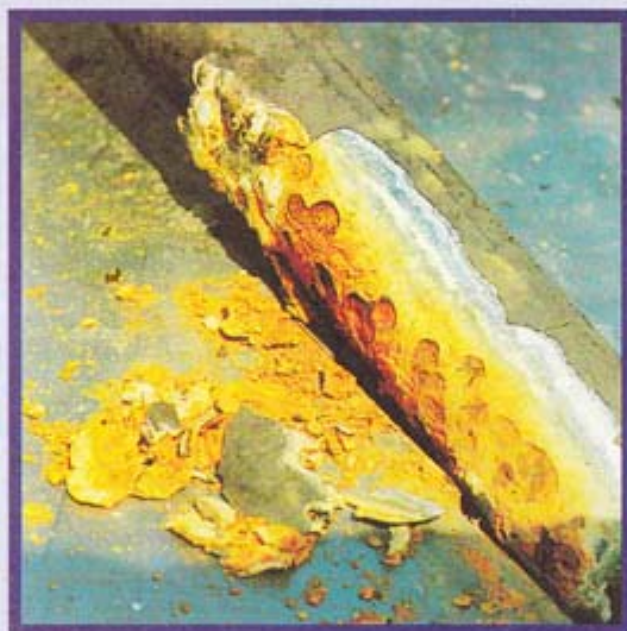




کنترل خوردگی در صنایع



جلد سه

شامل:

دیدبانی و اندازه گیری خوردگی، طراحی
مطالعات موردی

مؤلف: دکتر سید محمد سید رضی

فصل پانز دهم

۱۵ - آزمایشها و روش های دیدبانی خوردگی

۱-۱۵- مقدمه

امروزه تنوع محصولات و گوناگونی روشها برای به دست آوردن مواد اولیه و مواد نهائی در دنیا سبب گستردگی منابع ، کارخانجات و تجهیزات جانبی آنها شده است. سود دهی و بازگشت سرمایه در چنین کارخانجاتی در گرو کارکرد پیوسته و اقتصادی آنها می باشد و به دلیل آنکه این صنایع با موادی خورنده مانده آبهای خنک کن، اسیدهای معدنی ، اسیدهای آلی سرو کار دارند و در شرایط دشوار از نظر دما و فشار کار می کنند ، پرداختن به خوردگی آنها بسیار مهم است . خوردگی یکی از عمده ترین عوامل تهدید کننده فعالیت مداوم تولید در این صنایع می باشد . از طرف دیگر هزینه های بازرسی ، شناسائی ، تعمیر و یا تعویض قطعات خورده شده زیانهای فراوانی از قبیل خوابیدن کارخانجات^۱، اختلال در تولید^۲ و کاهش تولید را در پی دارد . بنابر این امروزه توجه ویژه ای به

^۱ Sutdown

^۲ Plant upset

روشنائی می شود که کاربرها را در هر لحظه^۱ از کم و کیف پدیده خوردگی در سیستم

آگاه می سازند. این روشها که به روش های کنترل خوردگی موسومند،

کاربردهای فراوانی دارند از جمله :

۱- تشخیص مشکلات خوردگی موجود .

۲- تعیین مؤثر بودن راه حلهای ارائه شده برای مشکلات خوردگی .

۳- چگونگی کارکرد مواد به کار رفته در ساخت تجهیزات .

۴- کنترل فرایند [۱]

از طرف دیگر روش های دیدبانی خوردگی را که براساس آزمون های الکتروشیمیایی

خوردگی و روش های غیر مخرب^۲ هستند، می توان به سه گروه زیر تقسیم بندی کرد :

۱- روش های الکتروشیمیایی :

این روش ها مانند اندازه گیری پتانسیل خوردگی ، قطبی شدن پتانسیودینامیکی، مقاومت

قطبی شدن^۳، بررسی تغییرات پتانسیل و جریان بر حسب زمان^۴ اندازه گیری اغتشاشات

(صدا)

الکتروشیمیائی^۵، آنالیز هماهنگی^۶، اندازه گیری pH، اندازه گیری هدایت الکتrolیت [۱] .

^۱ On-line

^۲ Nondestructive test

^۳ Polarization Resistance

^۴ Potential and current Fluctuation

^۵ Electrochemical Noise Measurement

^۶ Harmonic Analysis

۲- روش های غیر مخرب :

این روشها نیز می تواند شامل : روش اولتراسونیک ، جریانهای سرگردان^۱ ، جریانهای القائی، پرتونگاری نوترونی ، پرتونگاری با آ شععه X ، گرمانگاری^۲ کاربرد امواج زیر قرمز ، روش نشر صوتی^۳ و روش القای مغناطیسی^۴ باشد [۳] .

۳- سایر روشها :

روشهای دیگر از جمله کوپن گذاری ، روزنه های نگهبانی^۵ ، آنالیز الکترولیت ، روش مقاومت الکتریکی ، روش فعال کردن لایه نازک^۶ ، پروب های هیدروژنی ، کنترل فعالیت میکروبا می تواند مؤثر باشد .

با روش های فوق می توان انواع مختلف خوردگی را کنترل کرد . (خوردگی الکتروشیمیائی ، خوردگی اتمسفری ، خوردگی داغ ، انواع SCC ، خوردگی در سیستمهای خنک کن و فرایندی ، خوردگی در زیر

عایق ...) [۱] . به طور کلی با اجرای دیدبانی خوردگی^۷ در مجتمع های شیمیائی^۸ و کارخانجات دیگر که در نهایت به کنترل خوردگی منجر می شود، می توان به موارد زیر دست یافت :

^۱ Eddy current

^۲ ThermograpHy

^۳ Acoustic Emission

^۴ Magnetic Induction

^۵ Sentry holey

^۶ Thin layer activation

^۷ Corrosion monitoring

^۸ Chmical Process Industries

- ۱- بهینه کردن بازده کارخانجات .
 - ۲- حفظ کیفیت .
 - ۳- کارکرد مطمئن (نفرات و دستگاهها) .
 - ۴- حفظ سرمایه .
 - ۵- کاهش هزینه های نیروی انسانی .
 - ۶- نگهداری پیوستگی بهره برداری^۱
 - ۷- کاهش هزینه تعمیرات .
 - ۸- نگهداری بهتر تجهیزات .
 - ۹- به دست آوردن مورد طراحی و نصب بهتر .
 - ۱۰- ایجاد بانک اطلاعاتی در زمینه خسارات ناشی از خوردگی [۳] .
- آزمایش های خوردگی پایه های کاربردی روش های کنترل خوردگی را مهیا می کنند .
- توصیف جزئی تمامی روش ها و دستگاههایی که در آزمایش ها و مطالعات خوردگی در کشورهای مختلف به کار می رود ، در یک مقاله امکان پذیر نیست . لیکن می توان به اصول کلی و مزایا و محدودیت های این روش ها اشاره کرد . همان گونه که ذکر شد روش های دیدبانی خوردگی در برگیرنده روشهایی است که به کمک آنها می توان سرعت خوردگی را به طور پیوسته اندازه گیری کرد . در این روشها علاوه بر بهره گرفتن از مبانی روش های

^۱ Preserving Continuity Of Operation

آزمایش خوردگی از سایر روشها مانند آزمایشهای غیر مخرب (NDT) و روش های مختلف اندازه گیری ضخامت نیز می توان سود برد .

به طور کلی آزمایش های خوردگی را می توان به چهار گروه زیر دسته بندی کرد :

الف) آزمون های آزمایشگاهی^۱:

در این آزمونها ، شرایط می تواند به طور کاملاً دقیق تعریف و کنترل شود .

ب) آزمون های میدانی^۲:

آزمونهای میدانی یا آزمایش در شرایط واقعی نمونه هایی از فلزات یا آلیاژهای مورد آزمایش را که کوپن ها یا نمونه های آزمایش^۳ نامیده می شوند ، در شرایط محیطی واقعی مورد انتظار مانند : دریا ، خاک ، رودخانه و مانند آن قرار می دهند .

ج) آزمون در مقیاس نیمه صنعتی^۴:

این روش که بیشتر برای انتخاب مواد و مقایسه کارایی آنها در شرایطی نسبتاً واقعی به کار می رود در مقیاس کوچکتر از کارخانجات اصلی و بزرگتر از روشهای آزمایشگاهی انجام می گیرد . در واقع مواد انتخاب شده در آزمون آزمایشگاهی ، در کارخانه نیمه صنعتی مورد آزمایش نهائی قرار می گیرد .

^۱ Laboratory

^۲ Field

^۳ Test or coupons specimen

^۴ Pilot Plant

د) آزمون های کاری^۱:

در این نوع آزمونها ، نمونه های مورد آزمایش که غالباً از قطعات ساخته شده می باشند، تحت شرایط ویژه ای که به کار برده می شوند (شرایط فرآیندی یا در کارخانه مواد شیمیایی) مورد آزمایش قرار می گیرند [۴] .

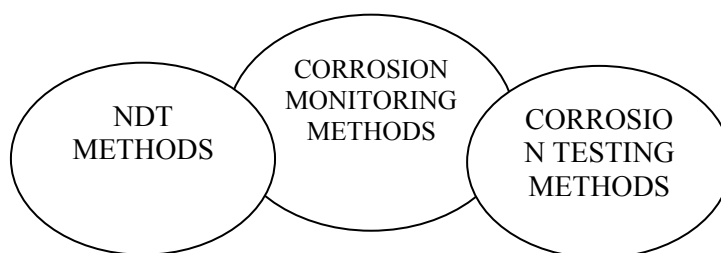
تفاوت عمده آزمون های آزمایشگاهی و صنعتی در این است که شرایط آزمایشگاهی را می توان به طور دقیق کنترل کرد . در آزمون های آزمایشگاهی می توان تاثیر غلظت عناصر خورنده ، دما و ... را به تنهایی یا همراه با هم بررسی کرد و اثر آنها را در پدیده خوردگی مورد ارزیابی قرار داد ، از طرف دیگر در آزمایشگاه می توان آزمونهای تسریع شده^۲ انجام داد ، در چنین آزمایش هایی ، آزمون هایی را که در صنعت سالها بطول می انجامد ، در مدت یک روز یا کمتر از آن انجام می دهند . دقت چنین آزمایشهایی پائین است و این دقت با کاهش زمان آزمایش ، کاهش می یابد [۴] .

با توجه به اهمیت و کاربرد بازدارنده ها در صنایع ، و همچنین دامنه وسیع کارکرد آنها و لزوم شناسایی چگونگی کارکرد باز دارنده ها برای گزینش روش دیدبانی خوردگی ، در ابتدای این فصل بازدارنده ها و روشهای دیدبانی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. آزمونهای خوردگی در سرویس عموماً همان روش های دیدبانی خوردگی هستند. شکل (۱-۱۵) همپوشانی روشهای آزمایش خوردگی ، آزمایشهای غیر مخرب و دیدبانی خوردگی را نشان می دهد . همان طور که دیده می شود ، چون روشهای دیدبانی خوردگی ،

^۱ Service test

^۲ Accelerated test

همپوشانی نسبتاً کاملی با روش های آزمایش خوردگی دارند و این روشها (به ویژه روشهای الکتروشیمیائی) همراه با روشهای غیر مخرب اساس روش های دیدبانی خوردگی را تشکیل می دهند ، بنا بر این پس از بررسی بازدارنده ها و آزمونهای صنعتی آنها ، با بررسی اجمالی مبانی الکتروشیمی ، قطبی شدن و روش های الکتروشیمیائی دیدبانی خوردگی توضیح داده می شود ، سپس سایر روشهای دیدبانی و روشهای غیر مخرب بررسی می شوند . آزمونهای خوردگی آزمایشگاهی که در دیدبانی خوردگی مطرح است در بخشی جداگانه بررسی می شود . همچنین تئوریهای اندازه گیری الکتروشیمیائی و روشهای تجزیه و شناسایی محصولات خوردگی که مباحث تئوری و تخصصی تر را مطرح می کند و می تواند مورد استفاده محققین قرار گیرد ، در بخشهای جداگانه بحث خواهد شد . در پایان فصل نیز یکی از موارد عملی بسیار مهم دیدبانی یعنی دیدبانی خوردگی برای کنترل فرآیند خوردگی و تجزیه و تحلیل قرار می گیرد .



شکل ۱۵ - ۱ : همپوشانی روشهای آزمایش خوردگی ، غیر مخرب (NDT) و دیدبانی خوردگی

۲-۱۵- مروری بر بازدارنده ها ، مکانیزم و دسته بندی آنها برای گزینش روش

مناسب آزمون و دیدبانی

شناخت چگونگی کارکرد بازدارنده ها برای گزینش روش دیدبانی خوردگی ، در محیط حاوی بازدارنده ، اولین قدم می باشد . بازدارنده ها را می توان به محیط (گاز و مایع) و یا به فلزات (جامد) به صورت مواد آلیاژی افزود . بنابر این طبقه بندی بازدارنده ها ، به ویژه بازدارنده هایی که در

محیطهای آبی^۱ و نسبتاً آبی^۲ به کار می روند بسیار مهم است .

این محیطها را می توان به صورت زیر طبقه بندی کرد :

الف) آبهای طبیعی^۳، آبهای آشامیدنی^۴، آبهای خنک کن صنعتی و آبهای مانند آن که دامنه pH نزدیک به خنثی می باشد .

ب) محلول آبی اسیدها که برای فرآیند تمیز کردن فلزات ، هنگام زدایش زنگ و پوسته های اکسیدی استفاده شود .

ج) تولید اولیه و ثانویه نفت ، گاز ، و فرآیندهای پالایش و ترابری آنها .

با توجه به کاربردهای فوق ، بازدارنده ها را می توان به صورت زیر دسته بندی کرد ، هر چند که انواع دیگری از بازدارنده ها مانند بازدارنده های فاز بخار و بازدارنده های آلیاژی نیز وجود دارند ، ولی در نهایت این بازدارنده ها نیز در دسته بندی زیر می گنجند [۵] :

^۱ Aqueouse
^۲ Partly aqueouse
^۳ Natural waters
^۴ Supply waters

الف) باز دارنده های از بین برنده اکسیژن^۱

ب) بازدارنده های رویین کننده^۲

ج) بازدارنده های تشکیل دهنده فیلم^۳

د) بازدارنده های جذبی^۴

بازدارنده نوع الف ، مانند سولفیت ها و هیدرازین با کاهش میزان اکسیژن تا حد ppb نرخ خوردگی را کاهش می دهند . نرخ خوردگی فولاد کربنی در آبهای هوادار متناسب با میزان اکسیژن موجود است .

بنابر این در چنین شرایطی موارد زیر می تواند عملکرد بازدارنده را مشخص کند :

الف) اندازه گیری نرخ خوردگی به طور مستقیم توسط روشهای الکتروشیمیایی .

ب) اندازه گیری غلظت اکسیژن محلول به طور پیوسته .

ج) استفاده از روشهای اندازه گیری خوردگی به طور غیر مستقیم مانند مقاومت الکتریکی در صنعت و یا به کار بردن کوپن در آزمایشگاه و صنعت . شکل (۲۰ - ۱۵) تغییر منحنی قطبی شدن کاتدی را در حضور بازدارنده از بین برنده اکسیژن نشان می دهد [۵] .

دیاگرام الینگهام^۵ از بین برنده های اکسیژن را نشان می دهد . همچنانکه از شکل مشاهده می شود، این بازدارنده چگالی جریان حدی را برای واکنش احیای اکسیژن کم می کند ، به

^۱ Oxygen scavengers

^۲ Passivateors

^۳ Film formatiopn

^۴ Adsorption

^۵ Elinghan diagram

این معنی که منحنی آندی A بدون تغییر باقی می ماند ، ولی منحنی کاتدی از C_1 به C_2 تغییر می یابد و بنابر این چگالی جریان آندی از i_1 به i_2 کاهش می یابد .

دومین نوع این بازدارنده ، به تشکیل لایه های سطحی با افزایش PH یا پتانسیل کمک می کند ، افزایش دهنده یونهای هیدروکسیل مانند هیدروکسید سدیم (NaOH) و یا هیدروکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ به تشکیل رسوبات محافظ نظیر کربنات کلسیم $(CaCO_3)$ ، سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) ، کربنات سدیم (Na_2CO_3) ، کمک می نماید ، این نوع بازدارنده ها به بازدارنده های نوع آنیونی تشکیل دهنده فیلم^۱ معروف می باشد .

بنابر این روشهای مناسب برای دیدبانی خوردگی در محیطهای حاوی این نوع بازدارنده ها به قرار زیر است :

الف) اندازه گیری pH در صنعت و آزمایشگاه .

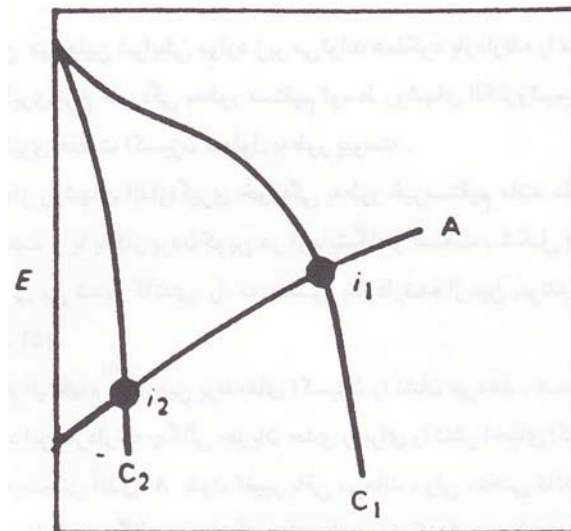
ب) تجزیه لحظه ای لایه تشکیل شده توسط روشهایی مانند رامان^۲.

ج) اندازه گیری نرخ خوردگی به طور مستقیم از روشهای الکتروشیمیائی (در صنعت و آزمایشگاه) .

د) اندازه گیری نرخ خوردگی به طور غیر مستقیم مانند کوپن گذاری و روش مقاومت الکتریکی .

^۱ Film –Promoting anions

^۲ Ramman



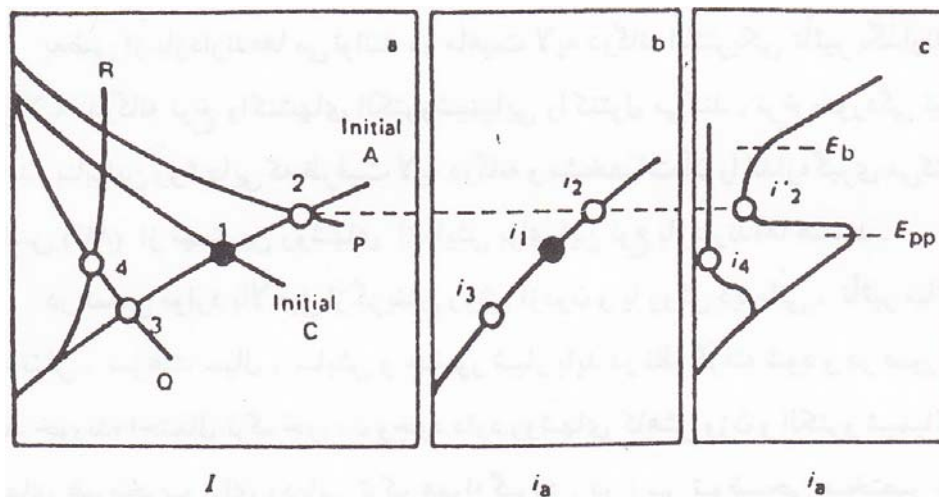
شکل ۲- ۱۵: منحنی قطبی شدن برای یک بازدارنده از بین برنده اکسیژن

نوع دیگری از بازدارنده ها وجود دارد در همین دسته جای می گیرد و به بازدارنده های اکسید کننده^۱ مشهورند. این بازدارنده ها با افزایش پتانسیل به ناحیه مطلوبی در نمودار پوربه^۲ باعث کاهش خوردگی می شود، آنیون این بازدارنده ها پتانسیل رداکس^۳ بالائی دارند (کرومات و نیتريت می تواند از این نوع بازدارنده باشند). استفاده از این نوع بازدارنده باید با دقت و نظارت خاص بر پتانسیل صورت پذیرد، چرا که با توجه به شکل (۳- ۱۵) در صورتی که $E_{corr} > E_{pp}$ باشد، رویین شدن رخ نمی دهد و نرخ خوردگی افزایش می یابد؛ در صورتی که $E_{corr} > E_b$ باشد، فلز حفره دار خواهد شد پس پتانسیل باید بین E_{pp} و E_b نگهداری شود [۶]

یک بازدارنده اکسید کننده p (برای مثال کرومات) شدت جریان مؤثر کاتدی را از ۱ به ۲ افزایش و پتانسیل خوردگی را افزایش می دهد، و بنابر این i_a در نمودار (b) از i_1 به i_2 می

^۱ Oxidizing inhibitors
^۲ Pourbaix diagram
^۳ Redox potential

رود . نرخ خوردگی تنها در صورتی کاهش می یابد که پتانسیل افزایش یافته ، بین E_{pp} و E_B باشد . یک بازدارنده کاتدی (مانند کربنات) منحنی کاتدی را تغییر می دهد و نقطه تقاطع با منحنی آندی نقطه ۳ می شود و به طور همزمان i_1 به i_3 کاهش می یابد .



شکل ۳-۱۵ : تاثیر بازدارنده های آندی ، کاتدی بر روی نمودار الینگهام

در صورتی که رویین شدن به مقدار زیادی رخ می دهد ، مانند بازدارنده های منحنی R (مانند سیلیکات ، فسفات) منحنی آندی نیز تغییر می کند و محل تقاطع نقطه ۴ می شود و شدت جریان به i_4 کاهش می یابد . بنابر این از مهمترین روشهای دیدبانی خوردگی در حضور این نوع بازدارنده ها اندازه گیری پتانسیل خوردگی (در صنعت و آزمایشگاه) می باشد .

نوع سوم این بازدارنده ها مانند کربنات (عدم حضور کلرید و سولفات) و فسفات یا سیلیکات تشکیل یک لایه گچی می دهند ، که قطبی شدن کاتدی را افزایش و نرخ خوردگی را کاهش می دهند شکل (۳-۱۵) . منحنیهای C و O در شکل I که میزان خوردگی از ۱ به ۳ تقلیل می یابد .

آخرین نوع بازدارنده ها ، بازدارنده هایی هستند که در اسیدشویی ها جهت زدودن پوسته های اکسیدی از فولاد نورد گرم شده به کار می روند و به بازدارنده های جذبی^۱ موسومند . چند مثال عمومی برای این بازدارنده ها عبارتست از الکیل آمین ها برای اکسیدکلریدریک و تیواوره ها یا تیواترها برای اسیدسولفوریک که با تشکیل یک لایه تک مولکولی بر روی سطح از خورده شدن فلز جلوگیری می کنند ، در صورتی که انحلال لایه های اکسیدی نوردی ادامه پیدا می کند .

بعضی از بازدارنده ها می توانند در ماهیت لایه دوگانه الکتریکی تاثیر بگذارند و چون تغییر لایه دوگانه نرخ واکنشهای الکتروشیمیایی را کنترل می کند ، نرخ خوردگی نیز کاهش می یابد . بنابر این روشهایی که ظرفیت لایه دوگانه و مشخصات آن را اندازه گیری می کند، مانند امپدانس (AC) از مهمترین روشهای آزمایش برای این نوع بازدارنده ها هستند . در تمامی موارد بالا قبل از گزینش روش آزمون و یا روش

دیدبانی ، تاثیر سایر عوامل مانند تنش ، سرعت سیال ، سایش و حضور شیار باید در نظر گرفته شود و در صورتی که در محیط خورنده احتمال ترک خوردن وجود دارد روشهای کاهش وزن و الکتروشیمیایی باید با روشهای غیر مخرب برای ردیابی ترک همراه گردد . در زیر توضیحی مختصر در مورد آزمایشهای همراه با تنش آورده شده است . این آزمایشها برای اندازه گیری انواع ویژه خوردگی که شامل فاکتورهایی همچون تنش هستند تعریف شده اند . مثالهایی از این نوع عبارتند از : خوردگی خستگی ، SCC و تردی

^۱ Adsorption inhibitors

هیدروژنی . در طراحی آزمایشهای مربوط به این نوع خوردگی ها تنوع نمونه های آزمایش برابر با تعداد موارد کاربرد است .

در آزمونهای خوردگی تنشی (SCC) ممکن است از تنش اعمالی ثابت استفاده شود و یا اینکه از تنش متغیری که با پیشرفت ترک تغییر می کند استفاده گردد . آزمونهای خوردگی خستگی ممکن است مطابق با روش اعمال تنشهای دوره ای متغیر باشد ، این تنشها می تواند به صورت کششی یا کششی - فشاری باشد .

در آزمایش معمول تردی حاصل از خوردگی ، از تنش اعمالی استفاده می گردد . هنگامی که شکست کامل رخ داد ، متغیرهای ذیل جهت تجزیه و بررسی اندازه گیری می شوند :

۱ - مدت زمان شکست

۲ - نوع و مقدار تنش مسبب شکست

۳ - غلظت ماده خورنده که موجب شکست می گردد (دیگر کتغیرها ثابت نگهداشته می شوند) .

۱-۲-۱۵ - مثال عملی سیستم خنک کن اتوموبیل

در آزمایش تاثیر یک بازدارنده ، شرایط و عواملی بجز کاهش وزن نمونه فلزی مدنظر می باشد . بسته به نوع سیستم و شرایط حاکم بر آن ، آزمایشهای شبیه سازی شده ویژه ای طراحی می گردد . در ذیل چهار آزمون آزمایشگاهی شرح داده شده اند تا شرایط پیچیده یا خواص ویژه ای که می تواند در طرح یک آزمون برای موارد استفاده ویژه به کار روند، نشان داده شود . جدول (۱ - ۱۵) شرایط هر یک از این چهار تست را جمع بندی

۳- ۱۵- روشهای بررسی تاثیرات بازدارنده ها در آزمایشگاه

به طور کلی میزان خوردگی بر چسب مقادیر نفوذ گزارش می شوند . معمولاً در ایالات متحده برچسب مایل در سال (mpy) گزارش می گردد که هر مایل ۰ / ۰۰۱ اینچ یا ۰ / ۰۲۵۴ میلی متر می باشد، کشورهایی که از سیستم متریک (SI) استفاده می نمایند ، سرعت خوردگی را برحسب میلی متر در سال گزارش می کنند .

