. با کنترل خوردگی می توان صرفه جویی های بزرگی کرد. در یک مورد با تلاش های پی گیر هزینه ها از سالی ۲۰۰،۰۰۰ دلار به ۳۵،۰۰۰ دلار کاهش پیدا کرد. برای تعیین دقیق اقلام پر خرج و محاسبه برگشت سرمایه، اطلاع از هزینه های دقیق تعمیرات و نگهداری ضروری است. در یک کارخانه، کاررضایت بخش بدست آوردن عمر پیش بینی شده با حداقل هزینه در سال مهمترین هدف می باشد.

مسئله کنترل خوردگی از نظر اقتصادی بخاطر افزایش قیمت نیروی انسانی، مواد، و انرژی، به همراه تغییرات سریع بهره های بانکی و مالیاتها پیچیده تر شده است. ارزش خالص فعلی^(۱) دقیق ترین مینا برای تجزیه و تحلیل هزینه های تجارتی است و می تواند مستقیماً در مورد مسئله کنترل خوردگی از نظر اقتصادی بکار رود. اگر چه NPV شامل محاسبات وسیعی است، ولی این محاسبات را می توان با ماشین حسابهای جیبی مخصوصاً انواعی که قابل برنامه ریزی هستند^(۲) بسادگی انجام داد.

1- Net Present Value, NPV

۲ - برای یک بحث عالی در این زمینه به مقاله زیر مراجعه شود.

Jon M Smith. Financial Analysis & Business Decisions on the Pocket Calculator.

"John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976.

ایده ارزش فعلی نسبتاً ساده است، و بر اساس رشد سرمایه گذاری بوسیله بهره مرکب می باشد:

$$FV = PV (1 + i)^n \quad (2-20)$$

در این رابطه PV ارزش فعلی سرمایه گذاری، FV ارزش آینده، i نرخ بهره در دوره مرکب، و n تعداد دوره هاست در حالت ساده، دوره مرکب یک سال است. بنابراین i نرخ بهره سالانه و n تعداد سال می باشد. مثلاً، اگر ۱۰۰۰ دلار سرمایه گذاری شده بمدت ۱۰ سال با بهره ۶٪:

$$FV = 1000 (1 + 0.06)^{10} = 1790/85 \text{ دلار} \quad (2-21)$$

محاسبه فوق را می توان از نقطه نظر ارزش فعلی بیان کرد: ارزش فعلی ۱۷۹۰/۸۵ در ۱۰ سال از حالا با بهره ۶٪، ۱۰۰۰ دلار است.

با تنظیم مجدد معادله (۲-۲۰) می توان ارزش فعلی را حساب کرد:

$$PV = \frac{FV}{(1+i)^n} \quad (2-22)$$

بنابراین، هرگونه سود (یا زیان) آتی می تواند به ارزش فعلی نسبت داده شود. این نظریه را می توان توسعه داد تا هر تعداد دریافت های نقدی یا پرداختها را بوسیله فرمول کلی زیر در برگیرد.

$$NPV = -1 + \frac{C_1}{(1+i)^1} + \frac{C_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+i)^n} \quad (2-23)$$

در این رابطه NPV ارزش فعلی خالص دریافت و پرداختهای نقدی $C_1, C_2, \dots, C_n$ می باشد که بدنبال سرمایه گذاری اولیه I انجام شده است. ارزش فعلی خالص ممکن است مثبت باشد یا منفی، در ارتباط با سود یا ضرر نرخ بهره i ، نرخ مورد نظر یا نرخ واقعی برگشت می باشد.

کاربرد معادله ۲-۲۳ را بوسیله یک مثال می توان نشان داد. فرض کنید سه امکان برای انتخاب یک مبدل حرارتی وجود دارد:

(۱) فولاد به ارزش ۸۰۰۰ دلار و عمر ۲ سال، (۲) فولاد با حفاظت آندی با عمر ۸ سال یا بیشتر که نیاز به پتانسیواستات به ارزش ۷۰۰۰ دلار و نیروی انسانی به ارزش سالانه ۱۱۰۰ دلار برای نظارت و کنترل سیستم دارد و (۳) فولاد زنگ نزن با عمر ۸ سال