راندمان حفاظت از خوردگی توسط بازدارنده ها با اندازه گیری میزان خوردگی یک سیستم مورد آزمایش با حضور و بدون حضور بازدارنده ارزیابی و محاسبه می گردد . راندمان حفاظت که بر حسب درصد بیان می شود ، معمولاً بصورت ذیل تعریف می گردد :

(۱- ۱۵)

$$\text{سرعت خوردگی با حضور بازدارنده} - \text{سرعت خوردگی بدون حضور بازدارنده} \\ \text{درصد حفاظت} = 100 \times \frac{\text{سرعت خوردگی بدون حضور بازدارنده}}{\text{سرعت خوردگی با حضور بازدارنده}}$$

برای بررسی رفتار یک بازدارنده در یک محیط مشخص ، در جلوگیری یا کاهش خوردگی یک فلز از آزمایشهای متعددی کمک گرفته می شود . مهمترین این آزمایشها عبارتند از :

۱- روشهای کاهش وزن

۲- روشهای الکتروشیمیایی

۳- روشهای تجزیه و مطالعات میکروسکوپی

لازم به ذکر است که هیچکدام از روشهای فوق به تنهایی پاسخگوی وضعیت عملکرد یک بازدارنده به طور کامل نخواهد بود ، بلکه باید از چند آزمایش مختلف برای تأیید نتایج آزمایشهای قبلی کمک گرفت [۸] .

۱- ۳- ۱۵- روشهای کاهش وزن

این روش از قدیمی ترین روشها برای تعیین رفتار خوردگی فلزات بشمار می رود . اگر چه این روش دقت بالایی سایر روشها را ندارد ، ولی به دلیل سادگی و همچنین یک تخمین اولیه از رفتار بازدارنده مورد نظر ، در سیستم به کار می رود .

روشهای کاهش وزن به دو نوع ثابت و متحرک تقسیم می شوند . در حالت نخست نمونه فلزی در محیط مورد نظر برای مدتی مشخص قرار گرفته و در پایان آزمایش کاهش وزن به دست آمده اندازه گیری می شود ، ولی در روش دوم یا نمونه ها در یک سیال متحرک قرار می گیرند (آزمایش لوپ^۱) و یا اینکه نمونه ها در داخل محیط به چرخش در می آیند (آزمایش ویل^۲) .

در کلیه روشهای فوق نمونه آزمایش در ابتدا مطابق روشهای استاندارد تمیزکاری (چربی گیری ، اسید شویی و ...) می شود . سپس با یک ترازو با دقت حداقل 0.1 mgr وزن می شود . از طرف دیگر محلول مورد نظر (مانند آب خنک کن) با مقدار مورد نظر بازدارنده یا بازدارنده ها در pH و دمای مشخص آماده می شود . بعد از وزن کردن ،

^۱ Test Loop
^۲ Wheel Test

نمونه های فلزی در محیط مورد نظر غوطه ور می شوند و به آن زمان داده می شود تا خوردگی انجام گیرد .

زمان انجام آزمایش از رابطه زیر به دست می آید :

$$(2-15)$$

$$t = \frac{2000}{mpy}$$

t = زمان بر حسب ساعت

mpy = سرعت خوردگی یک نمونه فلزی که تقریباً در زمانهای کوتاهیتری (برای آب

خنک کن یک الی سه هفته) در محیط مورد مطالعه قرار گرفته است .

بطور مثال چنانچه خوردگی فلز را در محیط $2 mpy$ در نظر بگیریم مدت زمان t برابر

1000 ساعت خواهد بود . بعد از پایان زمان آزمایشها نمونه های فلزی از محلول خارج

شده و بعد از طی مراحل شستشو بطور دقیق وزن می گردند . با کمک اختلاف وزن ایجاد

شده می توان با استفاده از رابطه زیر سرعت خوردگی فلز را بر حسب میلی متر بر سال

محاسبه کرد [۶] :

$$(mm/yr) = \frac{10 \times [\text{gr}] \times [\text{cm}^2] \times [\text{سال}]}{[\text{Cm}^3] \times [\text{انسیته نمونه}]} \quad (3-15)$$

هرچه سرعت خوردگی بالاتر باشد دقت روش فوق بیشتر است .

در روش کاهش وزن می توان با تغییر درجه حرارت ، pH و سرعت سیال شرایطی تقریباً مشابه با شرایط کاری سیستم خنک کن مورد نظر در آزمایشگاه برای انتخاب بازدارنده ایجاد کرد . علاوه بر نتیجه کاهش وزن از روش فوق ، نمونه ها بعد از اینکه از محلول خارج می شوند باید برای خوردگی موضعی به طور کامل بازرسی چشمی شوند . نتایج را می توان به صورت کیفی بیان نمود .

استاندارد ASTM G ۴۶ روشهای مناسب برای مطالعه خوردگی حفره ای را در این زمینه بیان می کند .

۲- ۳- ۱۵- آزمون لوپ برای بازدارنده ها

به طور کلی تمامی آزمونهایی که بتواند میزان کاهش وزن را نشان دهد ، برای آزمایش بازدارنده ها کاربرد دارد . در طراحی این آزمونها باید به موارد زیر توجه کرد :

۱- کمترین و بیشترین درجه حرارت

۲- انتقال حرارت

۳- وجود تنش

۴- pH محیط

۵- میزان اکسیژن حل شده

۶- وجود یونهای خورنده مانند Cl^-

۷- غلظت بازدارنده و یا بازدارنده ها و عملیات تصفیه آب^۱

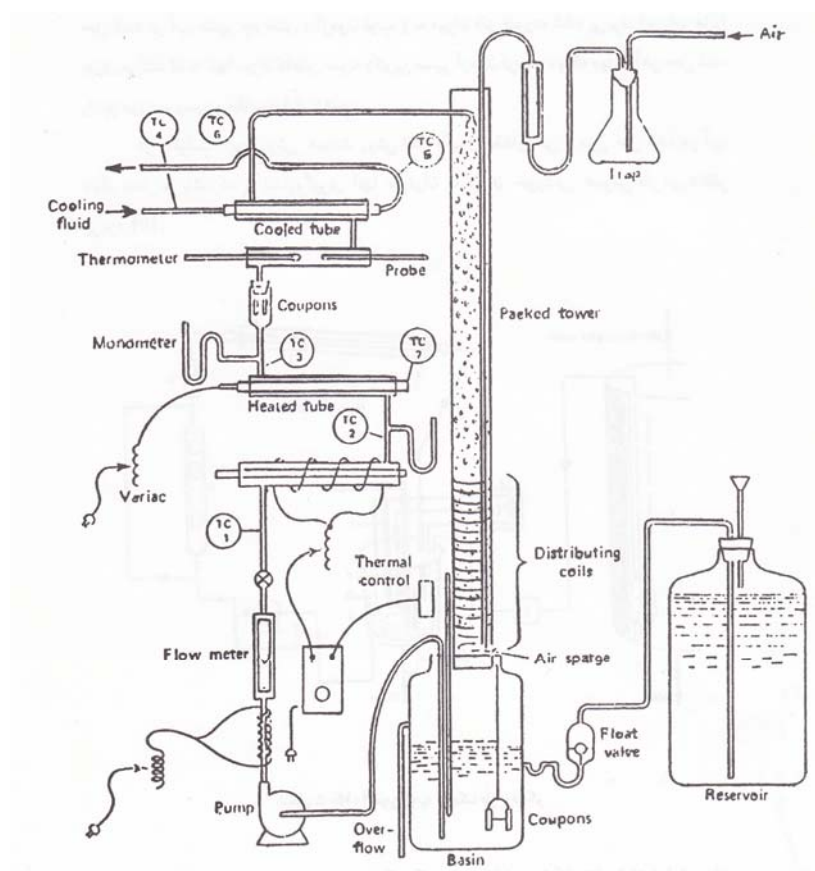
^۱ Water treatment

۸- سرعت جریان

۹- وجود ذرات معلق

۱۰- ترکیب شیمیائی آب و قدرت رسوب دهی آن

به همین منظور آزمونهایی توسط شرکتهای مختلف ابلاغ شده است که اکثر آنها مبتنی بر روشهای کاهش وزن است ، ولی می توان سایر روشهای دیدبانی را نیز در آنها به کار برد. شکل (۴ - ۱۵) نمونه ای از این آزمونها را نشان می دهد و یا شکل (۵ - ۱۵) که توسط شرکت دیگر ابداع شده است ، نشان دهنده این آزمونها است [۲] .

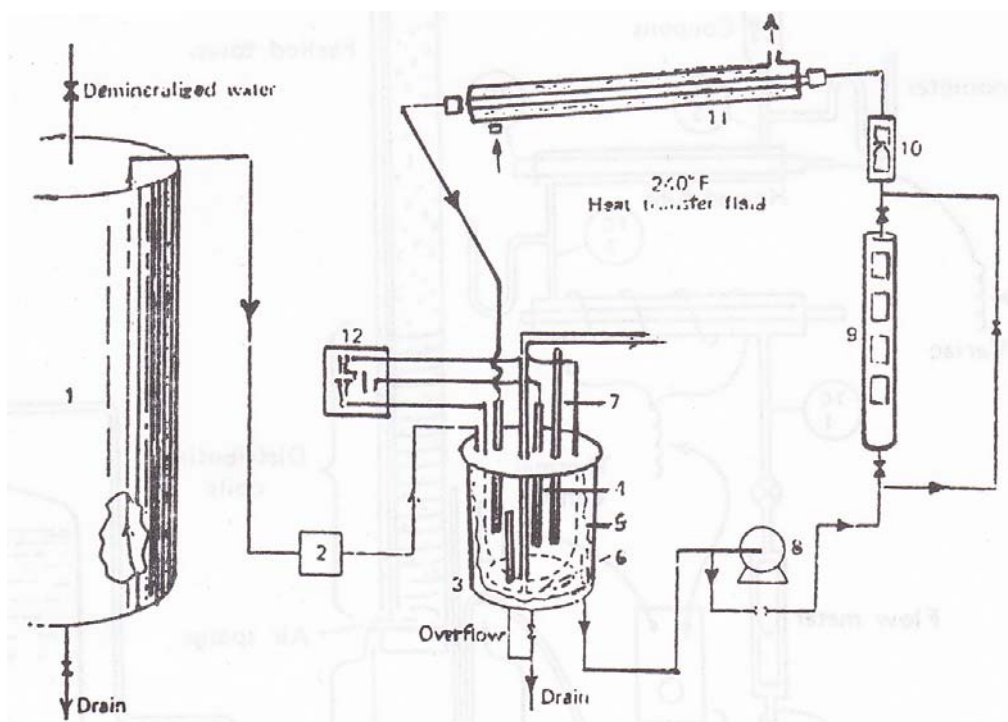


شکل ۴-۱۵: آزمون لوپ برای خوردگی آب خنک کن (شرکت Mansanto chemical)

شایان ذکر است که در آزمایش آزمون لوپ می توان با اندازه گیری میزان آهن و یا مس حل شده در آب مسیر چرخش (آزمون لوپ) به میزان فلز خورده شده پی برد . این امر ما را یاری می کند که نه تنها میزان کاهش نمونه (کوپن مسیر آزمون بوپ) ، بلکه میزان آهن حل شده را نیز مورد بررسی و مقایسه قرار دهیم .

در حقیقت این روش مانند روش اندازه گیری مقدار آهن و مس حل شده در آب دیگ بخار می باشد که با اندازه گیری آنها می توان به میزان خوردگی عمومی فلز مورد نظر پی برد]

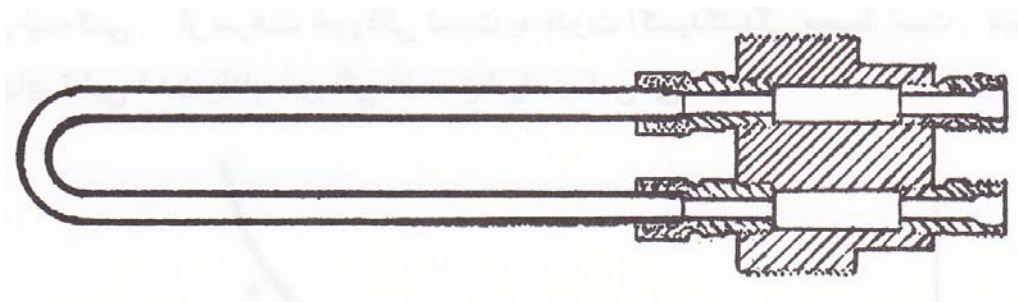
[۷ .



شکل ۵-۱۵: آزمون لوپ با یک طرح دیگر

روشهای ساده تری نیز وجود دارد که یک نمونه از آن در شکل (۶-۱۵) نمایش داده شده است

باید توجه کرد که در آزمونهای لوپ که در بالا توضیح داده شد امکانات زیادی برای نصب انواع وسایل اندازه گیری موجود است که آزمون زیر فاقد آن امکانات است ، ولی این آزمون برای آزمایش بازدارنده در مبدل‌های حرارتی بسیار مؤثر است و می توان خود لوله را پس از اسیدشویی وزن کرده و کاهش وزن آن را به دست آورده . این سیستم در داخل برج خنک کن نصب می شود [۷] .



شکل ۶- ۱۵: آزمایش لوله های U شکل همراه با انتقال حرارت (به متن مراجعه شود) .

۴- ۱۵- روشهای دیدبانی خوردگی در آزمایشگاه و صنعت

در این قسمت علاوه بر روشهای الکتروشیمیایی دیدبانی خوردگی روشهای غیر مخرب دیدبانی خوردگی و همچنین روشهای خاص دیدبانی بررسی خواهد شد . اکثر روشهای فوق ، کاربرد صنعتی و نیمه صنعتی دارند ، ولی روشهای الکتروشیمیایی هم در صنعت و هم در آزمایشگاه کاربرد دارند و برای درک بهتر ، لازم است در ابتدا روابط جریان - ولتاژ و مفاهیم قطبی شدن (پلاریزاسیون) بررسی شود و پس از آن به روشهای دیدبانی الکتروشیمیایی پرداخته شود .

۱-۴-۱۵- روشهای الکتروشیمیایی

در ابتدای این بخش ، مفاهیم قطبی شدن و روابط جریان - ولتاژ بررسی می شود ، سپس

روشهای

الکتروشیمیایی دیدبانی خوردگی توضیح داده می شود .

۱-۴-۱۵-۱- مفاهیم اساسی منحنیهای قطبی شدن^۱

منحنیهای قطبی شدن به صورت ساده ، نموداری از پتانسیل نسبت به چگالی جریان هستند

. مثالی از یک منحنی قطبی شدن در شکل (۷-۱۵) نشان داده شده است . دستورالعمل به

دست آوردن یک منحنی قطبی شدن در ادامه به تفصیل توضیح داده خواهد شد . با توجه

به شکل (۷-۱۵) پتانسیلهای مثبت ، نجیب^۲ و پتانسیلهای منفی ، فعال^۳ خوانده می شوند .

پتانسیل الکتروآزمایشی ، قدرت اکسیدکنندگی محیط را منعکس می کند و شدت جریان

سرعت خوردگی را مشخص می سازد .

بنابر این ، منحنی پلاریزاسیون یک منحنی نیمه کمی^۴ از سرعت خوردگی نسبت به قدرت

اکسیدکنندگی محیط است . شکل منحنیهای قطبی شدن رفتار خوردگی آن محیط را منعکس

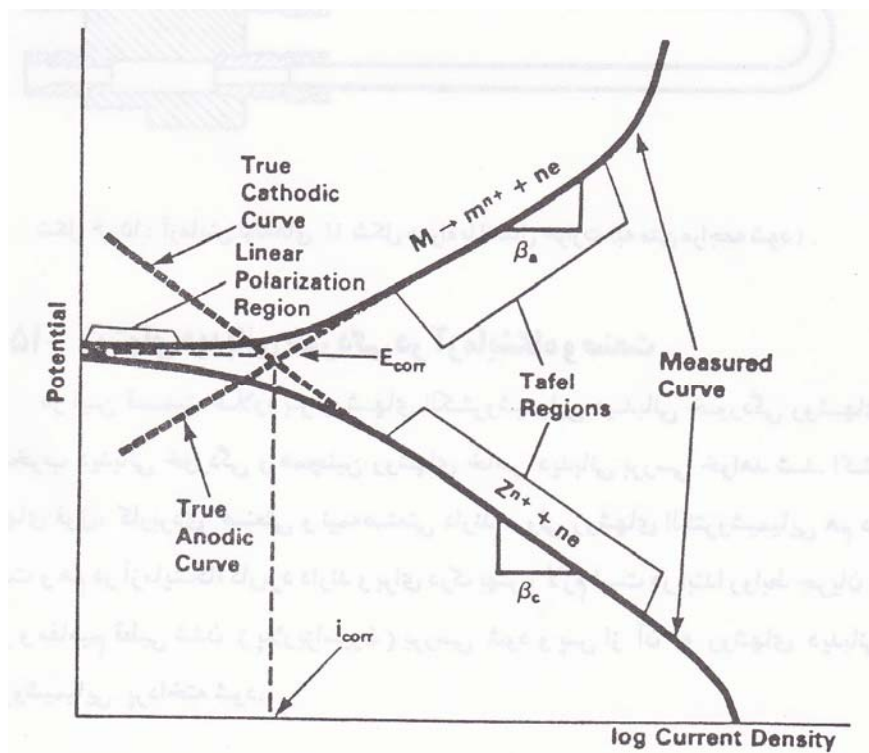
می نماید .

^۱ Polarization

^۲ Noble

^۳ Active

^۴ Semi - quantitative



شکل ۷-۱۵: یک نمونه منحنی قطبی شدن و نام گذاری نواحی مختلف روی آن

۱- رفتار قطبی شدن کاتدی^۱

شکل منحنی قطبی شدن کاتدی در پیش بینی رفتار خوردگی مهم است. دو نوع رفتار کاتدی بسیار مهم، قطبی شدن فعالیت^۲ و قطبی شدن غلظتی^۳ می باشد که در شکل (۸-۱۵) نشان داده شده است. در این شکل قطبی شدن فعالیت با یک ناحیه خطی، که متناسب بودن جریان با پتانسیل را نشان می دهد، مشخص می شود؛ در این منطقه واکنش کاتدی توسط انرژی اکتیواسیون مورد نیاز برای بعضی مراحل واکنش محدود می گردد. قطبی شدن غلظتی توسط یک ناحیه خطی در منحنی مشخص می گردد. در این ناحیه جریان تابعی از

^۱ Cathodic polarization

^۲ Activation polarization

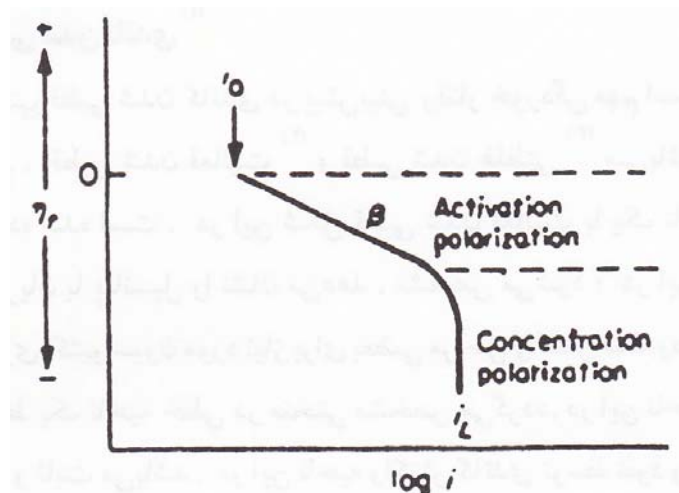
^۳ Concentration polarization

پتانسیل نیست و ثابت می باشد . در این ناحیه واکنش کاتدی توسط نفوذ واکنش گرهای^۱ به سوی سطح فلز محدود می گردد .

منحنی قطبی شدن که به صورت آزمایشی رسم شده است شامل هر دو منطقه مزبور است . در بعضی از موارد منحنی ممکن است فقط یکی از این دو منطقه را دارا باشد . در واقعیت و در محلولهایی که ممکن است چند واکنش کاتدی در آنها به طور هم زمان رخ دهد ، منحنی کاتدی مجموع این رفتارها (رفتارهای واکنش های کاتدی) است . قسمت خطی تحت کنترل فعالیت منحنی کاتدی به منطقه تافل^۲ موسوم است . این ناحیه دارای شیبی است که به نام شیب تافل^۳ خوانده می شود و با نماد β_c مشخص می شود . منحنی های آندی هم دارای نواحی تحت کنترل فعالیت (اکتیواسیون) هستند که نواحی تافل نامیده می شوند و شیب تافل آنها با نماد β_a نشان داده می شود . ثوابت تافل β_a و β_c دارای واحدهای دهم ولت (V / decade) هستند و می توان از آنها برای محاسبه شدت جریان خوردگی استفاده کرد . این روابط در ادامه بخش مقاومت قطبی شدن ذکر می شود [۹] .

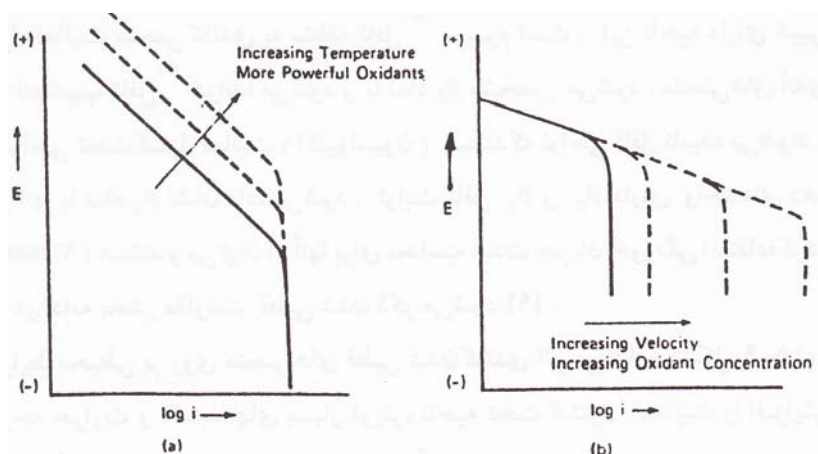
شرایط محیطی بر روی منحنی های قطبی شدن کاتدی اثر می گذارد (شکل ۹-۱۵) . افزایش درجه حرارت و اکسیدانهای بسیار قویتر ، ناحیه تحت کنترل فعالیت را افزایش می دهد ؛ این تاثیرات در شکل (۹-۱۵ a) کاملاً مشهود است .

^۱ Reactants
^۲ Tafel region
^۳ Tafel slope



شکل ۸-۱۵: نواحی قطبی شدن غلظتی و فعالیت در منحنی قطبی شدن کاتدی

افزایش سرعت یا غلظت ماده اکسیدان، ناحیه تحت کنترل قطبی شدن غلظتی را افزایش می دهد (شکل b-۹-۱۵). این نکته که چگونه خوردگی توسط قطبی شدن فعالیت یا غلظتی کنترل می شود اهمیت عملی بسیار زیادی دارد [۸].



شکل ۹-۱۵: تاثیر تغییر محیط بر رفتار قطبی شدن کاتدی

(a) تاثیر افزایش دما و اکسیدانهای خیلی قوی

(b) تاثیر افزایش سرعت و غلظت اکسیدان^۱

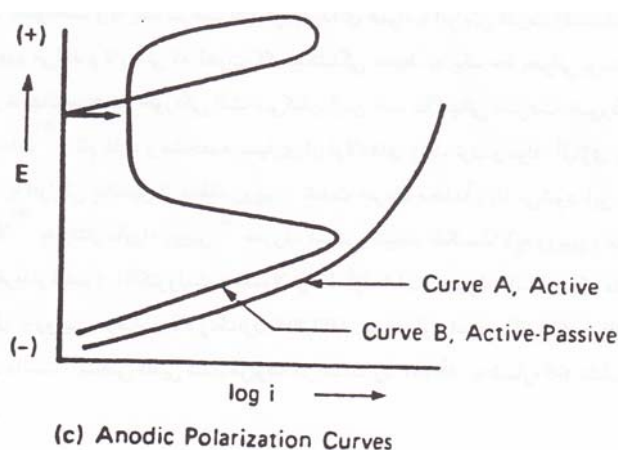
^۱ Oxidant concentration

خوردگی که در ناحیه تحت کنترل قطبی شدن فعالیت اتفاق می افتد به درجه حرارت و مقادیر کم اکسیدانهای جدید حساس است ، ولی حساسیتی به تغییرات در سرعت و مقدار و غلظت مواد اکسیدان ندارد .

خوردگی که در ناحیه تحت کنترل قطبی شدن غلظتی قرار دارد به سرعت و غلظت اکسیدان حساس است ، ولی به حضور مقادیر متوسط یک اکسیدان جدید حساسیتی ندارد ، به علاوه تغییرات حدی هر یک از متغیرها احتمال دارد منجر به تغییر کنترل سرعت خوردگی از فعالیت به غلظتی یا بر عکس گردد .

۲- رفتار قطبی شدن آندی^۱

منحنی های قطبی شدن برای هر ترکیب و بر اساس محیط - آلیاژ ، شکل منحصر به فردی دارد . دو نوع کلی و مشهور منحنی قطبی شدن آندی وجود دارد که به فعال رویین^(۲) معروفند [۱۰] . این منحنی های قطبی شدن در شکل (۱۰-۱۵) نشان داده شده اند .



شکل ۱۰-۱۵ : منحنی قطبی شدن آندی

^۱ Anodic polarization

منحنی هنگامی رفتار فعال از خود نشان می دهد که شدت جریان به طور مداوم و پیوسته با افزایش پتانسیل زیاد شود ، و این امر به معنای آن است که بگوئیم سرعت خوردگی به صورت پیوسته با افزایش قدرت اکسیدکنندگی محیط زیاد می شود . مثالی از چنین رفتاری، رفتار مس در اسید کلریدریک است که بدون وجود هیچ اکسیدانی در محلول ، خورده نمی شود . ولی با افزایش قدرت اکسیدکنندگی ، با سرعت افزایش یابنده ای خوردگی صورت می گیرد . آلیاژهایی که رفتار فعال از خود نشان می دهند ، عموماً به صورت یکنواخت خورده می شوند و به اکسیدانهای موجود در محیط حساس هستند . حساسیت به سرعت نیز در حضور اکسیدانها معمول است ، زیرا سرعت خوردگی غالباً با نفوذ^۱ اکسیدانها به سطح آلیاژ ارتباط دارد [۱۱ و ۱۰] .

منحنی هایی که رفتار فعال - رویین از خود نشان می دهند بصورت منحنی (b) در شکل (۱۰ - ۱۵) نشان داده شده اند . شدت جریان با افزایش پتانسیل در ابتدا افزایش می یابد ، سپس به طور ناگهانی به یک مقدار کم ، افت می کند . این بدان معنی است که بگوئیم خوردگی به صورت یکنواخت و با یک سرعت افزایش یابنده ای همراه با افزایش قدرت اکسیدکنندگی محیط ظهور می کند و تا زمانی که قدرت اکسیدکنندگی محیط به یک حد بحرانی برسد زیاد می شود و ناگهان سرعت خوردگی افت می کند . این افت ناگهانی سرعت خوردگی ، « رویین شدن^۲ » نام دارد و مشخصه بسیاری از فولادهای زنگ نزن و

^۱ Diffusion

^۲ Passivation

مواد آلیاژی بالا^۱ می باشد . با افزایش پتانسیل از منطقه رویین ، شدت جریان مجدداً زیاد می شود . این رفتار جریان بالا^۲ به رفتار ماوراء رویین^۳ معروف است و نتیجه شکست لایه رویین (معمولاً توسط حفره دار شدن) یا الکترولیت (معمولاً توسط آزاد شدن اکسیژن) است . یک مثال از رفتار فعال – رویین ، رفتار فولاد زنگ نزن AISI ۳۰۴ در محلول اسیدسولفوریک (H_2SO_4) یک نرمال است . منحنی قطبی شدن مربوط در استاندارد ASTM به شماره Go نشان داده شده است .

رفتار «رویین شدن مستقیم» یک مورد ویژه از رفتار فعال – رویین است که در آن ، قله^۴ آندی توسط مقادیر زیاد عناصر آلیاژی به نحوی تغییر یافته است که فلز به راحتی در آن محیط بدون کمک اکسیدکننده های دیگر رویین می شود [۱۱] .

رفتار خوردگی آلیاژها در واقع مخلوطی از رفتارهای فعال و فعال – رویین است که در شکل (۱۰- ۱۵) نشان داده شده است . اینکه آیا یک آلیاژ در یک محیط بخصوص رفتار فعال یا فعال – رویین از خود نشان می دهد ، غالباً قضاوت و تشخیصی کیفی است .

آلیاژهایی که رفتار فعال – رویین از خود نشان می دهند ، در محیطهایی که قدرت اکسیدکنندگی بالائی ندارند به صورت یکنواخت و سریع خورده می شوند ، ولی این آلیاژها در محیطهایی که قدرت اکسیدکنندگی بالائی دارند از سرعت خوردگی کمی برخوردار

^۱ High - alloy
^۲ High - Current
^۳ Transpassive
^۴ Pick

هستند (زیرا در محیطهای اکسیدان تر رویین می شوند) . این رفتار ، اساس کار سیستمهای متداول حفاظت آندی^۱ برای فولاد زنگ نزن

AISI ۳۰۴ مورد استفاده در تجهیزات ساخت اسید سولفوریک غلیظ است که قدرت

اکسیدکنندگی محیط به صورت الکتریکی ایجاد می گردد [۱۱] .

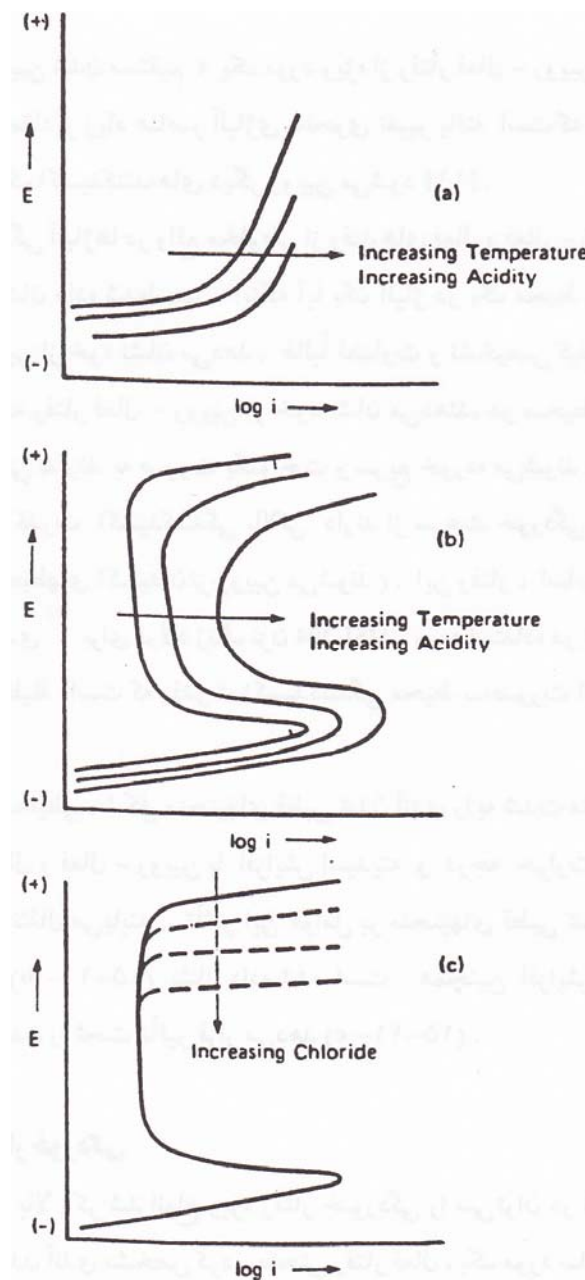
متغیرهای محیطی ، شکل منحنیهای قطبی شدن آندی را به شدت متأثر می سازند ؛ هر دوی منحنیهای فعال و فعال - رویین با افزایش اسیدیته و درجه حرارت به سمت شدت جریانهای بیشتر انتقال می یابند . تأثیر این عوامل بر منحنیهای قطبی شدن در شکلهای (a) و (۱۱-۱۵) و (b - ۱۱-۱۵) نشان داده شده است . همچنین افزایش غلظت کلر نیز منحنیهای قطبی شدن را تحت تأثیر قرار می دهد (c - ۱۱-۱۵) .

۳ - نواحی رفتار خوردگی

چنانچه در بالا ذکر شد انواع ویژه رفتار خوردگی را می توان در نواحی مختلف منحنیهای قطبی شدن آندی مشخص کرد . منحنی رفتار فعال ، یک مورد ساده و ابتدایی است زیرا در این مورد خوردگی در تمام محدوده آندی یکنواخت است . آلیاژهایی که رفتار فعال - رویین از خود نشان می دهند ، فرصت مناسبی برای پیش بینی رفتار خوردگی براساس مشخصات منحنی قطبی شدن را مهیا می سازند . نواحی خوردگی در منحنی قطبی شدن فعال - رویین در شکل (۱۲-۱۵) نشان داده شده است ، هنگام خوردگی یکنواخت انتظار می رود که پتانسیل در محدوده قله آندی باشد ، در حالی که اگر پتانسیل در ناحیه رویین باشد

^۱ Anodic protection

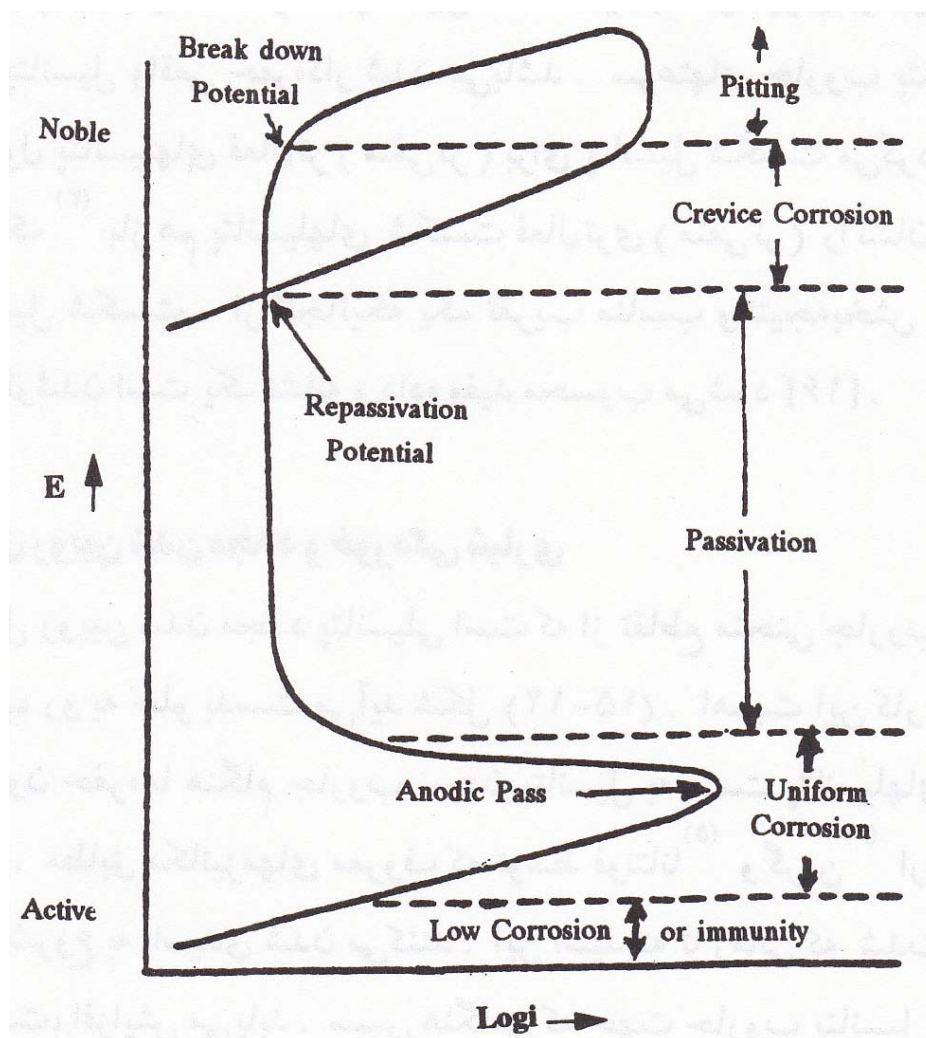
، انتظار سرعت خوردگی بسیار کمی را داریم . خوردگی شیاری در پتانسیلهای بین پتانسیل رویین شده مجدد^۱، پتانسیل رویین شدن و پتانسیل شکست^۲ رخ خواهد داد .



شکل ۱۱-۱۵: اثر متغیرهای محیطی بر رفتار قطبی شدن آندی

^۱ Repassivation potential

^۲ Break down Potential



شکل ۱۲-۱۵: نواحی خوردگی در منحنی قطبی شدن فعال - رویین

۴ - پتانسیل شکست و حفره دار شدن^۱

پتانسیل شکست پتانسیلی است که در آن لایه رویین در اثر قدرت اکسیدکنندگی بالا و آنیونهای خورنده ای همچون کلر شروع به شکسته شدن می کند . هنگامی که چنین اتفاقی رخ دهد ، مقادیر زیادی جریان آندی (خوردگی) از طریق نواحی^۲ شکسته شده لایه ، عبور

^۱ Pitting
^۲ Sites

می کند و دانسیته جریان بسیار بالائی در این مناطق بوجود می آید [۱۵ و ۱۴]. در این مناطق حفره ها بوجود می آید ، بنابر این استفاده از واژه پتانسیل شکست برای ظهور حفره دار شدن منطقی است . باید خاطر نشان کرد که پتانسیل شکست یک اندازه گیری دینامیکی است و تنها تقریبی برای پتانسیل واقعی حفره دار شدن می باشد . سرعت های جاروب پتانسیل^۱ آرامتر منجر به حصول پتانسیلهای فعال تر (منفی تر) برای پتانسیل شکست می گردد و آزمایشهای پتانسیواستاتیک^۲ باز هم پتانسیلهای شکست فعال تری (منفی تری) را نشان می دهد . با این وجود ، پتانسیل شکست ، از آنجائیکه یک تقریب مناسب و نتیجه بخش برای پتانسیل واقعی حفره دار شدن است یک نشانه و داده مفید محسوب می شود [۱۶] .

۵ - پتانسیل رویین شدن مجدد و خوردگی شیاری

پتانسیل رویین شدن مجدد پتانسیلی است که از تقاطع منحنی جاروب معکوس^۳ با منحنی جاروب رو به جلو بدست می آید شکل (۱۲-۱۵) . اهمیت این کار با در نظر گرفتن رخداد های درون حفره ها هنگام جاروب نمودن پتانسیل به سمت پتانسیلهای بالاتر درک می گردد [۱۷] . مطابق مکانیزمهای معروف که توسط فونتانا^۴ و گرین^۵ ارائه شده است ، درون حفره ها شروع به اسیدی شدن می کنند . این اسیدیته تا زمانی که شدت جریان درون حفره ها بالا است ، افزایش می یابد . سپس هنگامیکه جهت جاروب پتانسیل تغییر می

^۱ Scan Rate

^۲ Potentiostatic tests

^۳ Reverse scan

^۴ Fontana

^۵ Green

کند و معکوس می شود حفره ها علی رغم اسیدپشته بالایشان دوباره رویین می شوند و این امر باعث افت زیاد جریان می گردد و عاقبت منحنی رفت را نیز در یک نقطه قطع می کند (شکل ۱۲-۱۵) . اسیدی شدن که در بالا ذکر شد شبیه و قابل مقایسه با اسیدی شدنی است که در یک شیار قبل از خوردگی شیاری رخ می دهد . اگر قدرت اکسیدکنندگی محیط به اندازه کافی پایین باشد که اجازه دهد حفره های اسیدی دوباره رویین شوند ، پس معقول آن است که شیارها نیز در همان قدرت اکسید کنندگی بتوانند مجدداً رویین شوند یا به طور دقیق تر ، آنقدر اسیدی نشوند که خورده شوند ، یعنی در این پتانسیل قدرت اسیدی شان آنقدر نباشد که منجر به خوردگی شود [۱۸] .

پتانسیل رویین مجدد نشان می دهد که قدرت اکسیدکنندگی چقدر باید کم باشد تا از رشد خوردگی شیاری جلوگیری شود . مشابه پتانسیل شکست ، پتانسیل رویین مجدد نیز نتیجه اندازه گیری دینامیکی است و تقریبی برای پتانسیل حقیقی خوردگی شیاری است [۱۸] . سرعت جاروب کم و جاروب کردن تا پتانسیلهائی که شدت جریانهای آندی بالائی وجود دارد ، باعث تولید اسیدپشته زیادی در حفره ها می شود و بنا بر این پتانسیل رویین مجدد ، فعال تر (منفی تر یا قدرت اکسیدکنندگی کمتر) می گردد . همانند پتانسیل شکست ، در پتانسیل رویین مجدد نیز چندان زیاد نخواهد بود که فایده و کارائی آن از بین برود [۱۹] . آزمایشهای انجام شده در طی سالها و در بسیاری از سیستمهای فلز - محیط نشان داده است که پتانسیل رویین مجدد در حال مسائل و برآورد خوردگی مهم و ارزشمند است . پتانسیلهای شکست و رویین مجدد نقاط مشخصه ای در منحنیهای قطبی شدن هستند که

معمولاً توسط آزمایشهای پتانسیودینامیک^۱ به دست می آیند . آزمایشهای پتانسیواستاتیک اغلب برای برآورد و حصول مقادیر دقیق تر پتانسیلهایی که حفره دار شدن و خوردگی شیار در آنها رخ می دهد استفاده می شود [۲۰] .

۶ - مبنای منحنیهای قطبی شدن

در سال ۱۹۳۸ واگنر^۲ و ترود^۳ مقاله زیر را در رابطه با « تئوری پتانسیل مختلط » ارائه کردند ، گرچه این تئوری پیچیده است ، ولی مفاهیم بسیار مهم و اصلی آن کاملاً ساده است . درک این تئوری برای فهم و تغییر و تفسیر دقیق و کامل منحنیهای قطبی شدن ضروری است .

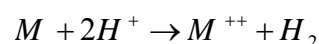
تئوری پتانسیل مختلط با دو بیان کلی جمع بندی می شود [۲۱] :

الف) واکنشهای آندی و کاتدی انجام شده بر روی یک فلز در حال خورده شدن را می توان به صورت مجزا از هم در نظر گرفت و مورد بررسی قرار داد .

ب) تمامی الکترونهایی که توسط واکنش خوردگی آندی تولید می شود باید در واکنش کاتدی مصرف کرد.

واکنشهای خوردگی معمولاً به صورت ذیل نوشته می شوند .

(۱۵-۴)



^۱ Potentiodynamic tests

^۲ Wanger

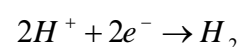
^۳ Traud

عبارت (الف) در بالا ، به طور ساده بیان می کند که معادله (۱۵-۴) می تواند به صورت ذیل دوباره سازی شود و واکنشها از یکدیگر تفکیک شوند .

(۱۵-۵)



(۱۵-۶)



معادله (۱۵-۵) واکنش آندی است که اکسیداسیون (خوردگی) را در برابر و در این جا به صورت ساده و عمومی برای فلز نوشته شده است . معادله (۱۵-۶) واکنش کاتدی است و احیای یک جزء را در بردارد . واکنشهای احیاء نیز به صورت تکی یا به صورت چند تائی و ترکیبی از چند واکنش نیز می تواند انجام شود [۲۱] . عبارت (ب) نیز در پاراگراف بالا به صورت ساده بیان می کند که کلیه الکترونهاى حاصل از واکنش (۱۵-۶) باید توسط واکنش یا واکنشهای کاتدی مثلاً (واکنش کاتدی احیای هیدروژن) مصرف شود . با این توضیحات می توان حدس زد که منحنیهای قطبی شدن در واقع مجموع این دو منحنی هستند که یکی بیان کننده واکنش آندی (خوردگی) و دیگری نشان دهنده واکنش کاتدی (احیاء) است . این منحنیها سینتیک واکنشهای آندی و کاتدی را بر روی یک الکتروود منفرد ، به صورت تابعی از پتانسیل نشان می دهد . به عنوان مثال در اینجا احیای یون هیدروژن نشان داده شده است . ضمن آنکه واکنشهای کاتدی دیگر نیز می توانند به صورت مشابه بحث و مطرح گردند [۲۲] .

منحنیهای شکل (۱۵-۱۳-a) و (۱۵-۱۳-b) مربوط به واکنشهای انجام شده در روی یک الکتروود هستند و می توانند در یک شکل مثل (۱۵-۱۳-c) رسم گردند . به خاطر بیاورید که عبارت (ب) بیان میدارد که تمام الکترونها تولید شده در واکنش آندی باید در واکنش کاتدی مصرف شود و این عبارت در واقع این مفهوم را دارد که جریانهای آندی و کاتدی باید در شرایط خوردگی آزاد^۱ برابر باشند [۲۳]. شکل

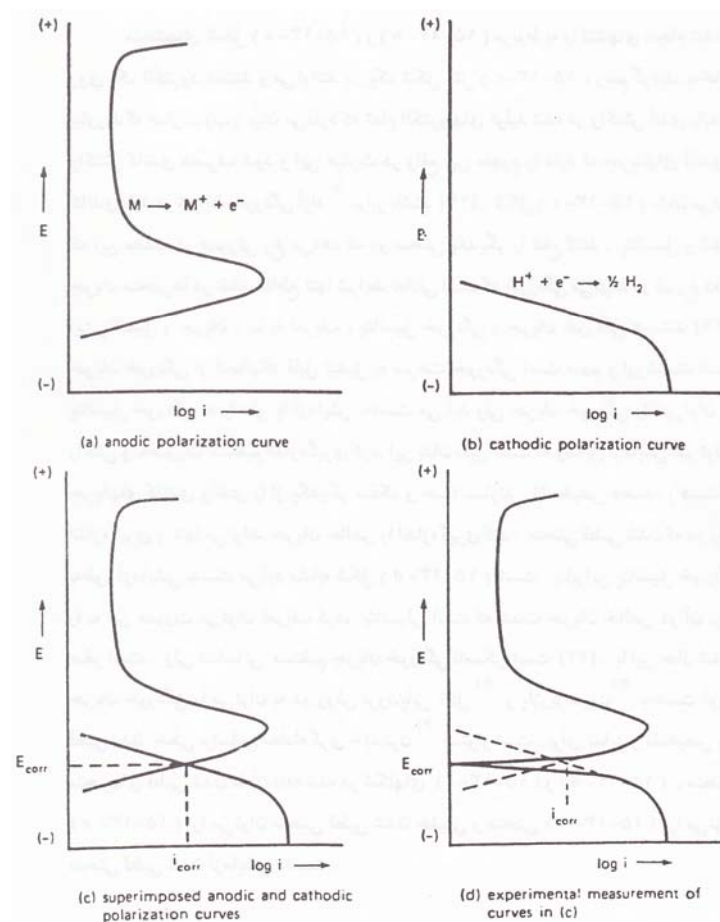
(۱۵-۱۳-c) نشان می دهد که این مطلب در صورتی رخ می دهد که دو منحنی یکدیگر را قطع کنند . پتانسیل و شدت جریان منحنی ها در نقطه تقاطع تنها شرایط تعادلی است که خوردگی می تواند در آن رخ دهد . این پتانسیل و جریان ، بنا به تعریف ، پتانسیل خوردگی و جریان خوردگی هستند [۲۲].

جریان خوردگی از آنجائیکه قابل تبدیل به سرعت خوردگی است مهم و ارزشمند است . پتانسیل خوردگی به راحتی با آزمایش به دست می آید ولی جریان خوردگی را نمی توان به راحتی و به صورت مستقیم اندازه گیری کرد . این بدان دلیل است که وسایل آزمایش نمی توانند جریانهای کاتدی و آندی را از یکدیگر منفک و جدا سازند . تشخیص دهنده (دستگاه اندازه گیری) تنها می تواند جریان خالص را اندازه گیری کند . منحنی قطبی شدن که در واقع به طور آزمایشی بدست می آید مشابه شکل (۱۵-۱۳-d) است .

بنابر این پتانسیل خوردگی را به این صورت می توان تعریف کرد ، پتانسیلی است که شدت جریان خالص در آن برابر صفر است . ولی شناسائی مستقیم جریان خوردگی ناممکن

^۱ Freely – Corroding conditions

است [۲۴]. با این حال شدت جریان خوردگی را می توان به دو روش برون یابی تافل^۱ و پلاریزاسیون^۲ به دست آورد. قطبی شدن خطی بر اساس معادله گری - استرن^۳ استوار است. برای تمایز و تشخیص بین منحنیهای قطبی شدن نشان داده شده در شکلهای (c) - (۱۵-۱۳) و (d) - (۱۵-۱۳)، منحنی (c) - (۱۵-۱۳) را می توان منحنی قطبی شدن حقیقی و منحنی (d) - (۱۵-۱۳) را می توان منحنی قطبی شدن آزمایشی دانست.



شکل ۱۵-۱۳: منحنیهای قطبی شدن آنودی و کاتدی

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| (a) منحنی قطبی شدن آنودی | (b) منحنی قطبی شدن کاتدی |
| (c) جمع منحنیهای آنودی و کاتدی | (d) منحنیهای قطبی شدن واقعی |

^۱ Tafel extrapolation
^۲ Polarization
^۳ Geary - Stern

۷- درک منحنیهای قطبی شدن آزمایشی

منحنی آزمایشگاهی که در شکل (d-۱۳-۱۵) نشان داده شده منحنی شماتیکی است ، منحنیهای واقعی اشکال دیگری دارند که متناسب با شکل منحنی کاتدی و آندی و موقعیت آنها نسبت به هم می باشد . بنا بر این منحنی حاصله در آزمایش ، می تواند اشکال گوناگونی داشته باشد . مثالهایی از منحنیهای قطبی شدن آندی و کاتدی و منحنیهای معادل آزمایشی آنها در توضیحات ذیل آورده شده است . شکل (۱۴-۱۵) نشان می دهد که چگونه ممکن است منحنیهای آزمایشی ظاهراً متفاوت باشند ، در حالی که تمامی آنها بر پایه یک منحنی آندی استوارند . در این مورد منحنی رفتاری فعال از خود نشان می دهد [۲۵ و ۲۴] . ستون سمت چپ در شکل (۱۴-۱۵) منحنیهای آندی و کاتدی واقعی را نشان می دهد . ستون سمت راست منحنیهای آزمایشی مربوط و متناظر را نشان می دهد . پتانسیل و شدت جریان خوردگی با علامت دایره مشخص شده است . توجه داشته باشید که منحنی واقعی آندی در هر دو مورد یکی است و تنها تفاوت در منحنی کاتدی است ، منحنی کاتدی واقعی نه تنها بر ظاهر منحنی آزمایشی ، بلکه بر پتانسیل و شدت جریان خوردگی نیز تأثیر می گذارد . توجه داشته باشید که ناحیه خطی تحت کنترل فعالیت به راحتی در منحنیهای واقعی قابل شناسائی است ، ولی در منحنیهای آزمایشی این ناحیه یا بسیار کمتر قابل شناسائی است و یا اینکه به طور کامل محو می باشد . اگر منحنی آندی واقعی ، رفتاری فعال - رویین داشته باشد منحنی آزمایشی ممکن است تنوع بیشتری هم داشته باشد . منحنیهای کاتدی و آندی (فعال - رویین) واقعی در ستون سمت چپ شکل

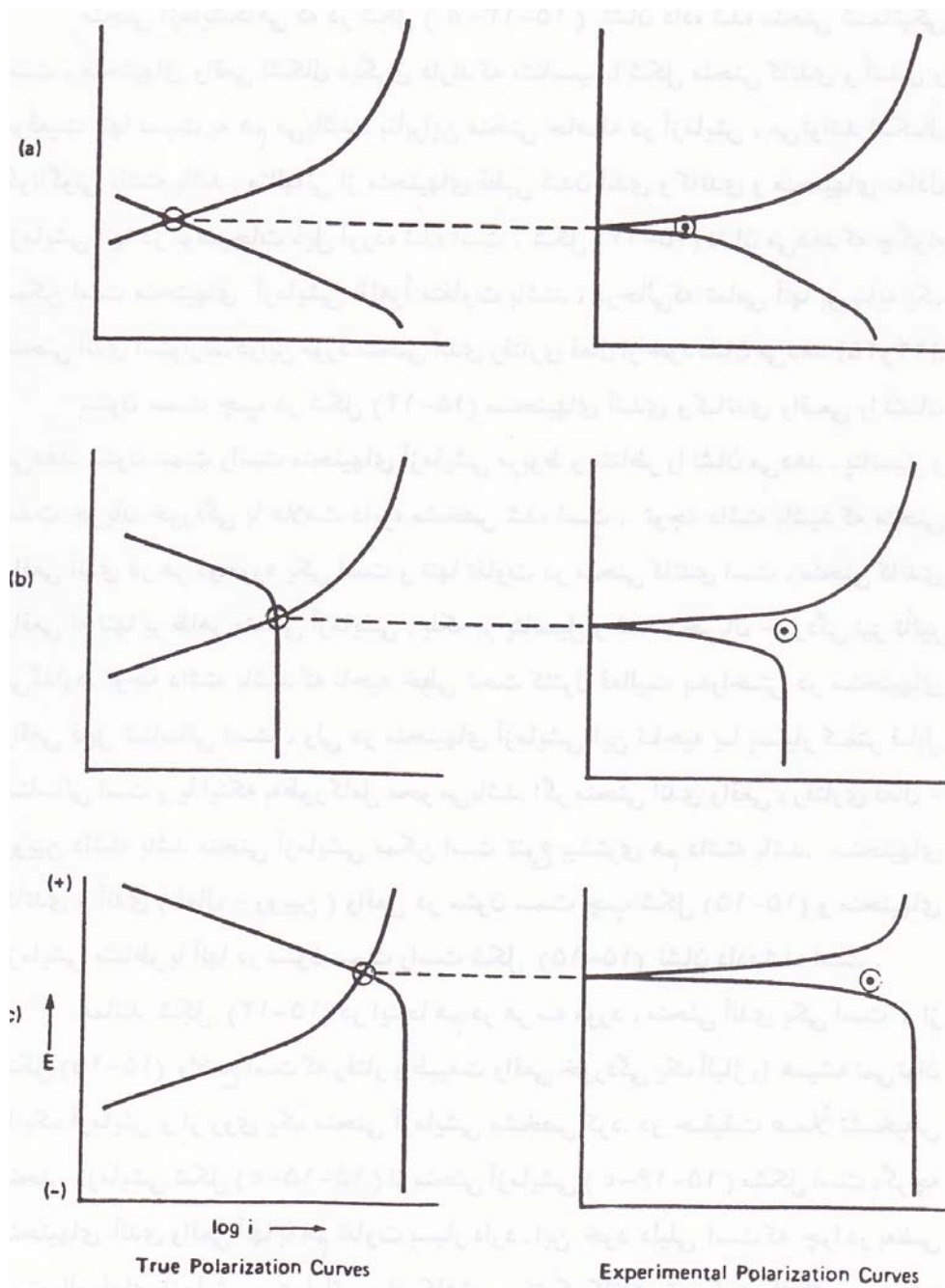
(۱۵-۱۵) و منحنیهای آزمایشی متناظر با آنها در ستون سمت راست شکل (۱۵-۱۵) نشان داده شده است .