و به ارزش ۲۰/۰۰۰ دلار محاسبات را بر اساس دوره یکساله انجام داده و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری را در نظر نمی‌گیریم، مخارج سالانه سه روش عبارتست از:

هزینه، دلار			
سال	فولاد	فولاد (حفاظت آندی)	فولاد زنگ نزن
صفر	۸۰۰۰	۱۵۰۰۰	۲۰/۰۰۰
۱	-	۱۱۰۰	-
۲	۸۰۰۰	۱۱۰۰	-
۳	-	۱۱۰۰	-
۴	۸۰۰۰	۱۱۰۰	-
۵	-	۱۱۰۰	-
۶	۸۰۰۰	۱۱۰۰	-
۷	-	۱۱۰۰	-
۸	-	۱۱۰۰	-

مبدل فولادی هر ۲ سال یکبار تعویض می‌شود. با بهره ۱۰٪، ارزش فعلی خالص NPV هر حالت را می‌توان با استفاده از معادله ۲-۲۳ حساب کرد. مقادیر C منفی هستند چون مقدار هزینه می‌باشد نه سود.

$$\text{NPV فولاد} = -۸۰۰۰ - \frac{۸۰۰۰}{(۱/۱۰)^۱} - \frac{۸۰۰۰}{(۱/۱۰)^۲} \quad (۲-۲۴)$$

$$= \frac{۸۰۰۰}{(۱/۱۰)^۲} = -۲۴۵۹۲ \text{ دلار}$$

$$\text{NPV فولاد (حفاظت آندی)} = -۱۵۰۰ - \frac{۱۱۰۰}{(۱/۱۰)^۱} - \frac{۱۱۰۰}{(۱/۱۰)^۲} \quad (۲-۲۵)$$

$$\dots - \frac{۱۱۰۰}{(۱/۱۰)^۸} = -۲۰۸۶۹ \text{ دلار}$$

$$\text{NPV فولاد زنگ نزن} = -۲۰/۰۰۰ - ۰ = -۲۰،۰۰۰ \text{ دلار} \quad (۲-۲۶)$$

بنابراین با بهره ۱۰٪ مبدل حرارت از جنس فولاد زنگ نزن اقتصادی‌ترین است. ولی NPV بستگی به نرخ بهره دارد. با قرار دادن نرخ بهره های مختلف در معادلات فوق می توان تغییرات NPV را نسبت به نرخ بهره رسم نمود، شکل ۱۸-۲. توجه شود که اگر نرخ بهره بیشتر از ۱۴/۷ باشد مبدل حرارتی فولادی با حفاظت آندی اقتصادی‌ترین است. اگر نرخ بهره بیشتر از ۲۴/۱ باشد مبدل حرارتی فولادی ارزاترین خواهد بود.

اگر چه این نرخ بهره هانسیب به حسابهای پس انداز معمولی بالا هستند، ولی در معاملات تجاری بزرگ غیر معمول نیستند. در حال حاضر، بهره سپرده های ثابت بدون مالیات ۱۶٪ می باشد. بنابراین، سرمایه گذاری در یک واحد جدید بایستی مساوی با بیشتر از این مقدار برگشت داشته باشد. اگر فرآیند ریسک بالایی داشته باشد که با سرمایه قرضی انجام شده است، برگشت ۲۵٪ یا بیشتر ممکن است ضروری باشد. بنابراین اقتصادی‌ترین انتخاب غالباً بستگی به نرخ برگشت مورد نظر دارد. بهترین انتخاب برای یک شرکت ممکن است با دیگری تفاوت داشته باشد.

معادله ۲۳-۲ کلی است و می تواند برای انواع آنالیز هزینه ها بکار رود. تورم در هزینه نیروی انسانی، مخارج تجهیزات و تعمیرات و نگهداری سهولت در پرداختهای سالانه Cn وارد می شود. همچنین، قیمت وسایل مستهلک شده و برگشت مالیات بخاطر استهلاک بصورت دریافت های سالانه Cn با علامت مثبت وارد می شود. همانطور که در شکل ۱۴-۲ نشان داده شده است، با استفاده از روشهای حسابداری که در مورد یک شرکت قابل کاربرد می باشد، دو راه چاره در انتخاب مواد را بطریق ترسیمی می توان پیدا کرد. اگر نسبت قیمت نصب پائین و بطرف چپ منحنی در عمر پیش بینی شده باشد. در اینصورت آلیاژ مقاوم تر انتخاب اقتصادی تری خواهد بود و اگر نسبت فوق الذکر بالا و بطرف راست منحنی عمر پیش بینی شده باشد، در اینصورت آلیاژ ضعیف تر با وجودی که زودتر از بین می رود، اقتصادی تر خواهد بود.