همانند شکل (۱۵-۱۴) در اینجا هم در هر سه مورد ، منحنی آندی یکی است . از شکل (۱۵-۱۵) واضح است که رفتار و طبیعت واقعی خوردگی یک آلیاژ را همیشه نمی توان با یک آزمایش و از روی یک منحنی آزمایشی مشخص کرد . در حقیقت عملاً تشخیص منحنی آزمایشی شکل (۱۵-۱۵-۰) از منحنی آزمایشی

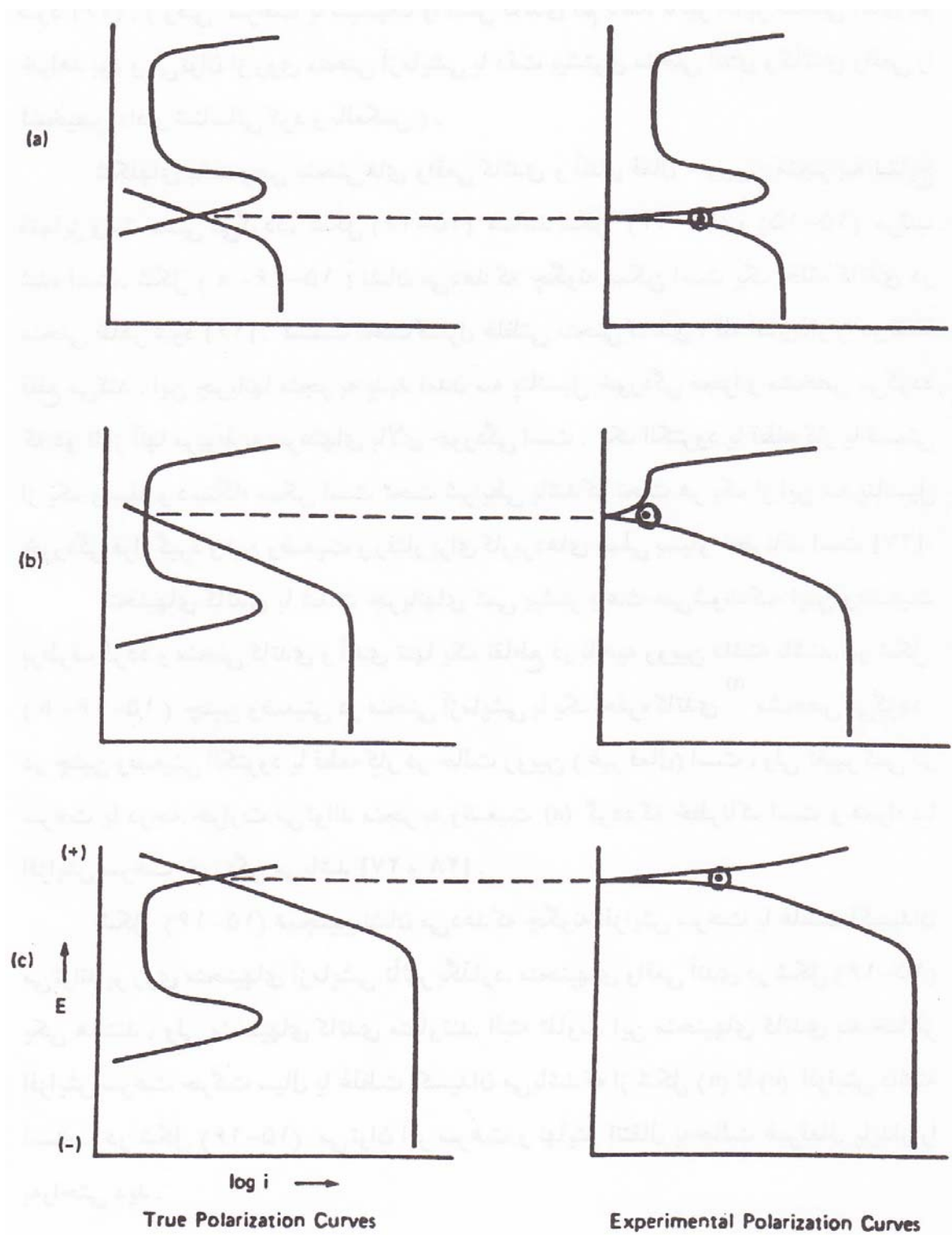
(۱۵-۱۶-۰) مشکل است ، گرچه منحنیهای آندی واقعی آنها با هم تفاوت بسیار دارد . این خود دلیلی است که چرا در بعضی دستورالعملهای آزمایشی ، عملیاتی برای کاهش سینتیک کاتدی توسط هوازدائی و دیگر روشها صورت می گیرد . اینگونه عملیات باعث می گردد که منحنی کاتدی پائین رود و کاهش پیدا کند (به سمت چپ سوق پیدا کند) و در نتیجه منحنی آندی به طور واضح نشان داده شود [۲۶] .

(وقتی سرعت یا سینتیک واکنش کاتدی کم باشد تأثیر آن بر منحنی آندی کم خواهد بود و می توان از روی منحنی آزمایشی با دقت بیشتری منحنی آندی و کاتدی واقعی را تشخیص داد و شناسائی کرد و بالعکس) .

شکلهای بخصوص منحنی های واقعی کاتدی و آندی فعال - رویین منجر به نتایج متمایز و مشخصی می گردد ، شکل (۱۵-۱۶) همانند شکل (۱۵-۱۴) و (۱۵-۱۵) مرتب شده است .



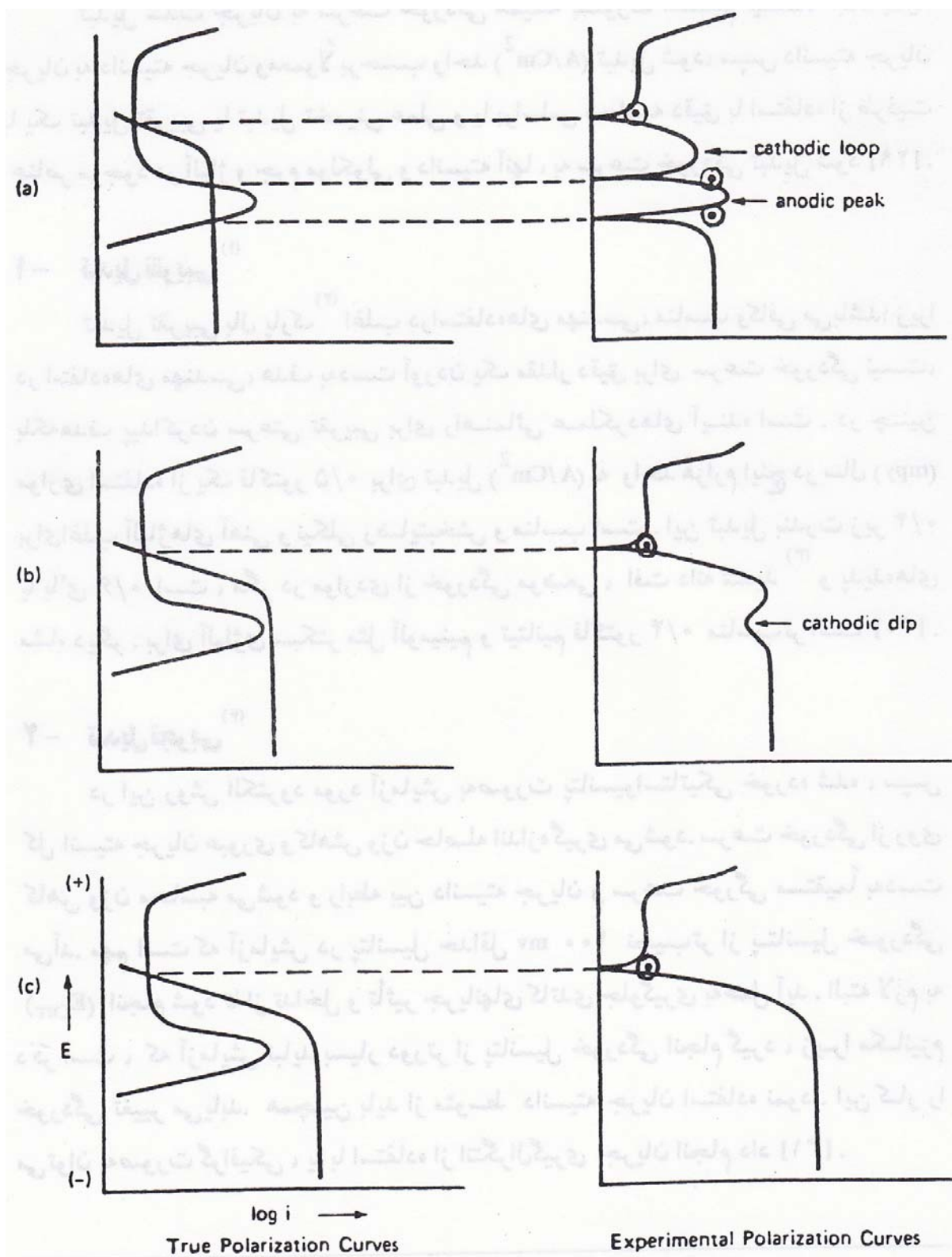
شکل ۱۴-۱۵: منحنيهای قطبی شدن بدست آمده از یک منحنی آندی ثابت و منحنی های کاتدی متفاوت



شکل ۱۵-۱۵: ترکیبهای مختلف منحنی های آندی (فعال - رویین) با منحنی کاتدی متفاوت

شکل (a-۱۶-۱۵) نشان می دهد که چگونه ممکن است یک حلقه کاتدی در منحنی ظاهر شود [۲۶]. قسمت تحت کنترل غلظتی منحنی کاتدی، قله آندی دار را در دو نقطه قطع می کند. این جریانها منجر به پدید آمدن سه پتانسیل خوردگی مجزا و مشخص می گردد که دو تا از آنها مربوط به سرعتهای بالای خوردگی است. یک الکتروود یا قطعه کار یا قسمتی از یک وسیله و دستگاه ممکن است تحت شرایطی باشد که تحت هریک از این سه پتانسیل خوردگی قرار گیرد و این وضعیت و رفتار برای کاربردهای عملی بسیار خطرناک است [۲۷]. منحنیهای کاتدی با شدت جریانهای کمی بیشتر باعث می شود که این وضعیت بر طرف گردد و منحنی کاتدی و آندی تنها یک تقاطع در ناحیه رویین داشته باشند. در شکل (b-۱۶-۱۵) چنین وضعیتی در منحنی آزمایشی با یک حفره کاتدی^(۱) مشخص می گردد. در چنین وضعیتی الکتروود یا قطعه کار در حالت رویین (غیر فعال) است، ولی تغییر کمی در سرعت یا درجه حرارت می تواند منجر به وضعیت (a) گردد که خطرناک است و همراه با افزایش سرعت خوردگی می باشد [۲۷ و ۲۸].

شکل (۱۶-۱۵) همچنین نشان می دهد که چگونه افزایش سرعت یا غلظت اکسیدان می تواند بر روی منحنیهای آزمایشی تأثیر بگذارد. منحنیهای واقعی آندی در شکل (۱۶-۱۵) یکی هستند، ولی منحنیهای کاتدی متفاوتند. البته تفاوت این منحنیهای کاتدی به خاطر افزایش سرعت حرکت سیال یا غلظت اکسیدان می باشد که از شکل (a) تا (c) افزایش داشته است. در شکل (۱۶-۱۵) می توان اثر سرعت و نهایتاً انتقال به حالت غیر فعال پایدار را به راحتی دید.



شکل ۱۵-۱۶: شکلهای مختلف منحنی های آندی (با رفتار فعال - رویین) و منحنی کاتدی

۲-۱-۴-۱۵ - تبدیل جریان به سرعت خوردگی

تبدیل شدت جریان به سرعت خوردگی همیشه بصورت مستقیم نیست . ابتدا باید جریان به دانسیته جریان و معمولاً برحسب واحد (A / Cm^2) تبدیل شود ، سپس دانسیته جریان با یک تبدیل تقریبی یا تبدیل تخمینی عملی و یا بر اساس محاسبه دقیق با استفاده از ظرفیت عناصر موجود در آلیاژ و جرم مولکولی و دانسیته آنها ، به سرعت خوردگی تبدیل شود . [۲۹]

۱ - تبدیل تقریبی^۱

تبدیل تقریبی بال پارک^۲ اغلب در استفاده های مهندسی ، مناسب و کافی می باشد ؛ زیرا در استفاده های مهندسی ، هدف به دست آوردن یک مقدار دقیق برای سرعت خوردگی نیست ، بلکه هدف پیدا کردن سرعتی تقریبی برای راهنمایی عملکردهای آینده است . در چنین مواردی استفاده از یک فاکتور ۰/۵ برای تبدیل (A / Cm^2) به واحد هزارم اینچ در سال (mpy) برای اغلب آلیاژهای آهنی و نیکی رضایتبخش و مناسب است . این تبدیل به ندرت زیر ۰/۴ یا بالای ۰/۶ است ، مگر در مواردی از خوردگی موضعی ، افت دانه شدید^۳ و پدیده های مشابه دیگر . برای آلیاژی سبکتر مثل آلومینیم و تیتانیم فاکتور ۰/۴ مناسب تر است . [۳۰]

^۱ Approximate conversion

^۲ Ball park

^۳ Grain – dropping

۲- تبدیل تجربی^۱

در این روش الکتروود مورد آزمایش به صورت پتانسیوآستاتیک خورده شده ، سپس کل دانسیته جریان عبوری و کاهش وزن حاصله اندازه گیری میشود . سرعت خوردگی از روی کاهش وزن محاسبه می شود و رابطه بین دانسیته جریان و سرعت خوردگی مستقیم به دست می آید و مهم است که آزمایش در پتانسیل حداقل ۱۰۰ mV نجیب تر از پتانسیل خوردگی (E_{corr}) انجام شود تا از تداخل و تأثیر جریانهای کاتدی جلوگیری به عمل آید . البته لازم به ذکر است که آزمایش نباید بسیار دورتر از پتانسیل خوردگی انجام گیرد ، زیرا مکانیزم خوردگی تغییر می یابد . همچنین باید از متوسط دانسیته جریان استفاده شود . این کار را می توان به صورت گرافیکی ، یا با استفاده از انتگرال گیری جریان انجام داد . [۳۱] .

روش تبدیل آزمایشگاهی بسیار سودمند و قابل اطمینان است ، زیرا در این روش فاکتور تبدیل عملاً از روی مسیر خوردگی و سرعت خوردگی محاسبه می شود . اگر طبیعت خوردگی تغییر یابد تبدیل آزمایش گاهی نیز ممکن است تغییر یابد [۳۱] .

۳ - فاکتور تبدیل محاسبه شده

تبدیل دانسیته جریان به سرعت خوردگی برای فلزات خالص قابل کاربرد است . البته این تبدیل برای آلیاژهای مختلف با در نظر گرفتن ظرفیتهای اجزای مختلف موجود در آلیاژ بکار می رود . رابطه اصلی به قرار زیر است [۳۲] .

^۱ Emprical conversion

(۷-۱۵)

$$m_{py} = \frac{1/24 \times 104 KJ}{D}$$

سرعت خوردگی بر حسب هزارم اینچ در سال $m_{py} =$

K = اکسی والان گرم الکتروشیمیائی آلیاژ یا گرم آلیاژ خورده شده یا رسوب کرده

D = چگالی آلیاژ بر حسب gr / Cm^3

دانشیته جریان بر حسب $j = \mu A / Cm^2$

دانشیته یک آلیاژ را می توان به راحتی به دست آورد و دانشیته جریان نیز با آزمایش به

دست می آید [۳۳]. اکسی والان الکتروشیمیائی یک آلیاژ برابر است با مجموع اکسی والان

الکتروشیمیائی اجزاء موجود در آلیاژ ضرب در درصد جزء مزبور. به طور مثال :

$$K_{\gamma. \epsilon} = 0.74 K_{Fe} + 0.19 K_{Cr} + 0.08 K_{Ni} \quad (8-15)$$

اکسی والان الکتروشیمیائی یک عنصر برابر است با تعداد گرم های مورد نیاز از آن عنصر که

برای عبور یک کولمب الکتریسیته لازم است .

$$k = \frac{w}{ZF} \quad (9-15)$$

W = جرم مولکولی عنصر

F = عدد فاراده برابر ۹۶۵۰۰ کولمب

Z = ظرفیت عنصر در محصولات خوردگی

مقادیر Z باید برای هر عنصر موجود در آلیاژ تخمین زده شود . محاسبه معکوس (رسیدن

از کاهش وزن به محاسبه Z) نشان داده است که مقدار تجربی Z به ندرت یک عدد صحیح

است . تجربیات نشان می دهند که درصد عناصر آلیاژی در محصولات خوردگی با درصد آنها در آلیاژ متناسب است ، ولی این قانون کلیت ندارد و همیشگی نیست . این واقعیتها نشان می دهند که محاسبه بسیار دقیق سرعت خوردگی از روی دانسیته جریان براساس ظرفیتهای تخمینی و حدس زده شده مشکل است [۳۳] .

۳-۱-۴-۱۵- برون یابی تافل^۱

خوردگی واکنشی الکتروشیمیائی بین فلز و محیط می باشد . هنگام وقوع خوردگی جریان بین آند و کاتدهای منفرد و کوچک به وجود می آید ، که سبب می شود پتانسیل الکتروود تغییر یابد هرچند که نمی توان این جریان را به طور مستقیم اندازه گیری کرد ، ولی توسط یک الکتروود خنثی و یک مدارالکتریکی خارجی به طور غیر مستقیم می توان آن را برآورد کرد [۳۳] . همانگونه که در بخشهای پیشین ذکر شد قطبی شدن عبارت است از میزان تغییر پتانسیل الکتروود از پتانسیل تعادلی اش توسط یک الکتروود دیگر و یا یک جفت گالوانیکی . برای آزمایشهای خوردگی و برای رسم این منحنیها از دستگاهی موسوم به پتانسیواستات^۲ که دارای سه الکتروود کاری^۳ ، مرجع^۴ و کمکی^۵ است استفاده می شود . الکتروود مرجع را عموماً الکتروود کالومل اشباع (SCE) ، الکتروود کمکی را از پلاتین و الکتروود کاری را از جنس فلز مورد آزمایش انتخاب می کنند ، جریان را بر حسب تغییرات

^۱ Tafel extrapolation

^۲ Potentiostat

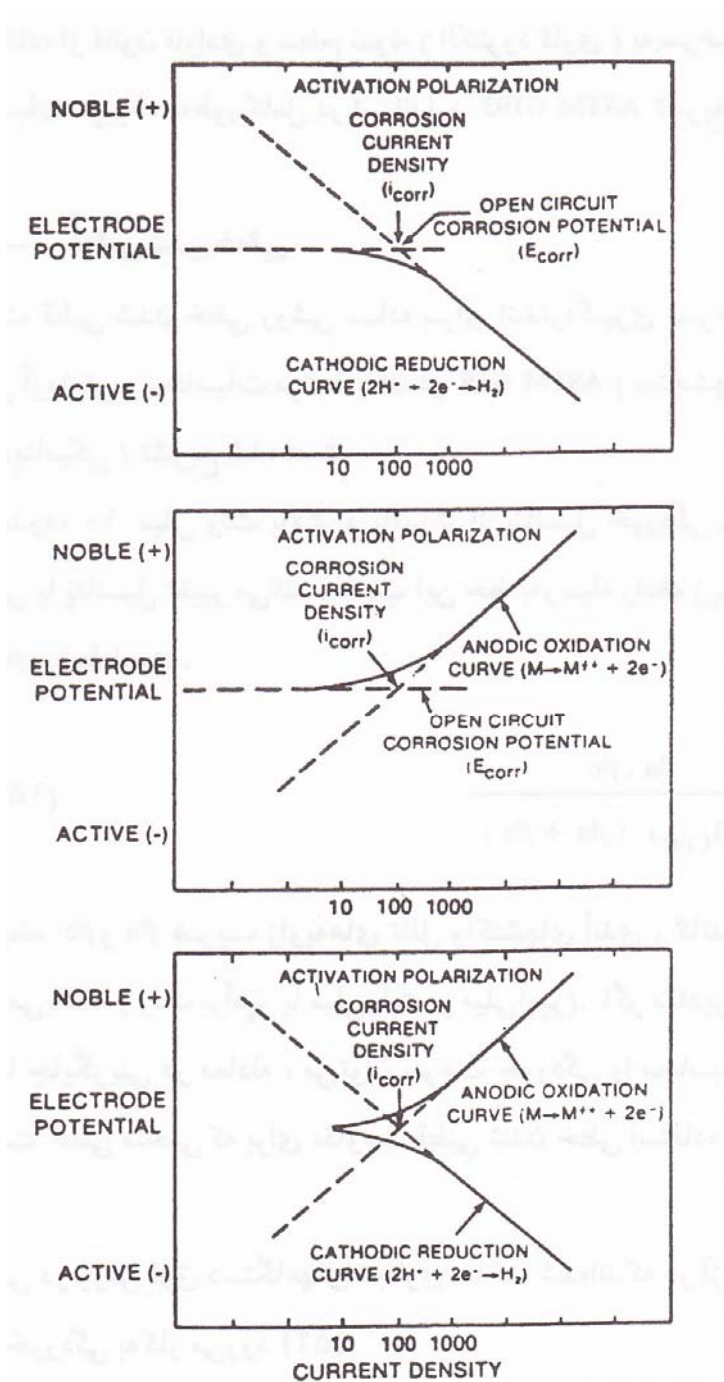
^۳ Working electrode

^۴ Reference electrode

^۵ Auxiliary electrode

منظم پتانسیل رسم کرده که منحنیهای بدست آمده مشابه شکل (۱۷-۱۵) می باشد [۳۳] و

[۳۴].



شکل ۱۷-۱۵: منحنی قطبی شدن واقعی و سه طریقه از رسم امتداد قسمت خطی برای پیدا کردن I_{Corr}

منحنیهای فوق در قسمتی موسوم به ناحیه تافل ، خطی می شوند که با بیرون یابی آنها و تقاطع دو خط آندی و کاتدی ، جریان خوردگی به دست می آید (I_{Corr}) . جریان خوردگی حاصله با استفاده از قانون فارادی و سطح نمونه (الکتروود کاری) به سرعت خوردگی تبدیل می شود . محاسبات مربوط به طور کامل در استاندارد ASTM G102 تشریح شده است .

۴-۱-۴-۱۵- قطبی شدن خطی

مقاومت قطبی شدن خطی روشی ساده برای اندازه گیری سرعت های خوردگی می باشد . روش آزمایش و محاسبات مرتبط با آن در ASTM G59 (سنجشهای مقاومت قطبی شدن پتانسیودینامیکی) تشریح شده است .

در محدوده ۱۰ میلی ولت بالاتر و پائین تر از پتانسیل خوردگی ، دانسیته جریان به صورت خطی با پتانسیل تغییر می کند . شیب این خط به وسیله رابطه زیر با پارامترهایی از قبیل βa و βc مرتبط است.

(۱۵-۱۰)

$$\frac{\Delta E}{\Delta i_{app}} = \frac{\beta a \cdot \beta c}{2.3(I_{corr})(\beta a + \beta c)}$$

که در این رابطه βa و βc ضریب زاویه های تافل واکنشهای آندی و کاتدی هستند .

واحد $\frac{\Delta E}{\Delta i_{app}}$ اهم می باشد (ولت بر آمپر یا میلی ولت بر میلی آمپر) . اگر مقادیر βc

و βa واکنش معلوم باشند با جایگزینی در معادله ، می توان سرعت خوردگی را محاسبه

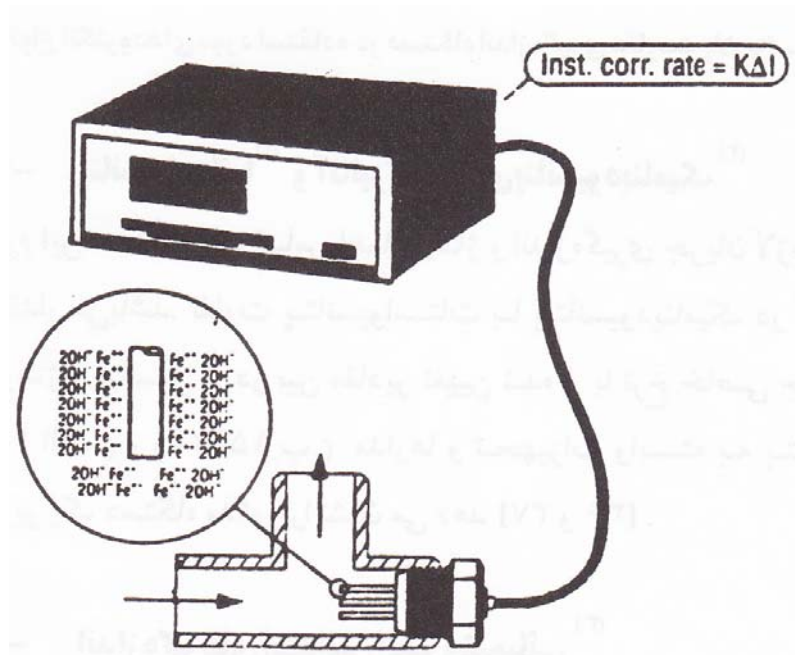
نمود . در شکل (۲-۱۵) قسمت خطی منحنی که برای مقاومت قطبی شدن خطی استفاده می شود، نشان داده شده است .

بر اساس دو روش فوق دستگاههای تجاری ساخته شده اند که در آزمایشگاه و صنعت برای دیدبانی خوردگی به کار می رود [۵۲] .

— دستگاههای اندازه گیری مقاومت قطبی شدن خطی^۱

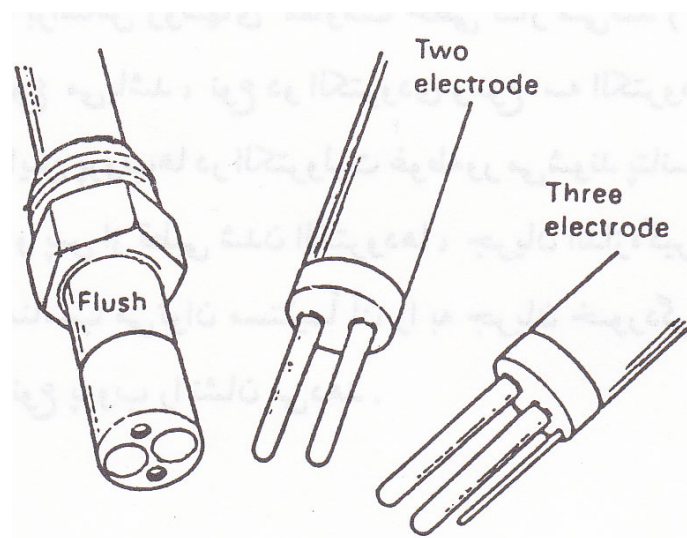
این دستگاه بر اساس روشهای مقاومت خطی کار می کند (شکل ۱۸-۱۵) . این دستگاه دارای دو نوع می باشد ، نوع دو الکترودی و نوع سه الکترودی . هنگامی که این پروب ها در الکترولیت غوطه ور می شوند پتانسیلی حدود $20-10\text{ mV}$ بر آن اعمال می کنند پس از قطبی شدن الکترودها ، جریان اندازه گیری می شود . این جریان را با کالبراسیون مناسب می توان مستقیماً آن را به جریان خوردگی تبدیل کرد . شکل (۱۹-۱۵) این دو نوع پروب را نشان می دهد.

^۱ Linear polarization Resistance



شکل ۱۸-۱۵: دستگاه اندازه گیری مقاومت پلاریزاسیون خطی (LPR)

دستگاههای فوق در صنعت به خوردگی سنج^۱ که نامی تجاری است موسومند



شکل ۱۹-۱۵: انواع الکترودهای مورد استفاده در دستگاه اندازه گیری مقاومت پلاریزاسیون خطی (LPR)

^۱ Corrator

۵-۱-۴-۱۵ - پتانسیواستاتها^۱ و آنالیز کننده های پتانسیودینامیک^۲

مکانیزم این دستگاهها بر اساس اعمال ولتاژ و اندازه گیری جریان لازم برای نگهداری ولتاژ در آن مقدار می باشد . تفاوت پتانسیواستات با پتانسیودینامیک در آن است که در دستگاه دوم ولتاژ (پتانسیل) در بین مقادیر تغیین شده ، با نرخ خاصی جاروب می شود . شکل (۱۵-۲۰ الف) و (۱۵-۲۰ ب) مدارها و تجهیزات وابسته به پتانسیواستات و هم چنین تصویر یک دستگاه مذکور را نشان می دهد [۳۶ و ۳۷] .

۶-۱-۴-۱۵ - اندازه گیری های امپدانس الکتروشیمیائی^۳

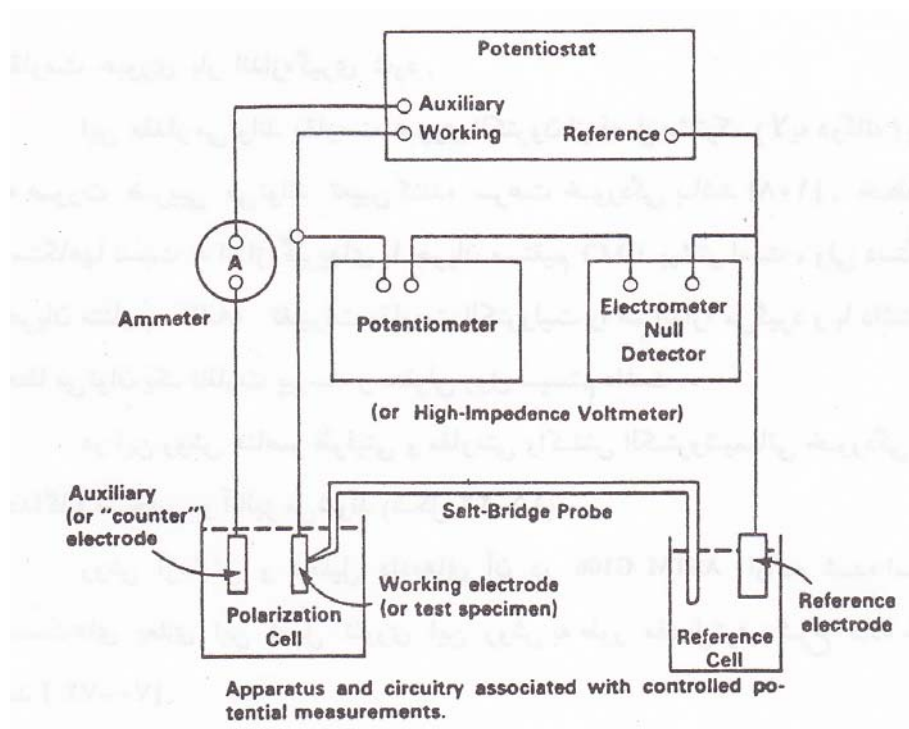
این روش که بر اساس امپدانس جریان متناوب (A.C) کار می کند با توسعه روش LPRM ابداع شده است . اندازه گیری به این صورت است که با انتخاب یک فرکانس ، میزان مقاومت عبوری بار اندازه گیری شود .

این مقدار می تواند مقاومت عبوری الکترون از فصل مشترک (لایه دوگانه) باشد که به صورت ضربی می تواند تعیین کننده سرعت خوردگی باشد [۱۰۸] . خطای این دستگاهها نسبت به اندازه گیریهای با جریان مستقیم (D.C) بیشتر است ، ولی دستگاههای جریان متناوب (A.C) تغییرات مقاومت الکترولیت را هم اندازه می گیرد و با داشتن منابع خطا می توان یک نظارت پیوسته و معقولی روی سیستم داشت .

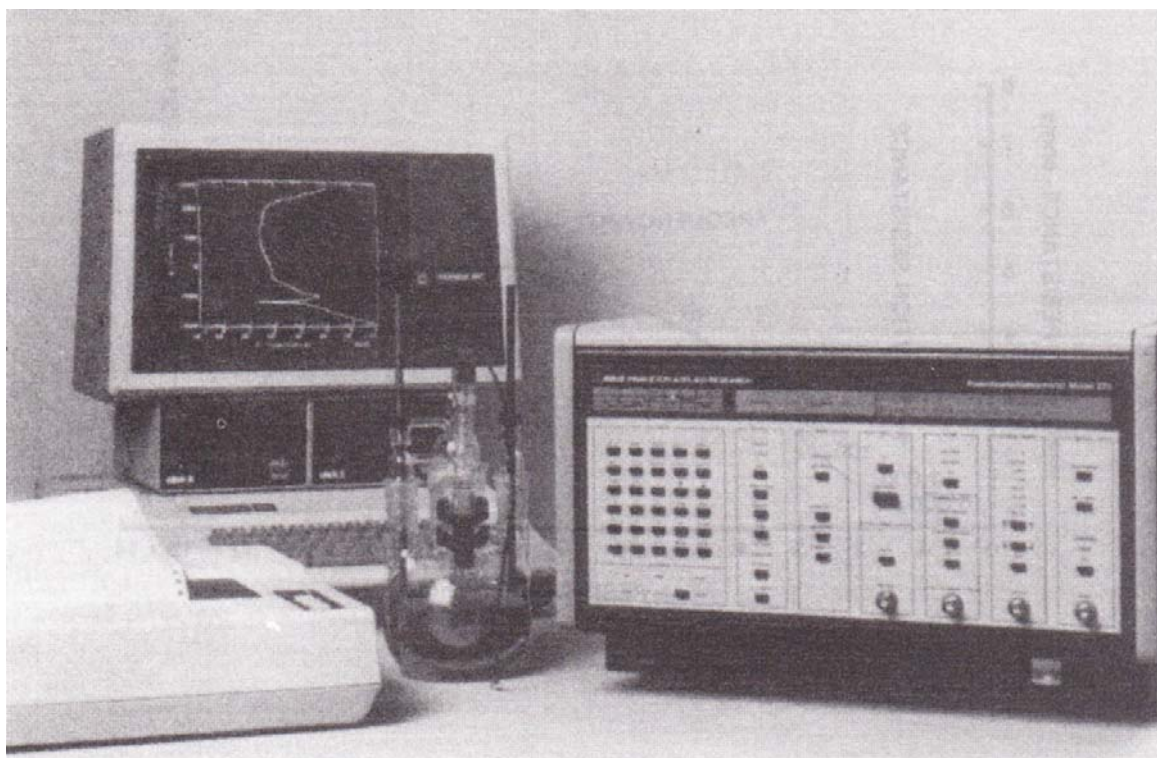
^۱ Potentiostat

^۲ Potentiodynamic

^۳ Electrochemical impedance technique

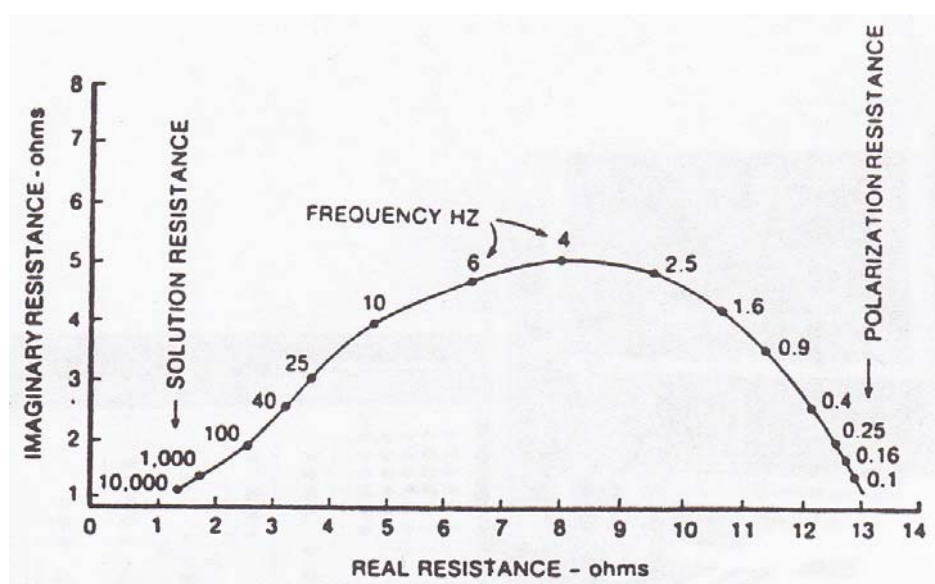


شکل ۲۰-۱۵ الف : دستگاه پتانسیواستات به همراه مدارها و تجهیزات مربوطه برای کنترل پتانسیل الکترودها

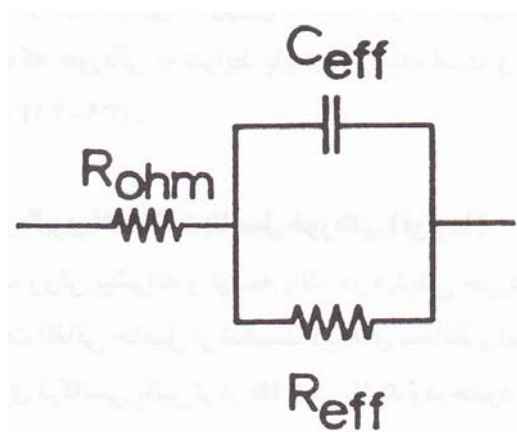


شکل ۲۰-۱۵ ب : تصویری از یک دستگاه پتانسیواستات و A.C امپدانس با ملحقات آن [۱۱۷]

در این روش عناصر ظرفیتی و مقاومتی واکنش الکتروشیمیایی خوردگی به طور جداگانه مشخص و آنالیز می شوند (شکل ۲۲-۱۵). روش آزمایش و تحلیل داده های آن در ASTM G۱۰۶ ارائه شده است. در قسمت های بعدی این فصل تئوری این روش به طور مفصل تری شرح داده خواهد شد [۷۴-۷۰].



شکل ۲۱-۱۵: یک نمونه واقعی از داده های امپدانس A.C



شکل ۲۲-۱۵: تجزیه مدار یک پیل امپدانس A.C به اجزاء مقاومتی

۷-۱-۴-۱۵ آزمون پتانسیل خوردگی بر حسب زمان

آزمون پتانسیل خوردگی بر حسب زمان ($E - t$) یک آزمایش ساده است که طی آن پتانسیل خوردگی یک الکتروود که به طور آزاد در حال خورده شدن است، نسبت به زمان ثبت می گردد. در این آزمایش از یک الکتروود مرجع و یک ولت متر با مقاومت بالا استفاده می شود. گرچه این آزمون اصولاً ساده است و اجرای آن نیز آسان است، ولی اطلاعات به دست آمده از آن بسیار مهم است و می توان ما را در انجام صحیح و نتیجه گیری صحیح آزمونهای بعدی راهنمایی کند.

این آزمایش در محلولی انجام می شود که حتی الامکان مشابه محلول و وضعیت و شرایط واقعی سرویس باشد، تا پتانسیل خوردگی اندازه گیری شده حتی الامکان نزدیک به واقعیت باشد. بر اساس مشکلات ویژه ای که ممکن است وجود داشته باشد، اندازه گیری پتانسیل خوردگی را می توان در محل و در روی خود وسیله در محل کار انجام داد. عواملی که در آزمایشگاه باید به آن توجه شود، عبارتند از: شبیه سازی دقیق آلودگیهای محلول، میزان هوا دهی و درجه حرارت محلول و سرعت محلول.

ساده ترین و ترجیحی ترین رفتار، آن است که پتانسیل به سرعت به یک مقدار ثابت و پایدار^۱ برسد.

چنین رفتاری شاخص سیستمهایی است که خوردگی در آنها با محلول ساده صورت می گیرد، یا در سیستمهایی که روپین شدن به سرعت صورت می گیرد. تعادل سریع نشان

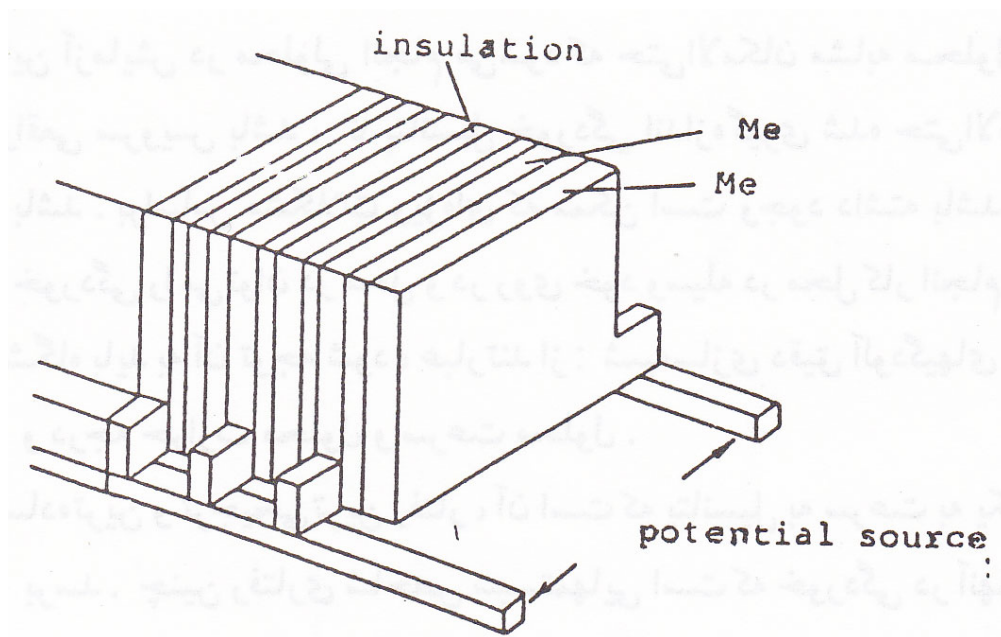
^۱ Steady state

دهنده آن است که خوردگی به شرایط پایداری رسیده است و تغییرات غیر منتظره و سریع نخواهد داشت [۴۱-۳۹].

۸-۱-۴-۱۵ اندازه گیری اغتشاشات پتانسیل خوردگی (نویزها)

این روش یک روش پیشرفته و توسعه یافته در دیدبانی خوردگی می باشد که براساس اندازه گیری اغتشاشات اتفاقی حاصل از شکست لایه های محافظ و انحلال موضعی فلز است. این اغتشاشات، دارای فرکانسی پائین تر از 1 Hz می باشند و در حدود میلی متر یا میکروولت می باشند. با افزایش فرکانس، دامنه کاهش می یابد. طبق نظریه الکتروشیمیائی این تغییرات نشانگر وقوع فرایند انحلال مواد در سطح فلز هستند. از شکل و نوع اغتشاشات می توان سرعت خوردگی را تعیین کرد. بهترین مورد استفاده این روش فرایندهایی است که شکست لایه رویین و یا حفره دار شدن عامل اصلی خوردگی می باشد. این روش بهترین مورد استفاده را دارد، لذا این روش می تواند ناحیه ای از لایه رویین را که دارای حفره می باشد، مشخص کند.

دستگاه اندازه گیری اغتشاشات پتانسیل، دارای دو جزء در یک پروب است که یکی از آنها بعنوان الکتروود مرجع عمل می کند و دیگری فلزی است که خورده می شود. یک نوع از پروب های بکار رفته در این دستگاهها به طور شماتیک در شکل (۲۳-۱۵) نشان داده شده است [۴۴-۴۱].



شکل ۲۳-۱۵: یک پروب اندازه گیری اغتشاشات الکتروشیمیایی

۹-۱-۴-۱۵ زوج گالوانیکی

زوج گالوانیکی یک روش مناسب برای بررسی خوردگی بین دو فلز مختلف می باشد . سیستم دارای یک آمپر سنج با مقاومت الکتریکی صفر (ZRA) برای محاسبه جریان D . C در اثر اتصال دو نمونه است . علاوه بر جریان D . C می توان اغتشاشات جریان را ، مانند حالت اندازه گیری اغتشاشات پتانسیل خوردگی ، اندازه گرفت که بیشتر برای خوردگی های موضعی به کار می رود .

آنچه در بالا تحت عناوین مختلف توضیح داده شده ، تعدادی از روشهای الکتروشیمیائی است که برای نظارت مستقیم مورد استفاده قرار می گیرد . اطلاعات بدست آمده باید با نتایج دیگر روشها مقایسه شده تا بتوان یک برداشت صحیح را از سیستم داشت [۴۴] .

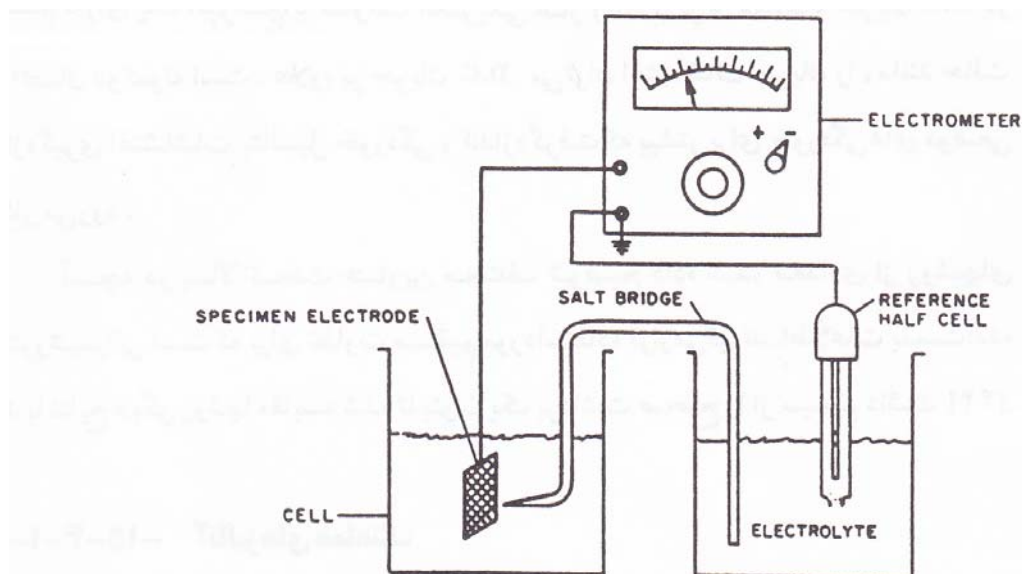
۱۰-۱-۴-۱۵ آنالیزهای هماهنگ

یک روش اندازه گیری امپدانس توسعه یافته است و به طور همزمان ، میزان مقاومت عبوری بار و پارامتر β را محاسبه می کند . این روش توسط یک دستگاه تحقیقاتی کار می کند که به طور دیجیتالی فرکانسهای جواب دهنده یا تجزیه گر اسپکترومی^۱ روی صفحات میکرو کامپیوتر نشان می دهد و مقدار سرعت خوردگی را بدون در نظر گرفتن ثابت رابطه استرن - گری^۲ (β) به ما ارائه می دهد [۴۴].

۱۱-۱-۴-۱۵ اندازه گیری پتانسیل خوردگی (E_{corr})

این روش برای پیش بینی حالت خوردگی قسمتهای مختلف سازه ای که در محیط آبی غوطه ور است به کار می رود . دستگاه ساده ای که در شکل (۲۴-۱۵) آمده است نمای کلی از آن است که شامل یک میلی ولت متر با یک ورودی امپدانس بالا (مقاومت بالا) برای جلوگیری از عبور جریان در طی اندازه گیری و یک الکتروود مرجع (کالومل اشباع ، مس / سولفات مس ، نقره / کلرید نقره یا فلز / اکسید فلز که بتواند پتانسیل پایداری را نشان دهد) می باشد [۴۵] .

^۱ Spectrum
^۲ Stern - Geary



NOTE—The electrode potential of specimen is negative as shown.

شکل ۲۴-۱۵: شمائی از روش اندازه گیری پتانسیل خوردگی

۵-۱۵- سایر روشهای اندازه گیری خوردگی در آزمایشگاه و صنعت

قبل از بحث پیرامون سایر روشهای دیدبانی، باید به انتخاب نقطه دیدبانی اشاره نمود که پارامتر بسیار مهمی است و بر اساس شرایط فرآیند، مواد ساختمانی موجود در سیستم و شرایط هندسی سیستم و عوامل بیرونی انتخاب می گردد.

در این بخش، روش هایی مورد بحث قرار می گیرند که به طور عمومی نمی توان آنها را در رده روشهای غیر مخرب یا روشهای الکترو شیمیایی دسته بندی کرد. این روشها عبارتند از:

۱-۵-۱۵ بازرسی چشمی^۱

این روش ساده ترین و کم هزینه ترین روش دیدبانی است که عموماً توجه چندانی به آن نمی شود. در صورتی که می تواند اطلاعات بسیار مفیدی را از سیستمی که مشکل خوردگی در آن وجود دارد ارائه دهد. به عنوان مثال: نشستی ها، تغییر رنگ، ترک دار شدن، مسدود شدن و... را می توان با بازرسی چشمی کنترل کرد.