گاهی اوقات، موقعی که با مواد سمی یا قابل اشتعال کار می شود ملاحظات امنیتی بر ارقام اقتصادی تقدم می یابند.

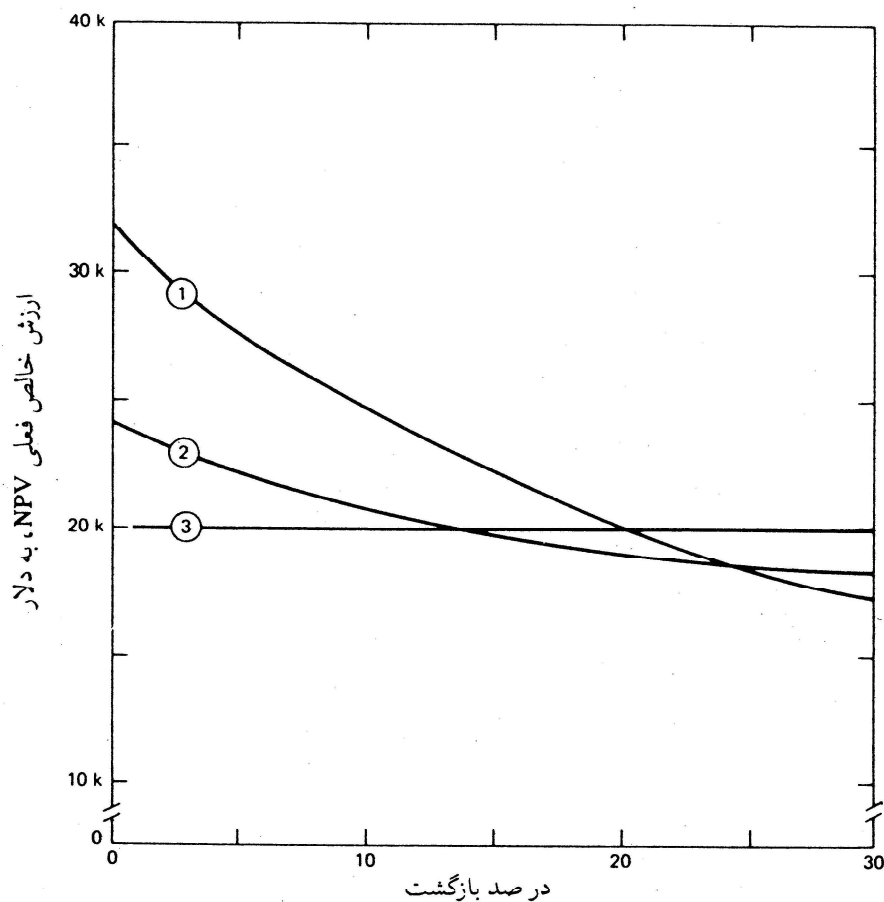
مراجع اضافی در این رابطه عبارتند از:

Lewis, T.H., and C.N.Dennis: The Economics of Ground Bed Selection, *Materials Performance*, 21:14-17 (May 1982).

McIntyre, D.R.:Evaluating the Cost of Corrosion-Control Methods, *Chem. Eng.*,127-132 (Apr.5,1982).

Verink,Jr.,E.D.:A Simplified Approach to Corroison Calculations, *Materials Performance*, 21:26-34 (Oct.1982).