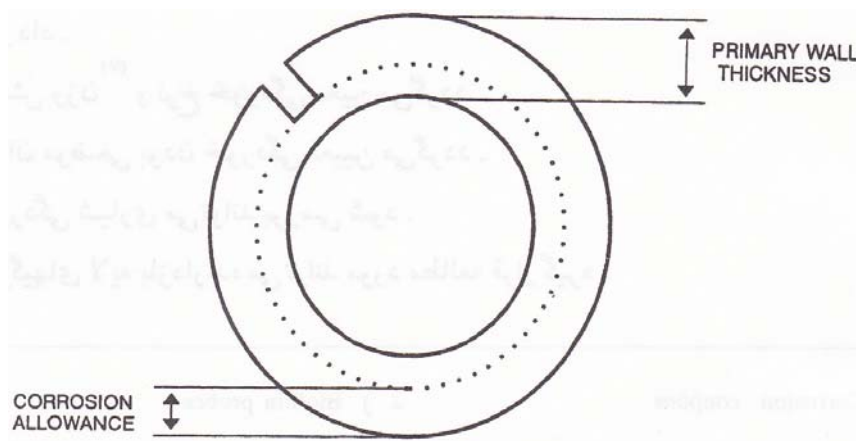
در این روش می توان از ذره بین، وسایل اندازه گیری، ضخامت سنج، بروسکوپها، فیبرهای نوری و حتی دوربین های کوچک جهت تصویر برداری استفاده کرد. هر کدام از این روشها می توانند اطلاعات جداگانه ای را ارائه دهند و به دلیل آنکه عموماً هیچ تغییری در دستگاهها و ساختمان آنها در این روش اعمال نمی شود، می توان این روش را در رده روشهای غیر مخرب نیز دسته بندی کرد.

۲-۵-۱۵ روزنه های نگهبانی^۲

در اغلب واحدهای فرآیندی مثل لوله های فولاد کربنی که حامل مواد خورنده یا ساینده هستند، باتعبیه سوراخی که به ضخامت مجاز لوله برسد می توان با مشاهده نشستی به میزان خوردگی واحد پی برد (شکل ۲۵-۱۵). باید توجه کرد که این روش دارای محدودیتهای زیادی است و فقط در مکانهای محدودی که نشستی، سلامت و ایمنی افراد و یا سایر دستگاهها را در معرض خطر قرار ندهد می توان از آن استفاده کرد.

^۱ Visual inspection

^۲ Sentry holes



شکل ۲۵-۱۵: روزنه نگهبانی (مقطع یک لوله)

۳-۵-۱۵ کوپن های خوردگی^۱

کوپنها قطعاتی فلزی هستند که برای مدت زمان معینی در معرض محیط خورنده واقعی قرار می گیرند و یکی از قدیمی ترین روشهای دیدبانی خوردگی می باشد. کوپنها از نظر فیزیکی، ترکیب شیمیائی و ساختمان متالورژیکی دقیقاً باید از جنس لوله، مخزن یا دستگاه مورد مطالعه انتخاب شوند، بسته به موارد فوق الذکر کوپنها اشکال مختلفی دارند که عبارتند از [۵۰-۴۵].

الف - نوارها

ب - دیسک ها

ج - پروب های بایوفیلیم^۲

د - حلقه هایی از لوله های سوراخ دار^۳

ه - کوپن با تنش اعمالی^۱

^۱ Corrosion coupons

^۲ Biofilm probes

^۳ Drill pipe rings

و - کوپن با تنشهای باقیمانده^۲

کوپن گذاری به دلیل سابقه طولانی آن ، روش شناخته شده ای می باشد و محدودیتها و

مزایای آن کاملاً شناخته شده است . مزایای روشن کوپن گذاری عبارتند از : [۴۶] :

الف- تفسیر چشمی^۳ : با مشاهده کوپن ها می توان اطلاعات زیادی را در مورد چگونگی و

نوع محصولات خوردگی به دست آورد.

ب- رسوب ها را می توان مشاهده و تجزیه کرد و تأثیر آنها را بر روند خوردگی مورد

مطالعه قرار داد.

ج- کاهش وزن^۴ و نرخ خوردگی معین می گردد .

د- میزان موضعی بودن خوردگی تعیین می گردد .

ه- خوردگی شیاری میتواند بررسی شود .

و- ویژگی لایه باز دارنده میتواند مورد مطالعه قرار گیرد .

ن- تأثیر تنش بر روی اجزا را می توان بررسی کرد .

شکل (۲۶-۱۵) یک دستگاه نگهدارنده کوپنها را که برای آزمایش خوردگی درتانکها به کار

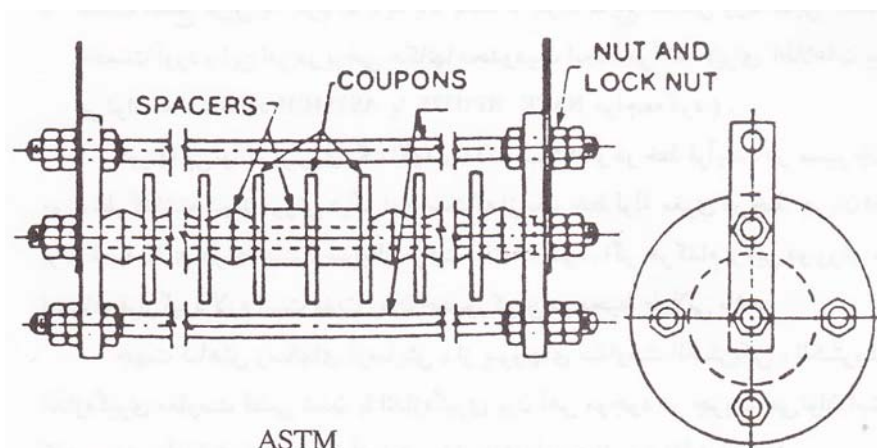
می رود را نشان می دهد .

^۱ Coupon with applied stress

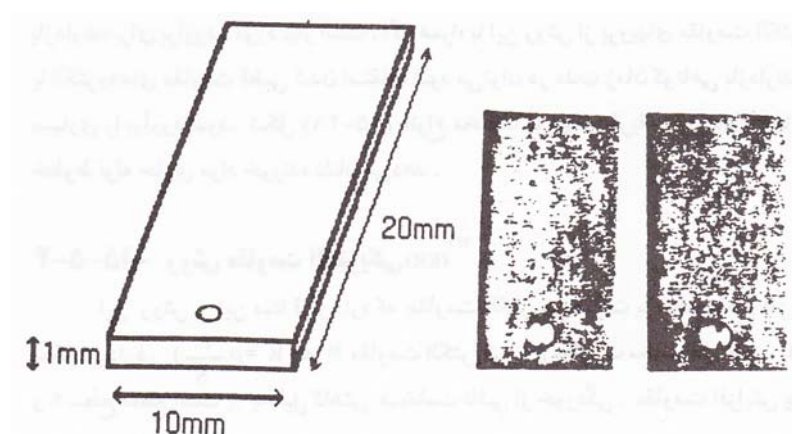
^۲ Coupon with residual stress

^۳ Visual interpretation

^۴ Weight loss



شکل ۲۶-۱۵: کوپنهایی که برای آزمایش خوردگی در تانکها یا مخازن و غیره به کار می رود.



شکل (۲۷-۱۵) نیز کوپنهای کاهش وزن

کوپن گذاری دارای محدودیتهایی نیز می باشد که باید مورد توجه قرار گیرند . مدت زمان کوپن گذاری باید کاملاً مشخص باشد . این زمان تقریباً بین چند هفته تا ۳ ماه متغیر است . در صورت کم بودن زمان ، نتایج قابل اندازه گیری نیستند و از طرف دیگر در صورت طولانی شدن زمان ، در نتایج حاصله خطا ایجاد می شود .

نسبت سطح کوپن به جرم آن باید بالا باشد تا بتوان نتایج کاهش وزن قابل اعتمادی به دست آورد و این امر در برخی مکانها محدودیت ایجاد کرد. (برای اطلاعات بیشتر می توان به استاندارد ASTMGH یا NACE RPOV^۵ مراجعه کرد).

کوپنها می توانند بر روی یک نگهدارنده نصب شده و در خط فرایند ، در مسیر جریان مورد نظر گذاشته شود . روش دیگر این است که از یک خط لوله مغزی در خط جریان اصلی برای شبیه سازی هرچه بیشتر شرایط سرعت استفاده شود . اگر هر کدام از این دو روش مورد استفاده قرار گیرد لازم است مدت زمان حضور کوپن در محیط طولانی باشد .

جهت کاهش زمانهای آزمایش ، از پروبهای مقاومت الکتریکی الکترودهای اندازه گیری مقاومت قطبی شدن یا اندازه گیری یون آهن موجود در جریان می توان استفاده کرد . چنین آزمایشهایی ، زمان آزمایش را از هفته ها به چند روز تقلیل می دهد .

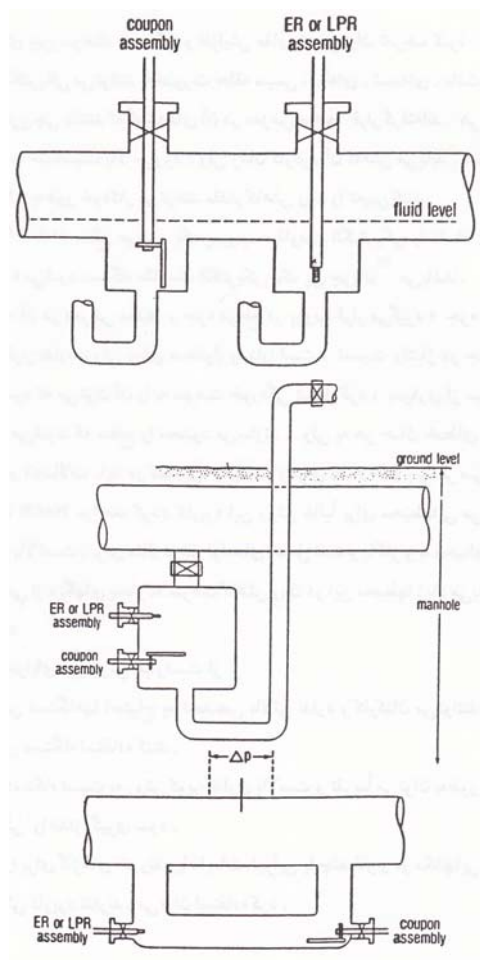
یک روش دیگر استفاده از جریان جانبی^۱ خطوط فرآیند واقعی است . در این روش مقادیر کمی از سیال واقعی از روی نمونه فلزی عبور داده می شود . به این ترتیب مقادیر کمی بازدارنده برای برآورد ، مورد نیاز است . اگر همراه با این روش از پروبهای مقاومت الکتریکی یا الکترودهای مقاومت قطبی شدن استفاده شود می توان در مدت زمان کوتاهی بازدارنده های بسیاری را برآورد نمود . شکل (۲۸-۱۵) انواع مختلف کوپنها و طریقه دادن آنها را در خطوط لوله حاوی مواد خورنده نشان می دهد .

^۱ Slip stream off

۴-۵-۱۵- روش مقاومت الکتریکی (ER)^۱

این روش بر این مبنا قرار دارد که مقاومت الکتریکی فلزات با سطح مقطع فلز رابطه معکوس دارد. $R = \rho \frac{L}{S}$ که R مقاومت الکتریکی، ρ مقاومت مخصوص فلز، L طول و S سطح مقطع است. به دلیل کاهش ضخامت ناشی از خوردگی، مقاومت افزایش یافته. در نتیجه رابطه ای بین سرعت خوردگی و افزایش مقاومت می توان تعریف کرد. پروبهای روش مقاومت الکتریکی می توانند به صورت حلقه سیمی، لوله ای، تسمه ای، مانع شده یا به صورت تسمه مارپیچی باشند که گوشه های آن در معرض محیط قرار گرفته اند. هرچه سطح مقطع نازکتر باشد حساسیت بالا می رود، ولی زمان کارکرد آن کاهش می یابد. دستگاههای مقاومت الکتریکی به طور خودکار می توانند مقدار کاهش وزن را تعیین کنند.

^۱ Electrical Resistance



شکل ۲۸-۱۵: انواع مختلف کوپن ها و طریقه قرار دادن آنها در لوله های حاوی محلول های خورنده

شکل (۲۹-۱۵) مقطع عرضی یک پروب مقاومت الکتریکی را نشان می دهد ، همان طور که

دیده می شود دستگاه مقاومت الکتریکی یک پل جریان^۱ می باشد .

یک جزء آن در معرض محیط و جزء مرجع در پروب قرار می گیرد ؛ جزء مرجع در معرض

محلول قرار ندارند ، ولی دمای محلول را دارا است . نسبت ولتاژ دو جزء پل ، اندازه گیری

می شود که می توان آن را به سرعت خوردگی تبدیل کرد ، بسیاری از سیستمها به گونه

^۱ Bridge circuit

ای طراحی می شوند که سطح را محدود می سازند ، ولی به هر حال خطای ناشی از مقاومت سیم ها و اتصالات باید در کمترین حد باشد . (برای اطلاعات بیشتر می توان به استاندارد ۳۰۱۷۰ NACE مراجعه کرد) . کاربرد این روش غالباً برای محیطهایی می باشد که خوردگی محیط بالا است ، برای مثال داخل لوله های حامل نفت و یا گاز و یا محیطهایی نظیر مسیر دود خروجی از دیگهای بخار که سرعت کاهش وزن در این محیطها زیاد می باشد ، این روش کاربرد دارد .

از جمله مزایای این روش عبارتست از :

۱- استفاده از این دستگاهها احتیاج به تخصص بالائی ندارد و کارکنان می توانند با کمی آموزش از این دستگاه استفاده کنند .

۲- سرعت این دستگاه نسبت به روش کوپن گذاری بالاست و تقریباً می توان به طور مداوم^۱ مقدار خوردگی را اندازه گیری نمود .

۳- این دستگاه را برای گازهای خوردنده یا مایعات غیر آبی یا چند فاز و در مکان هایی که روش الکتروشیمیائی کاربرد ندارند ، می توان استفاده کرد .

۴- هزینه نصب و بهره برداری دستگاههای نسبتاً کم است .

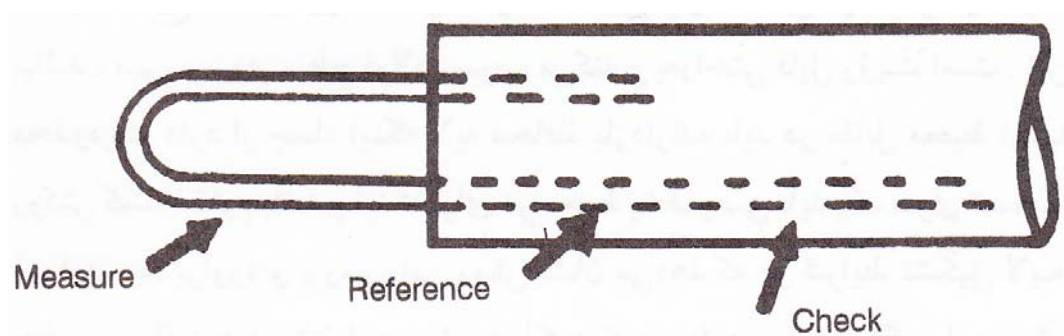
در مقابل این مزیتها ، محدودیتهایی نیز وجود دارد ، از آن جمله :

اطلاعات حاصله از این روش بسیار محدود است و فقط داده ها قابل تبدیل به کاهش وزن هستند .

^۱ On – line

در صورتی که رسوب ها و محصولات خوردگی دارای هدایت الکتریکی باشند ، در نتایج ، خطا حاصل خواهد شد .

وجود خوردگی حفره ای به شدت در نتایج کاهش وزن ، خطا ایجاد می کند [۵۱] .



شکل ۲۹-۱۵ : مقطع عرضی یک ER

۵-۵-۱۵ الیسومتری^۱

یکی از روشهای نسبتاً جدید در برآورد بازدارنده ها ، اندازه گیری مستقیم ضخامت لایه روی سطح فلز با استفاده از روش الیسومتری است . این روش یک روش نوری است که در آن از تغییر ماهیت و کیفیت اشعه نور قطبی شده که از سطح یک فلز بازتابیده می شود ، برای اندازه گیری ضخامت لایه استفاده می شود . دستگاه دقیق و حساسی برای تولید و اندازه گیری اشعه نوری بازتابی احتیاج است . شرایط سطحی نیز بحرانی و حساس است . اگر چه این روش ابزار جالبی برای مطالعات مکانیزم تشکیل لایه سطحی فلزات در

^۱ Elipsometry

آزمایشگاه است ، ولی روش سریعی برای برآورد باز دارنده ها در آزمایشگاه و در عمل نیست .

روش الیپسومتری روشی حساس و دقیق است ، ولی لوازم و تجهیزات مورد نیاز آن باعث شده تا این روش محدود به استفاده های آزمایشگاهی و مطالعات تئوری مکانیزم تشکیل لایه باشد [۵۱] .

۶-۵-۱۵- آزمون جابجایی یون مس

آزمایش جابجایی یون مس ، روش دیگری است که به طور مستقیم اثر تشکیل لایه محافظ توسط بازدارنده را اندازه گیری می کند . در این روش کوپن های فولادی درون محلول حاوی بازدارنده غوطه ور می شوند تا لایه حفاظتی بر روی آنها تشکیل شود . سپس کوپن از محلول خارج شده و درون محلول سولفات مس قرار داده می شود . اگر لایه بازدارنده محافظ نباشد ، مس بر روی سطح فولاد رسوب می کند و به راحتی قابل رؤیت است . این روش چند محدودیت دارد از جمله اینکه لایه محافظ بازدارنده باید در مقابل محیط اسیدی محلول روکش کننده مقاوم باشد و اینکه برای هر محیط بخصوصی باید یک سری تصحیحات در نظر گرفته شود . برآورد و بررسی این روش نشان می دهد که در شرایط تشکیل لایه قوی و در حضور سولفید هیدروژن این روش عملکرد خوبی دارد ، ولی عملکرد این روش در حضور دی اکسیدکربن چندان مناسب نیست . این روش به عنوان روشی

جهت برآورد دوام^۱ بازدارنده ها در آزمایشگاه به کار می رود . از آنجایی که این روش کاربردی است می تواند ابزار مفیدی در بررسیهای میدانی^۲ بازدارنده ها محسوب شود [۵۲].

۷-۵-۱۵ - استفاده از اتمها و ملکول های رادیو فعال^۳

در این روش برای شناسایی کیفی لایه جذب شده به سطح فلز ، بازدارنده مورد استفاده و یا سطح فلز را رادیو فعال می کنند که پس از مدت زمان معلوم پس از عکسبرداری از این اتمها یا ملکولها روی لایه عکاسی اثر گذاشته و تصویری از نواحی که آن را پوشانده اند ، به دست می آید . این روش ، کیفی است و می تواند برای مطالعات آزمایشگاهی مفید باشد . در عمل نیز ملکولهای رادیو فعال مزبور می تواند ابزار مفیدی در بررسی های میدانی باشد.

این روش برای اندازه گیری نواحی پوشیده شده با بازدارنده و مقاومت و دوام بازدارنده به کار می رود .

۸-۵-۱۵ - طیف سنجهای لیزری رامان^۴

با توجه به شکل (۳۰-۱۵) اشعه لیزر به سطح الکتروود تابیده می شود و بازگشت این اشعه از روی سطح الکتروود مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد . اتمها و مولکولهای موجود بر روی سطح الکتروود اعم از ملکولهای آب ، باز دارنده ، مواد خورده شده و غیره بنا به

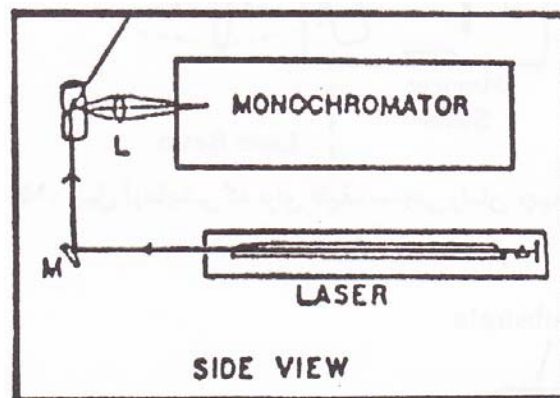
^۱ Persistency

^۲ Field test

^۳ Radioactive

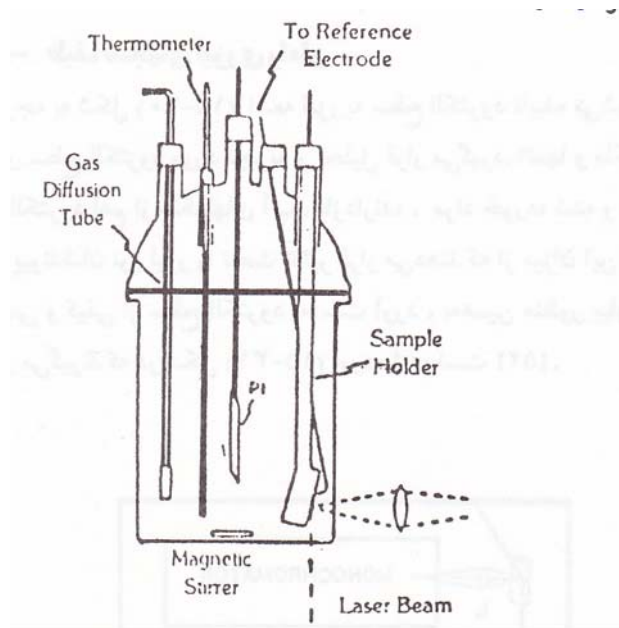
^۴ Laser Raman spectrometer

حالت اتمی و نوع پیوندشان نور لیزر را تحت تأثیر قرار می دهند که از میزان این تغییر فاز می توان اطلاعات کمی و کیفی از سطح الکتروود به دست آورد ، به همین منظور پیل‌های خاصی مورد استفاده قرار می گیرند که در شکل (۳۱-۱۵) آورده شده است. [۵۲]

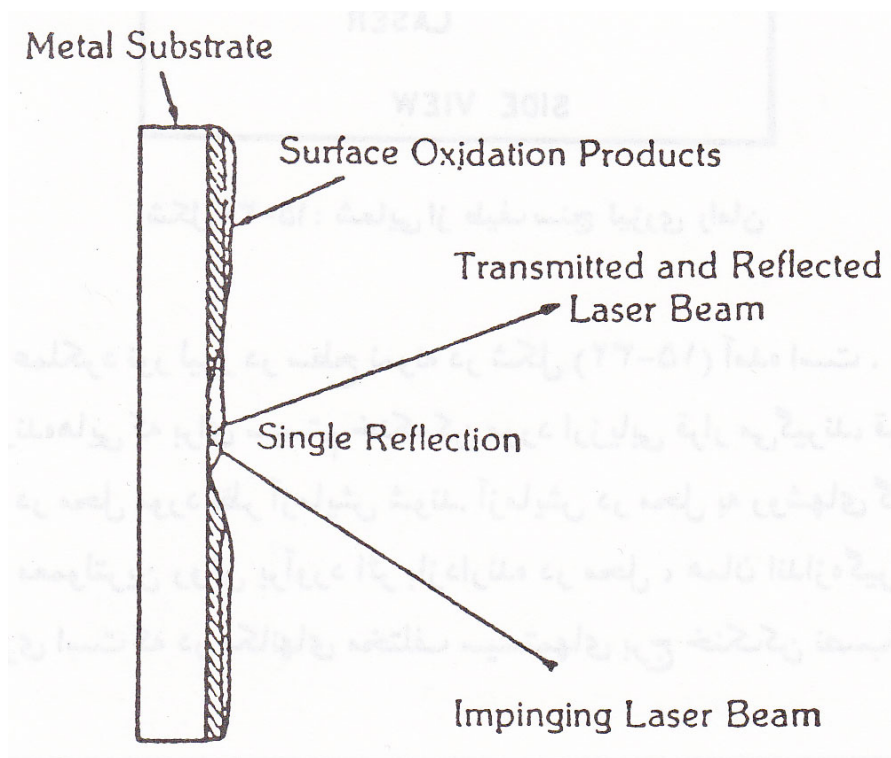


شکل ۳۰-۱۵ : شمایی از طیف سنج لیزری رامان

نحوه عملکرد نور لیزر در سطح نمونه در شکل (۳۲-۱۵) آمده است .
 بازدارنده هایی که برای سیستم خنک کن مورد ارزیابی قرار می گیرند ، قبل از بازاریابی و عرضه باید در محل مورد نظر آزمایش شوند . آزمایش در محل به روشهای گوناگونی انجام می گیرد ، ولی معمولترین روش برآورد اثر بازدارنده در محل ، همان اندازه گیری کاهش وزن کوپن های فلزی است که در مکانهای مختلف سیستمهای برج خنک کن نصب می شوند . در بسیاری سیستمها ، کیفیت آب و خواص آن به صورت دستگاههای الکتروشیمیایی چک و اندازه گیری می شود [۵۲] .



شکل ۱۵-۳۱: پیل آزمایشی که برای طیف سنجی رامان تهیه شده است

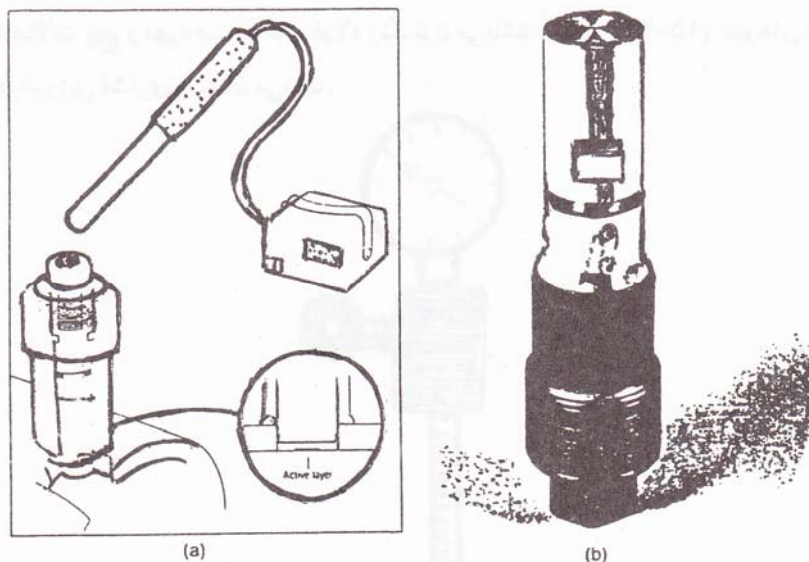


شکل ۱۵-۳۲: نحوه عملکرد نور لیزر در سطح نمونه

۵-۴-۱۵- روش فعال کردن لایه نازک^۱

فعال کردن لایه نازک سابقه ای طولانی در دیدبانی خوردگی و اندازه گیری سایش در ماشینها دارد. مقدار کمی از یک ماده رادیو ایزوتوپ^۲، سطح فلز را که می تواند کوپن یا قطعه ای از تجهیزات باشد نشان دار می کند.

از دست رفتن فلز ناشی از فرایند خوردگی می تواند توسط این روش از طریق مقایسه فعالیت سطح خورده شده با فعالیت اولیه، به وسیله یک شمارشگر با حساسیت بالا ردیابی شود. شایان ذکر است، در صورتی که محصولات خوردگی در این روش چسبنده باشد، در نتایج حاصله خطا ایجاد می شود. شکل (الف-۳۳-۱۵) شکل یک پروب و طریقه نصب آن را به طور شماتیک و شکل (ب-۳۳-۱۵) یک پروب واقعی را نشان می دهد [۵۵-۵۳].



شکل ۳۳-۱۵- الف) شکل یک پروب و طریقه نصب آن، ب) یک پروب واقعی TLA

^۱ Thin layer activation (TLA)

^۲ Radioisotope

۱۰-۵-۱۵- پروب های هیدروژنی

کارکرد پروبهای هیدروژنی بر اساس این واقعیت قرار دارد که در محیطهای اسیدی، در واکنش کاتدی، هیدروژن تولید می شود. اتمهای هیدروژن تولید شده از ضخامت دیواره نفوذ می کند و در خارج از دیواره، هیدروژن اتمی به مولکولی تبدیل شده و سبب زوال تجهیزات و لوله ها می شود. این هیدروژن را می توان به دو صورت دیدبانی کرد [۵۶].

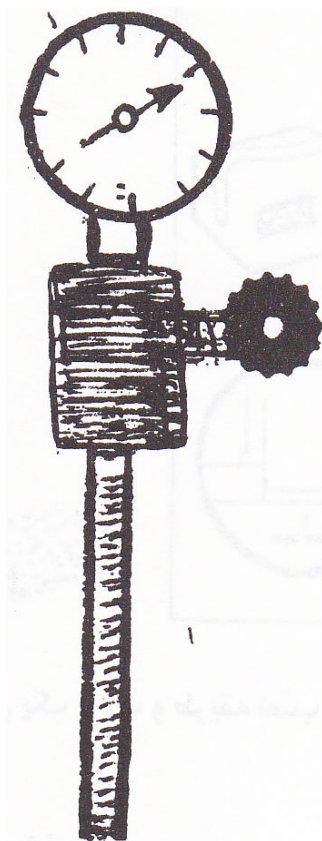
دستگاه اندازه گیری از نوع فشاری^۱

این پروبها محفظه هائی هستند که درون سیستم یا روی لوله ها و مخازن قرار گرفته و مقدار هیدروژن نفوذی از دیواره را که پس از مولکولی شدن سبب افزایش فشار می شود به وسیله یک فشار سنج اندازه گیری می کنند. فشارسنج می تواند دارای یک مقیاس اندازه گیری^۲ با یک کریستال جامد الکترونی باشد.

بزرگترین مشکل معیارها نشتی هیدروژن از راه اتصالات پیچ و مهره در بدنه های فولاد زنگ نزن می باشد. شکل (۳۴-۱۵) نمونه ای از پروب هیدروژنی فشاری را نشان می دهد.

^۱ Pressure type

^۲ Gauge



شکل ۳۴-۱۵: پروب های هیدروژنی فشاری

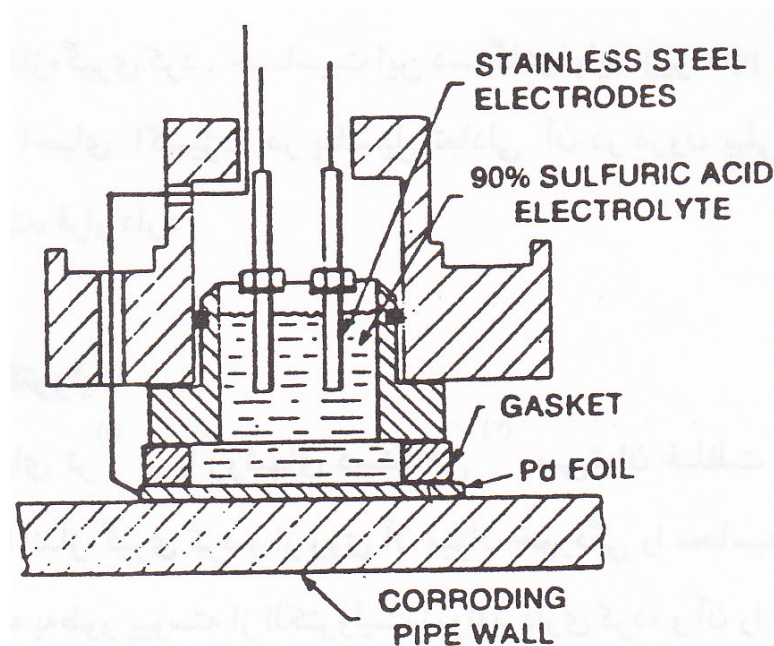
دستگاههای اندازه گیری از نوع الکترولیتی^۱

این پروبها بر روی سطح خروجی قسمتی که خورده می شود قرار می گیرد و از یک قطعه ورقه پالادیومی مطابق شکل (۳۵-۱۵) که نقش جمع کننده و کاتالیزور دارد، تشکیل شده است. این فویل همراه با یک الکترودکاری از جنس فولاد زنگ نزن و الکترولیت اسید سولفوریک ۰/۹۰ می باشد. این الکتروود می تواند جریان لازم برای اکسید شدن هیدروژن نفوذ کرده از دیواره را اندازه گیری کند.

^۱ Electrolytic type

این پروبها در محلولهای اسیدی حاوی سموم آزاد شده هیدروژن^۱ مانند H_2S بهترین عملکرد را دارند. از جمله مزایای این گونه پروب ها عدم نیاز به تعبیه مکان خاص برای آنها می باشد. همچنین می توان آنها را مستقیماً پس از یک آماده سازی سطحی ساده بر روی تجهیزات و یا خطوط لوله قرار داد. از طرف دیگر باید توجه کرد که اگر واکنش کاتدی فقط احیای هیدروژن باشد، نرخ خوردگی متناسب با میزان هیدروژن نفوذ کرده از جداره است.

در غیر این صورت نتایج حاصل از این پروب ها با خطای بسیار همراه خواهد بود.



شکل ۳۵-۱۵: پروبهای هیئروژنالکترولیتی

^۱ Hydrogen poisons

۱۱-۵-۱۵ دستگاههای تجزیه الکترولیت

در این نوع دستگاهها ، غلظت مواد موجود در الکترولیت (مانند اکسیژن محلول ، یونهای حاصل از خوردگی فلز و غلظت Cl^- و غیره) اندازه گیری می شود . این تجزیه کننده ها به دو صورت ذیل می توانند میزان خوردگی را اندازه گیری کنند :

- الف - اندازه گیری غلظت یونهای خورده و در نتیجه میزان خوردگی محیط .
- ب - اندازه گیری غلظت محصولات خوردگی که مستقیماً با میزان خوردگی متناسب است .

روشهای زیر امروزه در صنعت به کار برده می شوند :

- اندازه گیری غلظت اکسیژن محلول

میزان خوردگی در بسیاری از محیط های آبی (خصوصاً برای فولادها) مستقیماً با میزان اکسیژن محلول متناسب است و با یک تجزیه کننده اکسیژن یا اکسیژن سنج می توان خوردگی محیط را اندازه گیری کرد . حساسیت این دستگاهها باید زیر 1_{ppb} باشد . اساس کار این دستگاهها بر احیای اکسیژن در پتانسیل تعادلی آن در درون پیلی که نسبت به اکسیژن نفوذ پذیر است ، قرار دارد .

- آنالیز شیمیایی الکترولیت

توسط روش های تر^۱ و یا روشهای دستگاهی^۲ می توان غلظت یونهای فلزی حاصل از خوردگی را اندازه گیری کرد و از روی آن میزان خوردگی را محاسبه نمود . امروزه

^۱ Wet analyzers

^۲ Instrumental analyzers

روشهایی ابداع شده که به طور پیوسته از الکترولیت نمونه برداری کرده و آن را تجزیه می کند. اندازه گیری آنالیتیکی مقدار آهن یا دیگر فلزات محلول در داخل محلول خورده، روش دیگری است که مستقیماً مربوط به کاهش و اتلاف فلز می گردد. مقدار یون آهن در آب دیگهای بخار^۱ همچنین مقدار یون کلر در آبهای خنک کن، از طریق این تجزیه کننده ها می تواند اندازه گیری شود. اگر محصولات خوردگی نا محلول باشند یا چسبندگی زیادی به سطح فلز داشته باشند، دقت این روش پائین است. اگر این روش برای یک سیستم دو فازی استفاده شود، هر دو فاز باید برای ردیابی و اندازه گیری یونهای فلزی تجزیه شوند یا اینکه باید دقت ویژه ای نمود که فلز حل شونده در فاز محلول قرار گیرد. اندازه گیری کمی فلزات محلول به صورت مکرر و متناوب، در سیستم های اسیدی یا در موارد ویژه ای که محصولات خوردگی به صورت محلولند، انجام می شود. آزمونهای رنگ سنجی^۲ نیز برای اندازه گیری یونهای آهن، مس و دیگر فلزات موجود در محلول از روش های سودمند و قابل استفاده است.

۱۲-۵-۱۵- اندازه گیری فعالیت میکروبها و باکتریها

توسط روشهای آزمایشگاهی بیولوژیکی می توان فعالیت باکتریهای موجود در سیستمها را اندازه گیری کرد. با این روش یک ارزیابی از میزان خوردگی توسط باکتریها به دست می آید. این روشها شامل محیط های کشت ساده متشکل از کاغذهای شمارنده تعداد باکتریها یا دستگاههای بسیار پیشرفته است [۵۶-۵۲].

^۱ Boiler

^۲ Colourometric

۶-۱۵ کاربرد روشهای غیر مخرب (NDT) در دیدبانی خوردگی

۱-۶-۱۵- روش مافوق صوت

ابزارهای اندازه گیری ضخامت توسط امواج صوتی می تواند به عنوان یک روش دیدبانی خوردگی استفاده شود. اساس این روش بر مبنای نصب یک پروب روی دیواره خارجی محفظه ها قرار دارد. پروب از دو قسمت تشکیل شده است، قسمت اول مافوق صوتی را می فرستد که این امواج پس از عبور از ضخامت دیواره به سطح داخلی برخورد کرده و باز می گردد.

امواج بازگشتی را قسمت دوم پروب دریافت می کند و با دانستن سرعت امواج در داخل فلز مربوطه و زمان رفت و برگشت آنها می توان ضخامت دیواره را محاسبه کرد و با مقایسه این ضخامت و ضخامت اولیه میزان خوردگی اندازه گرفته می شود. در این روش وسایل به کار برده شده سبک و قابل حمل هستند و ضخامت بین ۳۰۰ mm - ۱ mm با دقت ± 0.1 می توان اندازه گیری کرد [۶۲-۵۷].

- این روش چند مزیت دارد:

- ۱- لزومی به وارد کردن پروب اندازه گیری به داخل محفظه ها و خطوط لوله نیست.
- ۲- نتایج را می توان مستقیماً با توجه به دوره های اندازه گیری و ضخامت اولیه، به میزان خوردگی تبدیل کرد.
- ۳- این دستگاهها دارای حجم کمی بوده و به آسانی قابل حمل هستند.

با وجود مزایای فوق ، در این روش محدودیتهای قابل توجهی نیز وجود دارد که از آنجمله می توان به موارد زیر اشاره نمود :

۱- وجود رنگها و عایقهای حرارتی و یا تجهیزات جانبی می توان در امر اندازه گیری مشکل ایجاد کرده و یا اندازه گیری را غیر ممکن سازد .

۲- برای نصب پروب یک عامل جفت کننده^۱ نظیر گریس ، ژل نفتی یا روغن نیاز است . بنا بر این هنگامی که دیواره ، گرم یا بسیار سرد است مشکلات فراوانی وجود دارد .

۳- هزینه تجهیزات نسبتاً بالاست .

۴- با این روش فقط می توان خوردگی یکنواخت را به طور دقیق دیدبانی کرد .

۵- برای به دست آوردن میزان خوردگی به یک زمان نسبتاً طولانی (چند سال) نیاز است و نمی توان میزان خوردگی را در هر لحظه به دست آورد . [۶۳]

یک مشکل اصلی که در این روش وجود دارد بازرسی پروب متصل به فلز مورد آزمایش می باشد ، چرا که سطح فلز ممکن است با محصولات حاصل از زنگ زدگی پوشیده باشد و بنابراین باعث مشکلاتی از نظر قرار دادن پروب روی آن گردد و اغلب متخصصین سطحی را انتخاب می کنند به خوبی با پروب جفت شود.

البته باید توجه داشت که عمل قراردادن پروب روی برخی سطوح فولادی نظیر داخل واحد تقطیر غیر ممکن می باشد . با این وجود دما باعث تخریب خواص پیزوالکتریک^۲ پروب می گردد .

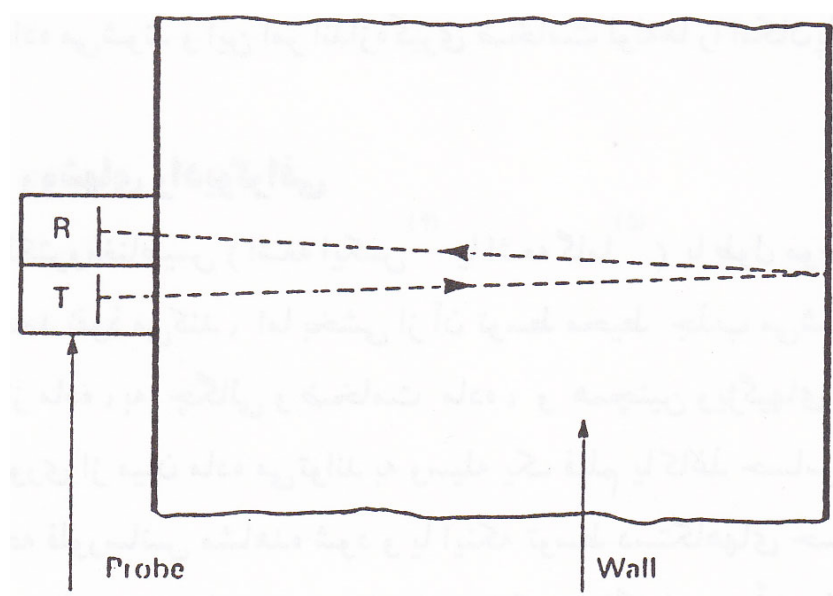
^۱ Coupling agent

^۲ Piezo – electric

اگر چه روشهایی برای سرد کردن پروب ها وجود دارد و مقاومت دمایی مواد پیزوالکتریک اخیراً با استفاده از روش هایی بهبود یافته است .

اندازه گیری ضخامت در دمای بالا و پایین ، تا 5% ممکن است با هم اختلاف داشته باشند

[۵۶-۴۶]



شکل ۳۶-۱۵: چگونگی کارکرد و نمای داخل یک پروب فراصوتی

علاوه بر ضخامت سنجی ، روشهای مافوق صوتی به طور گسترده ای برای آشکار سازی عیوب داخلی مواد به کار می رود . همچنین می توان از آنها برای آشکار سازی ترک های کوچک سطحی نیز استفاده کرد . از این روش برای کنترل ذرات معلق موجود در محلولها نیز استفاده می شود . امروزه با پیشرفت تکنولوژی ، پروب هایی ساخته شده است که همراه با روش های تصویر پردازی کامپیوتری ، می تواند تصویر کاملی از سطح و یا پروفیلی از ضخامت جداره را همراه با قسمتهای ترک خورده و یا خورده شده نشان دهد

[۶۸-۷۲].

توسعه ریز پردازنده ها منجر به طراحی پروبهای چندگانه^۱ شده است. این پروبهای چندگانه کاربردهای ویژه ای نظیر استفاده از مجموعه پروب ها در کف تانکهای روغن و لوله های دریایی، دارند.

توسعه روش مافوق صوت منجر به شناسایی خوردگی می گردد که به طریق زین اسکن^۲ (سیستم دیجیتالی بر اساس کنترل رویش) و آر - اسکن^۳ (سیستم جاگذاری یک برنامه رویشی با استفاده از روش مغناطیسی که برای ذخیره سازی و محافظت تصاویر بکار می رود) انجام می گیرد. این روشها برای بررسی خوردگی خطوط لوله به کار برده می شود.

علاوه بر مواد ذکر شده، پروب هایی ساخته شده که به دیواره خارجی خطوط لوله ها جوش داده می شوند و این امر اندازه گیری ضخامت لوله ها را امکان پذیر می سازد.

۲-۶-۱۵ - روشهای رادیوگرافی

اشعه الکترو مغناطیسی (اشعه ایکس^۴ یا اشعه گاما^۵) با طول موجهای بسیار کوتاه از مواد جامد نفوذ می کند، اما بخشی از آن توسط محیط جذب می شود، مقدار جذب اشعه در عبور از ماده، به چگالی و ضخامت ماده، و همچنین ویژگیهای تشعشعی بستگی دارد.

^۱ Multiprobe

^۲ Zinscan

^۳ R - scan

^۴ X- ray

^۵ Gamma ray

اشعه عبوری از میان ماده می تواند به وسیله یک فیلم یا کاغذ حساس ، آشکار شده یا روی یک صفحه فلور سانس مشاهده شود و یا اینکه توسط دستگاههای حساس الکترونیکی اندازه گیری شود . البته برای بازرسی به جای اشعه ایکس یا گاما عموماً از یک پرتو نوترونی استفاده می کنند ، که در این صورت روش رادیو گرافی نوترونی نامیده می شود .

مزایای این روش به شرح ذیل می باشد [۶۵-۷۰] :

- ۱- برای ردیابی خوردگی های موضعی به ویژه در خطوط لوله بسیار مفید است .
- ۲- احتیاج به جابجایی لوله نیست .
- ۳- نتایج را به طور دائمی می توان بر روی صفحه عکاسی ثبت و یا به روشهای دیگر بایگانی کرد .

با وجود مزایای فوق به دلیل استفاده از پرتوهای فعال ، این روش خطراتی را نیز به دنبال دارد که باید با رعایت کامل نکات ایمنی از آن استغاده کرد . علاوه بر آن موارد زیر را نیز

که جزء محدودیتهای این روش هستند باید در نظر گرفت :

- ۱- خطرهای ناشی از پرتوهای اشعه ایکس .
- ۲- زمان بالای پرتودهی برای به دست آوردن تصویر .
- ۳- نیاز به دسترسی به هر دو سوی قطعه مورد آزمایش .

امروزه روشهای جدیدی مانند روشهایی که با کمک تصاویر تلویزونی می توان در هر لحظه تصویری از شرایط قطعه را در دست داشت و یا روشهایی که از کامپیوتر برای

تصویر سازی استفاده می کنند ، ابداع شده اند . منبع پرتو در این دستگاهها با بهره جویی

از کامپیوتر (مانند X – ray – tomograpHy)

می تواند زاویه های مختلفی داشته باشد که این امر بسیاری از مشکلات را مرتفع می سازد

[۶۹] .

۳-۶-۱۵- دیدبانی توسط رادیوگرافی نوترونی^۱

این روش بر پایه عبور امواج نوترونی از درون قطعه مورد مطالعه و سپس تصویر برداری

از آن می باشد و چون هیدروژن جذب نوترونی بالائی دارد توسط این روش می توان

میزان هیدروژن آزاد شده در فرایند خوردگی را به دست آورد و آن را به سرعت خوردگی

تبدیل کرد .

۴-۶-۱۵- روش جریانهای گردابی^۲

جریان گردابی یا فوکو به یک جریان الکتریکی دورانی اطلاق می شود که توسط یک میدان

مغناطیسی در یک فلز ایجاد می گردد . در این روش توسط یک هسته ، میدان مغناطیسی به

قطعه مورد آزمایش وارد شده و باعث ایجاد جریان فوکو در آن می گردد . بعد از برگشت

عکس العمل جسم از طریق هسته می توان نتایج را توسط دستگاههای خاصی ملاحظه و

ثبت نمود و از آنجایی که میزان جریان فوکو در هر فلزی بستگی به رسانایی الکتریکی آن

دارد ، لذا وجود هرگونه ناهماهنگی مثل ناخالصی ، ترک ، تخلخل و غیره باعث تغییر در

^۱ Neutron radiograph detection monitoring.

^۲ Eddy current method

رسانایی الکتریکی قطعه مورد آزمایش گردیده و در نتیجه جریان فوکو نیز تغییر خواهد

کرد. به کمک این روش می توان اطلاعات بسیار زیادی از قطعه به دست آورد از جمله :

۱- ضخامت جداره و پروفیل آن .

۲- ردیابی ترک .

۳- اندازه گیری ضخامت پوشش و پدیدار کردن عیوب آن .

۴- خواص فیزیکی از قبیل رسانائی الکتریکی ، خواص مغناطیسی و سختی .

۵- خواص متالورژیکی مانند اندازه دانه ها و شرایط عملیات حرارتی .

در این روش با در نظر گرفتن شکل قطعه کار ونحوه آزمایش ، از هسته های مختلف و

سیستمهای مختلفی می توان استفاده کرد . کاربرد آن در بازرسی کلیه قطعات فلزی

(آهنی، غیر آهنی) به منظور کشف عیوب مختلف می باشد . دستگاههایی مثل

DERFECTOMANT و CIRCOGRAPH که برای بازرسیهای دوره ای جهت عیب

یابی و برای امور سویی و نگهداری و یا امور آموزشی و تحقیقاتی استفاده می شوند بر

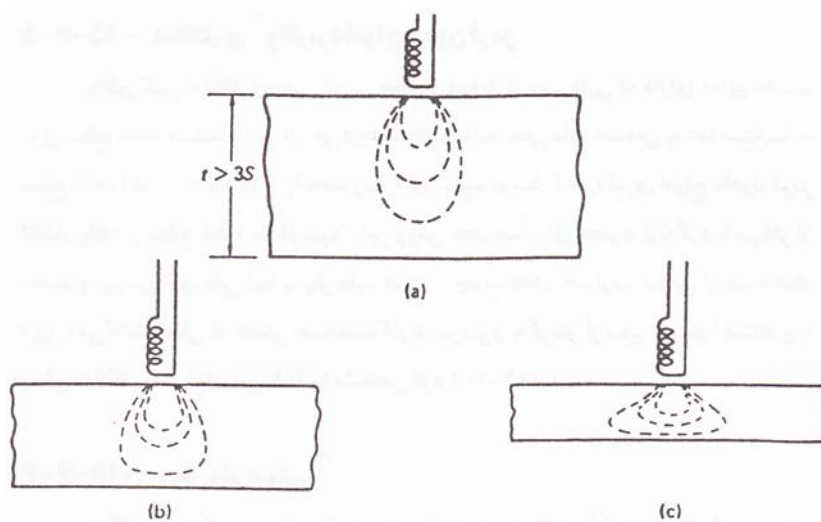
اساس روش آزمایش جریان فوکو عمل می کنند .

علاوه بر آن پروبهای استفاده شده با سطح قطعه تماس ندارند و این امر در بسیاری از

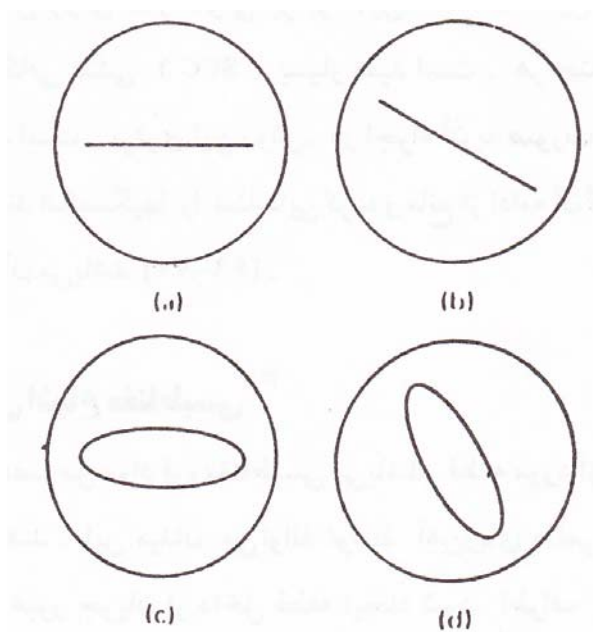
موارد کارگشاست ، ولی باید توجه داشت که استفاده از این وسیله برای ردیابی خوردگی و

ترکها به مهارت و آموزشی کافی نیاز دارد و دستگاههای استفاده شده نیز عموماً هزینه بر

هستند .



شکل ۳۷-۱۵: نمایش تصویری اعوجاج توزیع خطوط جریان گردابی در داخل مواد نازک



شکل ۳۸-۱۵: روش بیضی آنالیز فاز:

- (a) خط مرجع: (b) تغییر در یک پارامتر مثلاً ابعاد: (c) تغییر در یک پارامتر مثلاً رسانائی: (d) تغییر در هر دو پارامتر:

۵-۶-۱۵- دمانگاری^۱ و کاربرد امواج مادون قرمز

به طور کلی دمانگاری یعنی تعیین خطوط هم دما یا مسیرهایی که دارای دمای یکسان روی سطح قطعه هستند ، این امر می تواند مستقیم باشد یعنی ماده حساس به دما مستقیماً به سطح قطعه اتصال داده شود و یا به صورت غیر مستقیم توسط اندازه گیری امواج مادون قرمز انتشار یافته از سطح قطعه انجام شود . این روش خصوصاً برای خطوط لوله گرم یا سردتر از محیط و بررسی خوردگی آنها بسیار مفید است . چون انتقال حرارت تابعی از ضخامت دیواره می باشد نقاطی که کاهش ضخامت دارند سردتر و یا گرمتر از سایر قسمتها هستند و با روش دمانگاری می توان این نقاط را مشخص کرد [۶۹-۷۰] .