Watson,T.R.B.:Economic Evaluation of Corrosion Control, *Materials Performance*, 29-33 (Jan.1984)

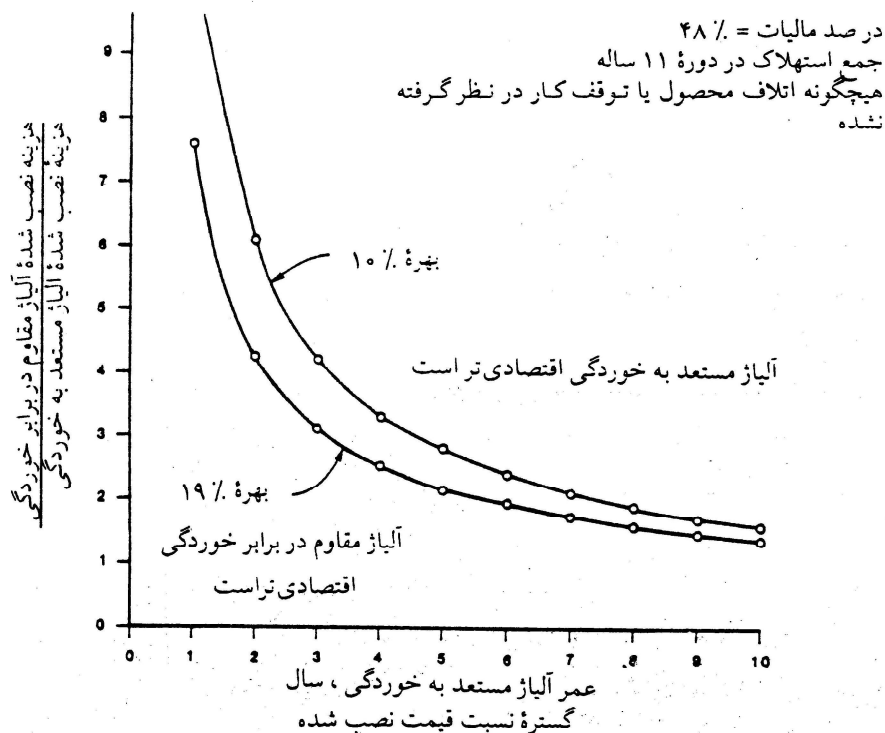


شکل ۱۸-۲ NPV بر حسب نرخ بهره: منحنی ۱، مبدل حرارتی فولادی. منحنی ۲، مبدل حرارتی فولادی با حفاظت آندی. منحنی ۳، مبدل حرارتی از جنس فولاد زنگ‌نزن

۱۳-۲ اهمیت بازرسی

ساخت برای یک کارخانه یا یک قطعه یک دستگاه ممکن است عالی باشند، ولی اگر این دستورالعمل‌ها رعایت نشوند ممکن است تماماً بی معنی و بی فایده باشند. بازرسی صحیح ضرورت کامل دارد، مخصوصاً در قطعات بحرانی که در شرایط خطرناک کار می کنند. بازرس حین تولید و نصب بایستی دقیقاً انجام وظیفه نماید، و بازرسی به محصول نهایی محدود نشود، بازرس علاوه برداشتن شرایط و توانایی های لازم، بایستی اختیارات کافی نیز داشته باشد. جنبه های بازرسی به اندازه طراحی و انتخاب مواد اهمیت دارند.

مثالهای زیادی درباره انهدامهای زودرس و گاهی اوقات فاجعه آمیز وجود دارند. قسمتی از یک لوله ۱۰ اینچی که جوشکاری شده، به بخاطر عدم نفوذ کافی فلز جوش بدخل شیار منهدم شد. فلز جوش فقط ۱/۴ اینچ (صرفاً یک لایه نازک) بدخل درز جوش نفوذ کرده بود. عدم نفوذ کافی فلز جوش خیلی متداول است. پایه های نگهدارنده لوله ها^(۱) در کوره یک پالایشگاه نفت بخاطر متخلخل بودن این قطعات ریختگی (حدود ۵۰٪ سطح مقطع شکست از حفره ها تشکیل شده بود) منهدم شدند. در اثر عدم اجرای دستورالعمل های تمیز کردن، سیستم بطور مطلوب کار نمی کرد. بر چسب های کاغذی روی سطح داخلی فلزی که بایستی روی فولاد روکش می شد^(۲) باقی مانده بود و در نتیجه اتصال بین دو فلز بوجود نیامده بود. لوله های مبدل حرارتی بسرعت خورده شدند چون بجای فولاد زنگ نزن ۳۱۶ از نوع ۳۰۴ استفاده شده بود. گوشه ها که گرد طراحی شده بودند، بعلت عدم اجرای دقیق نقشه ها تیز از آب در آمدند و در نتیجه باعث خوردگی توام با تنش و/یا خوردگی خستگی شدند. موارد زیادی وجود دارند که انهدام در اثر عملیات حرارتی غلط بوده است. بعضی اقدامات مثلاً خم کردن یک لوله بصورت سرد یا گرم برای قرار دادن آن در مسیر لازم باعث ایجاد تنش های بالا و تغییرات ناخواسته دیگر می شود. گاهی اوقات الکتروود جوشکاری مناسب انتخاب نمی شود. آماده سازی سطحی بد باعث از بین رفتن سریع پوشش سطحی می شود. بازرسی کافی در کنترل کیفیت خلاصه می شود.



آلیاژ مقاوم آلیاژ مستعد	آلیاژ ۲۰	نیکل ۲۰۰	آلیاژ ۴۰۰	تیتانیوم با خلوص تجارتي	آلیاژ C-۲۷۶	زیرکونیوم
فولاد کربنی	2.1-3.6	2.3-3.7	2.6-2.9	2.9-3.8	6.2-9.7	4.1-6.1
304 SS	1.4-2.6	1.6-2.1	1.5-1.8	2.0-2.8	3.0-4.1	2.8-4.4
316 SS	1.3-1.9	1.4-1.9	1.3-1.6	1.9-2.1	2.4-3.0	2.6-3.3

شکل ۲-۱۹ بررسی اقتصادی در زمینه انتخاب مواد برای مقاومت در برابر SCC. بر اساس
آنالیز سالانه هزینه‌ها از NACE, RP-82-72 توجه: محدوده نسبت قیمت نصب از مرجع زیر است:

NACE Corrosion Engineer's Reference Book, R.S.Treseder, ED,p.110,(1980)

۲-۱۴ وسایل اندازه‌گیری مدرن

انقلابی که بوسیله وارد شدن وسایل اندازه‌گیری مدرن در الکتروشیمی، علم
خوردگی، و مهندسی خوردگی بوجود آمده تاثیر عظیمی داشته و خواهد داشت. بعنوان

مثال، به قسمت ۴-۲۷، روشهای امیدانس جریان متناوب؛ قسمت ۴-۲۸ ولتامتری سیکلی با دامنه کوچک؛ و قسمت ۴-۲۹، وسایل اندازه گیری الکترونی مراجعه شود. این روشها حد اعلاي تکامل امروزي هستند.

۲-۱۵ روش مطالعه

دانشجو، مربی و خوانندگان دیگر الزامی ندارند که فصلهای این کتاب را به ترتیبی که آمده اند دنبال کنند، بویژه افرادی که دارای اطلاعات محدودی در زمینه شیمی و الکتروشیمی هستند. بعلاوه، بعضی ها ممکن است علاقه ای به عمیق تر شدن در فصلهای ۹ و ۱۰ نداشته باشند. آلهائی که در زمینه هایی با پایه شیمی هستند مثل شیمی، متالورژی، و مهندسی خوردگی می توانند قبل از مراجعه به فصل ۳، مستقیماً به فصل ۹ و ۱۰ بروند. در مورد آلهایی که فقط نیاز به اطلاعات عمومی خوب در زمینه خوردگی دارند، فصلهای ۹ و ۱۰ می توانند حذف گردد.

فصل ۳ بگونه ای طراحی شده که بطور مستقل از سایر فصلها نیز ارائه شود بعضی مربیان ممکن است بخواهند در همان زمان روشهای جامع تر مبارزه با خوردگی (فصل ۶) را ارائه دهند بدون آنکه در مورد نوع خاصی از خوردگی مطرح باشد. در حالتی که درس در یک دانشکده باشد، مطالب ارائه شده بستگی به زمان دارد (کوارتر یا سیمستر). قسمتی از رنگ و بوی درس بوسیله زمینه تخصصی مربی تحت تاثیر قرار خواهد گرفت.

همه اینها بدین معنی هستند که در مورد مطالبی که بایستی گفته شود یا ارائه گردد، قابلیت انعطاف پذیری قابل ملاحظه ای وجود دارد.