۶-۶-۱۵- روش نشر صوتی^۲

هنگامی که ترکی در حال رشد است و فلزی تحت تنش قرار دارد ، امواج صوتی از خود منتشر می کند که با ردیابی آن می توان میزان رشد ترک و آغاز یک ترک را اندازه گیری کرد . اساس روش صوتی نیز بر همین مبنا است . این روش خصوصاً برای دیدبانی خوردگی شکافی تنشی (SCC) بسیار مفید است . هرچند که استفاده از آن به تجربه زیادی نیازمند است . برتری این روش ، در اجراء آن به صورت همزمان^۳ (در حین کار) است که می تواند شکستگیها را شناسایی کرده و مانع از ادامه آن گردد . مزیت دیگر این روش ، سریع بودن آن می باشد [۶۹-۷۰] .

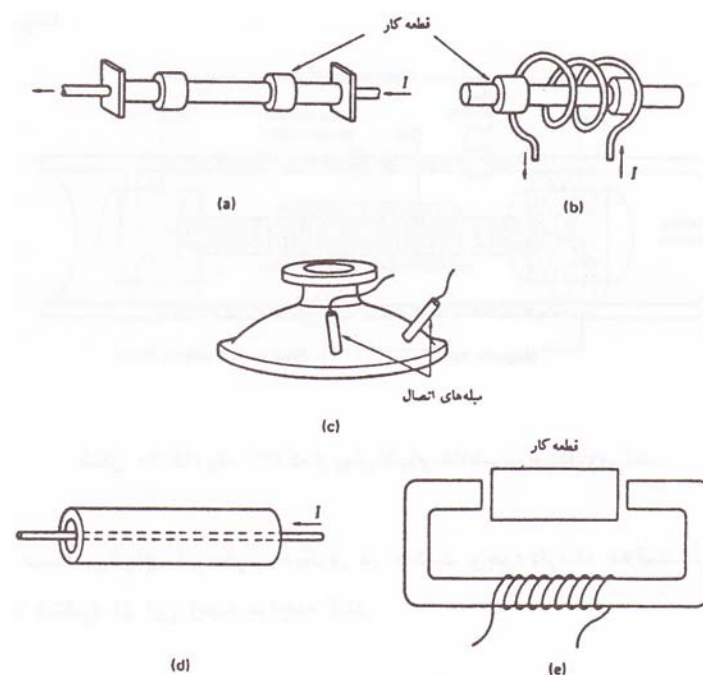
^۱ ThermograpHy

^۲ Caustic Emission Methode

^۳ On line

۷-۶-۱۵- روش اشباع مغناطیسی^۱

این روش مخصوص مواد فرو مغناطیسی می باشد . قطعه مورد آزمایش را تحت میدان مغناطیسی قرار می دهند . این میدان می تواند توسط آهن ربای دائمی ، سیم پیچ حاوی جریان الکتریکی یا عبور جریان از داخل قطعه ایجاد شود . اطراف ترک ها و یا مناطق غیر یکنواخت ، میدان مغناطیسی دچار غیر یکنواختی می شود و از این طریق می توان ترک ها را ردیابی کرد . شکل (۱۵-۳۹) روشهای ایجاد میدان مغناطیسی را درون قطعه مورد آزمایش نشان می دهد .



شکل ۱۵-۳۹ : روشهای ایجاد میدان در نمونه های آزمایش :

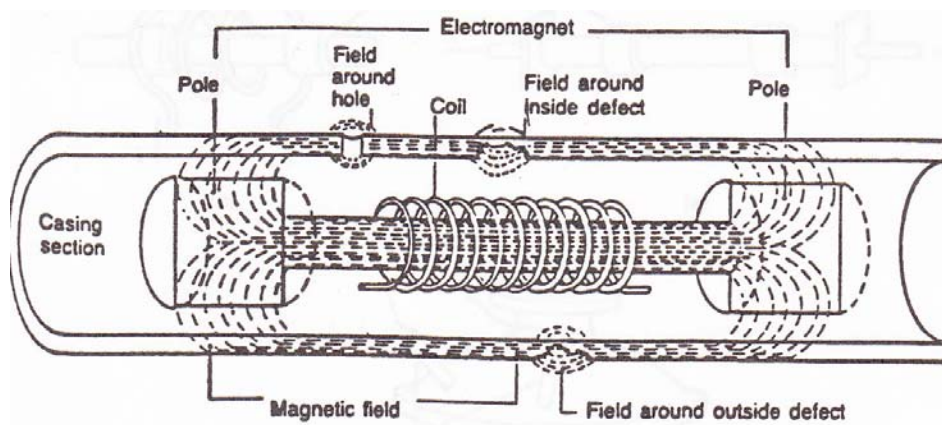
- (a) جریان الکتریکی از میان تمام قطعه عبور کرده و میدان مغناطیسی دایره ای شکل القاء می کند .
- (b) قطعه در وسط سیم پیچی قرار داده شده است و میدان مغناطیسی طولی القاء می کند
- (c) اتصال سیخکی که روی قطعه بزرگ ریختگی قرار داده شده است .
- (d) مقطع توخالی که با عبور یک کابل هادی از داخل آن مغناطیسی می شود .
- (e) قطعه در داخل یک طوقه مغناطیسی می شود .

^۱ Magnet Saturation

۸-۶-۱۵- روش مقیاس بازرسی خطوط لوله^۱ (PIG)

در این روش ابزاری مطابق شکل زیر به داخل لوله فرستاده می شود؛ این وسیله به کمک نیروی محرکه داخلی و یا توسط فشار مایع و گاز حرکت می کند.

بر روی این دستگاه می توان ابزارهای دیدبانی و آزمایشگرهای مختلفی مانند دوربین و یا سایر ابزار NDT را نصب کرد [۶۷-۶۹]. این دستگاهها به وسیله اطلاع رسان^۲ نیز موسومند.



شکل ۴۰-۱۵: یک PIG که از روش اشباع مغناطیسی استفاده می کند.

ضمناً روشهای غیر مخرب دیگری در صنعت وجود دارد که علاقمندان می توانند به کتب منتشره در این زمینه مراجعه کنند.

^۱ Pipeline inspection gauge

^۲ Intelligent vehicle

۷-۱۵- آزمونهای خوردگی آزمایشگاهی^۱

۱-۷-۱۵- آزمایشهای خوردگی به طریق غوطه وری^۲

در این آزمایشها، فلز یا آلیاژ در محلول یا مایع مورد نظر غوطه ور شده و بعد از زمان معینی، کاهش وزن آن اندازه گیری می شود.

این آزمایشها در استاندارد (R ۱۹۸۵) ASTM G ۳۱ ۱۹۷۲ موجود است. البته آزمایشهای عنوان شده ASTM به یک سری تجهیزات اولیه نیاز دارند، می دانیم که تحت شرایط مختلف از نظر دما، سطح و سرعت جریان، فلزات گوناگون به صورتهای مختلف خورده می شود.

بنابر این توجه داشت که در این آزمایشها نیز با تغییر یافتن این شرایط حداقل میزان خوردگی برای یک ماده بدست می آید به این دلیل این آزمایشها بیشتر تحت شرایط استاندارد صورت می گیرد و این امر از این نظر که در عمل هم دقیقاً شرایط حاکم بر آزمایشگاه موجود باشد و همان نوع خوردگی که در آزمایشگاه رخ می دهد اتفاق افتد بسیار بعید به نظر می رسد.

یک روش مناسب تر آن است که اثر تک تک عوامل محیطی مؤثر بر خوردگی در نمونه مورد تحقیق، بررسی می شود.

در بسیاری از حالات مخصوصاً در محلولهای آبی مهمترین عواملی که باید در آزمونهای آزمایشگاهی کنترل شوند عبارتند از: ترکیب محلول، دما، سطح. [۷۷-۷۴]

^۱ Laboratory corrosion tests

^۲ Total – immersion tests

۱-۱-۷-۱۵ اثر سرعت حرکت :

در آزمایشهای مختلف بر اساس شرایط حاکم بر محلول که در حالت سکون قرار داشته باشد و یا متحرک باشد نتایج گوناگونی بدست می آید . سرعت الکترولیت بر سرعت خوردگی یک سیستم با کنترل نفوذی تأثیر می گذارد .

اما در سیستم هایی که تحت کنترل فعالیت هستند سرعت الکترولیت تأثیری بر سرعت خوردگی سیستم ندارد.[۷۹] همچنین در سیستم هایی که تحت کنترل نفوذی یا غلظتی هستند در سرعتهای خیلی بالا الکترولیت سرعت خوردگی مستقل از سرعت الکترولیت می گردد .

در فلزات فعال – غیر فعال نیز سرعت الکترولیت ممکن است سبب رویین شدن فلز مورد نظر شود و یا فلز مورد نظر وارد ناحیه ماوراء رویین گردد [۸۰] . بنابر این کنترل دقیق سرعت حرکت و مطالعه آثار سرعت بسیار مشکل است . یک مشکل اساسی که باید توجه ویژه ای به آن مبذول داشت و از آن ممانعت بعمل آورد ، حرکت نمونه درون مایع در اثر حرکت مایع می باشد . به عنوان مثال می توان به چرخش نمونه در سرعتهای بالا اشاره نمود .

این مشکل می تواند تا حدی با استفاده از یک موج گیر مناسب کنترل شود . بررسی اثرات سرعت ممکن است هم از طریق حرکت نمونه آزمایشی از داخل یک مایع ساکن و یا از طریق حرکت مایع از روی نمونه آزمایشی ساکن صورت گیرد . جزئیات آزمایش در کتاب

۷۰ - ۲۷۰ NACE TM (Method of conduction controlled velocity)

آورده شده است [۷۸].

۲-۱-۷-۱۵- اثر ترکیب محلول^۱

علاوه بر اثر سرعت حرکت ، تغییرات غلظتی ترکیب محلول نیز باید در آزمایش مورد توجه قرار گیرد . این تغییرات ممکن است در اثر واکنش ترکیبات موجود در محلول با نمونه مورد آزمایش بوجود آید و یا عوامل دیگری چون تبخیر سبب تغییرات غلظتی ترکیب شیمیایی محلول شود . در بعضی مواقع مانند خوردگی آلومینیم در اسیداستیک ، حذف آب از الکترولیت ، خوردگی را به میزان زیادی افزایش می دهد [۷۸] .

اما در برخی محلولها با اضافه شدن مقدار ناچیزی آب به این محلولها که حاوی برم یا سایر هالوژنها نیز می باشد ، خوردگی به شدت افزایش می یابد .

۳-۱-۷-۱۵- اثر کنترل دما^۲

درجه حرارت مهمترین عامل در خوردگی است بنا بر این مشخص بودن و دانستن درجه حرارت سطح نمونه (که درجه حرارت خوردگی است) ضروری است .

لذا کنترل دما باید مورد توجه قرار گیرد . کنترل دما می تواند به وسیله ترموستات انجام گیرد . اکثر مطالعات آزمایشگاهی در حمام های آبی یا روغنی با درجه حرارت کنترل شده

صورت می گیرد . دقت اندازه گیری درجه حرارت باید 1°C باشد. [۸۳]

^۱ Solution composition

^۲ Temperature control

در آزمایشها باید دقت شود که توزیع درجه حرارت در حمام ها یکنواخت باشد . گاهی اوقات برای کاهش زمان آزمایش ، آزمایش را در درجه حرارتی بالاتر از درجه حرارت اصلی مورد نیاز انجام می دهند این روشها بسیار خطرناک است ، زیرا تأثیر درجه حرارت ممکن است بسیار زیاد باشد و باعث حذف برخی مواد شود . [۸۴] معمولاً یک محدوده دمایی برای انجام آزمایشها در نظر گرفته می شود .

بعضی از آزمایشها در محلولهای آبی در دمای بالاتر از $60^{\circ}C$ انجام می شود . بایستی توجه شود تا ظرف و تجهیزات این گونه از دستگاهها به نحوی انتخاب شوند تا خورده نشوند . برای مثال ، استفاده از ظروف شیشه ای و مواد پلیمری مخصوص با در نظر داشتن مقدار فشار سیستم مناسب می باشد [۷۹-۸۰]

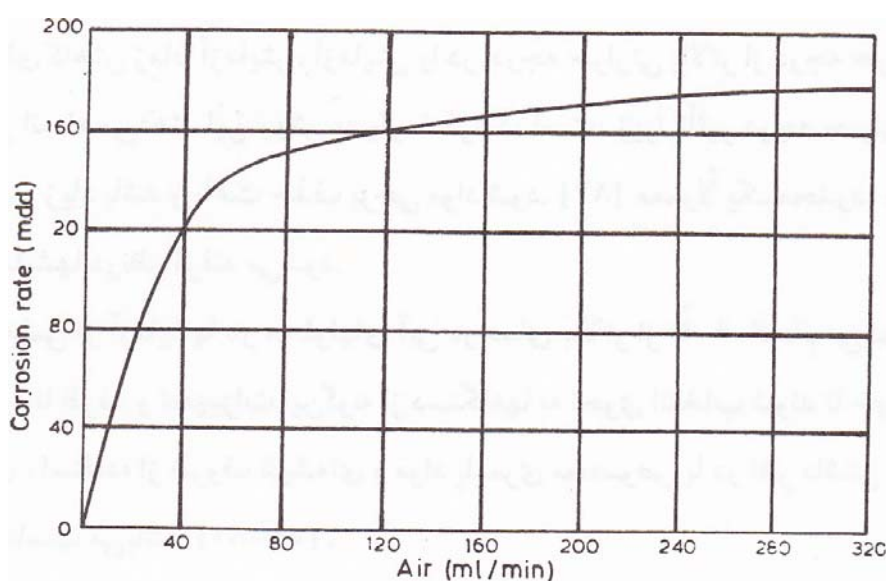
۴-۱-۷-۱۵- هوادهی^۱

هوادهی با حضور اکسیژن حل شده در یک محیط تأثیر مهمی بر سرعت خوردگی می تواند داشته باشد . بنابر این در یک برنامه آزمایشهای خوردگی ، این عامل باید به دقت در نظر گرفته شود .

به طور کلی برخی فلزات و آلیاژها در حضور اکسیژن با سرعت بیشتری خورده می شوند ، در حالی که بعضی دیگر مقاومت خوردگی بیشتری از خود نشان می دهند . مس ، برنجها ، برنرها و آلیاژهای دیگر مثل مونل و نیکل در حضور اکسیژن ، بخصوص در محیطهای اسیدی ، بیشتر خورده می شوند .

^۱ Aeration

شکل (۴۱-۱۵) میزان هوا دهی را بر روی سرعت خوردگی مونل در اسیدسولفوریک ۵٪ نشان می دهد . به طور کلی اطلاعاتی دربارهٔ میزان هوای محلول و تأثیر آن در آزمایش ضروری است به عنوان مثال ، ترکیبات آلی ممکن است با اکسیژن ترکیب شده و در نتیجه از محیط آزمایش خارج شوند [۸۱] .



شکل ۴۱-۱۵ : اثر هوا دهی به روی سرعت خوردگی مونل در اسیدسولفوریک ۵٪

ساده ترین و متداولترین روش هوا دهی یک محلول دمیدن هوا به داخل آن است . روش متداول برای دمیدن هوا به داخل محلول استفاده از یک غشاء متخلخل آلوندوم^۱ یا آجر متخلخل و یا دیسک شیشه ای است . یک لوله شیشه ای که با چسبهای سیلیکاتی به یک سانتی متر مکعب آجر متخلخل متصل شده است وسیله ساده ای است که در اکثر محلولها و آزمایشها قابل استفاده می باشد . لازم به ذکر است که هوا دهی مستقیم روی نمونه

^۱ Alundum

آزمایش مناسب نیست و برای پرهیز از برخورد حبابها با سطح نمونه ، یک لوله شیشه ای دور آجر متخلخل قرار داده می شود .

زمانی که مطالعه درجات مختلف هوادهی مدنظر باشد، بهتر است که مطالعات با استفاده از هوا و یا اکسیژن خالص انجام پذیرد . اگر هوازدایی کامل مورد نیاز باشد نیتروژن خالص یا آرگون بایستی مورد استفاده قرار گیرد .

حذف کامل اکسیژن در یک آزمایش بسیار مشکل است . زیرا درون ظرف سرباز مقداری اکسیژن به صورت حل شده همواره موجود است ، بنابر این شرایط اکسیژن کاملاً تحت کنترل می باشد .

۲-۷-۱۵- آزمون غوطه وری متناوب

در این آزمون ، نمونه به طور تناوبی در معرض محیط مورد آزمایش قرار می گیرد . محیط مورد آزمایش می تواند آب آشامیدنی و یا آب حاوی نمک باشد .

در این نوع آزمایش ، در اثر تبخیر مایع از سطح نمونه ، محلول موجود در روی نمونه تغلیظ می گردد و امکان مطالعه و پیش گویی خواص محصولات خوردگی چسبیده به نمونه فراهم می شود . این روش در مقایسه با روش آزمون غوطه وری پیوسته ، خوردگی عملی را بهتر نشان می دهد [۸۷] .

از آنجایی که شرایط انجام چنین آزمایشهایی استاندارد می باشد ، بنابر این این آزمایشها به صورت یک آزمون متداول در انواع آلیاژهای مختلف به کار برده می شود . در این

زمینه می توان به تحقیقات تعدادی از دانشمندان اشاره نمود که روی خودگی منیزیم صورت گرفته است .

در ASTM روشی برای آزمون خوردگی غوطه وری متناوب در محلول نمک طعام ۳/۵ درصد ارائه شده است (۱۹۸۸ : ASTM G۴۴) .

عمل آزمون غوطه وری به دو طریق می تواند انجام گیرد . در روش اول نمونه از یک محل مناسب آویزان بوده و به داخل ظرف محلول وارد شده و از آن خارج می گردد و در روش دوم ظرف محلول به طرف بالا و پایین حرکت می کند و نمونه ساکن است .

برای آن که نتایج حاصل از آزمایشهای گوناگون با هم مطابقت داشته باشد و به منظور قابلیت تکرارپذیری آزمایشها ، لازم است که دما و رطوبت محیط پیرامون محل آزمایشها کنترل شود ، زیرا این عوامل روی سرعت تبخیر محلول و خشک شدن نمونه ها تأثیر می گذارد .

همچنین لازم است آبی که در اثر تبخیر ، از محلول مورد آزمایش کم می شود دوباره به آن اضافه شود [۸۵-۸۲] .

۳-۷-۱۵ - اندازه گیری الکتروشیمیایی

از اندازه گیری الکتروشیمیایی می توان برای ارزیابی رفتار خوردگی فلزات و آلیاژها استفاده نمود و به این طریق از انجام آزمایشهای خسته کننده و اضافی دوری جست . از روش الکتروشیمیایی می توان ضمن اندازه گیری سرعت خوردگی ، انواع خوردگی نظیر

خوردگی حفره ای ، بین دانه ای ، تنشی و غیره را نیز تشخیص داد . در آزمایشگاه ، برای مطالعه رفتار خوردگی عموماً از روشهای الکتروشیمی استفاده می شود .

پیشرفت در وسایل الکتروشیمی باعث شده است که جزئیات مکانیزم خوردگی بهتر مشخص گردد . استفاده از دستگاه پتانسیواستات که در تمام زمینه ها کاربرد دارد ، باعث شده که انجام آزمایشهای الکتروشیمیایی به طور چشم گیری افزایش یابد و این امر می تواند منتهی به این مسأله گردد که در آزمایشگاه کلاً مطالعات خوردگی به طریق الکتروشیمیایی انجام گیرد . اولین بار لاکی یو روش های الکتروشیمی را برای آزمایش های خوردگی عنوان کرد و در ادامه تحقیقات ایشان از پتانسیواستات در آزمایشگاه برای مطالعه خوردگی فلزات استفاده گردید [۹۵-۹۹] .

از جمله روش های آزمایشگاهی الکتروشیمی برای مطالعه خوردگی می توان به روش اندازه گیری امپدانس ، اندازه گیری پتانسیل خوردگی ، اندازه گیری مقاومت قطبی شدن (پلاریزاسیون) و الکترو د چرخان اشاره نمود .

توضیح این روش در ابتدای این فصل موجود است . همچنین تئوریهای مربوط به روشهای امپدانس ، الکترو دایسک چرخان و اندازه گیری مقاومت قطبی شدن به منظور مطالعه بیشتر مهندسين و محققان در ادامه این فصل آورده شده است .

۴-۷-۱۵ - الکتروود دیسک چرخان^۱

بسیاری از تخریب ها در صنعت تحت شرایط سیال^۲ رخ می دهد . حرکت نسبی بین فلز و محیط خورنده اثر مهمی بر سرعت خوردگی فلز دارد . رفتار خوردگی تحت شرایط ساکن^۳ نسبت به حالت دینامیکی متفاوت است [۸۶] .

یکی از اقسام الکترودهایی که در مطالعات خوردگی به کار می رود الکتروود دیسک چرخان می باشد . این الکتروود شامل دیسکی از جنس مواد الکتروودی است که به صورت افقی در محلول یک الکتروولیت قرار داده می شود و به صورت عمودی حول محورش با سرعت زاویه ای (W) می چرخد .

خاصیت ویژه الکتروود دیسک چرخان در این است که جریان لایه ای کنترل شده در نزدیکی الکتروود وجود دارد . این امر باعث خواهد شد که غلظت مواد و نرخ واکنش در تمام سطح دیسک یکنواخت باشد . در این حالت بیشترین نرخ انتقال ذرات به سطح را میتوان از اطلاعات ترکیب شیمیایی و گرانیروی جنبشی^۴ سیال و ضریب نفوذ ذرات حساب کرد [۸۸ و ۸۷] .

هنگامی که واکنشهای الکتروشیمیایی در سطح یک الکتروود غوطه ور در الکتروولیت رخ می دهد، همراه با یک جریان خالص کاتدی یا آندی ، باید انتقال مواد اولیه یا محصولات به سطح یا از سطح نیز رخ دهد .

^۱ Rotating discelectrode

^۲ Flow condition

^۳ Static condition

^۴ Kinematic viscosity

فرآیند کلی می تواند به صورت مراحل زیر خلاصه شود :

الف : انتقال مولکولهای حل شده یا آنیونها به سطح الکتروود .

ب : جذب سطحی^۱ و سپس انجام واکنش بر سطح الکتروود .

ج : دفع سطحی^۲ محصولات واکنش .

د : انتقال محصولات واکنش از سطح الکتروود به داخل الکتروولیت .

مرحله (الف) و (د) اصطلاحاً به عنوان فرآیند انتقال جرم نامگذاری شده است . سرعت

فرآیند کلی به وسیله کندترین مرحله کنترل می شود . هنگامی که مرحله کند شامل مرحله

آغاز واکنش یا مرحله جدا شدن محصولات باشد ، انتقال جرم کنترل کننده واکنش می باشد

و به وسیله قوانین سینتیک انتقال جرم کنترل می شود [۸۹] .

مکانیزم انتقال جرم به الکتروود ، یا انتقال جرم از الکتروود در محلول می تواند یکی از موارد

زیر باشد :

الف : انتقال یونی تحت اثر یک گرادیان پتانسیل الکتریکی باشد .

ب : انتقال نفوذی تحت یک گرادیان پتانسیل شیمیایی می باشد .

ج : همرفت^۳ (حرکت نسبی الکتروود و الکتروولیت) که می تواند یکی از دو مورد زیر باشد :

۱ - جابجایی آزاد (که در اثر اختلاف دانسیته یا اختلاف دما ایجاد می شود) .

۲ - جابجایی در اثر نیرو (جریان) .

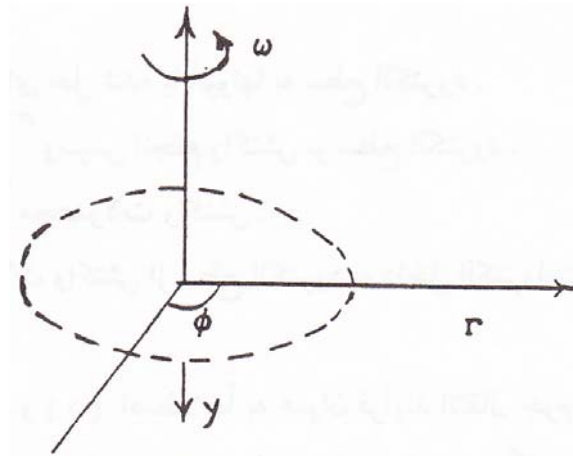
^۱ Adsorption

^۲ Desorption

^۳ Convection

برای درک مفهوم تحلیلی الکترو دیسک چرخان این الکتروود را به صورت یک لایه افقی

نامحدود در دستگاه مختصات قطبی y, θ, r همانند شکل (۱۵-۴۲) فرض می کنیم [۹۰].



شکل ۱۵-۴۲ : مختصات استوانه ای - قطبی برای درک روابط الکتروود چرخان

سطح الکتروود بر صفحه $y = 0$ منطبق می باشد. این الکتروود حول محور ($r = 0$) با

سرعت زاویه ای ω

در یک مایع تراکم ناپذیر که از دو طرف نامحدود است می چرخد. تئوری الکتروود چرخان

به وسیله لویچ^۱ در سال ۱۹۴۲ منتشر شد [۹۱].

معادله جابجایی نفوذی در دستگاه قطبی به صورت زیر است :

(۱۵-۱۱)

$$V_r \left(\frac{\delta c}{\delta r} \right) + V_\theta \left(\frac{\delta c}{\delta \theta} \right) + V_y \left(\frac{\delta c}{\delta y} \right) = D \left[\frac{\delta^2 c}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 c}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta c}{\delta y} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 c}{\delta \theta^2} \right]$$

^۱ Levich

c در این معادله عبارتست از غلظت ذرات با واحد (mol/cm^3) و D ضریب نفوذ ذرات انتقال یافته بر حسب (cm^2s^{-1}) می باشد . با فرض اینکه C فقط بستگی به مختصات به وجود آمده در اثر تقارن محوری باشد و فقط در طول یک خط عمود بر سطح دیسک تغییر کند ، D بستگی به غلظت نداشته و سطح دیسک صاف و همگن خواهد بود . معادله انتقال جرم به صورت معادله زیر است :

(۱۵-۱۲)

$$D \frac{\delta^2 c}{\delta y^2} = Vy \frac{\delta c}{\delta y}$$

که Vy مؤلفه افقی سرعت سیال (Cms^{-1}) می باشد . شرایط مرزی به صورت زیر است :

$$C = C_b \quad y \rightarrow \infty \quad \text{هنگامی که}$$

$$C = 0 \quad y = 0 \quad \text{هنگامی که}$$

که C_B غلظت حجمی^۱ ذرات انتقال یافته می باشد .

معادله (۱۵-۱۲) به صورت $c = f(y)$ می تواند حل شود (با در نظر گرفتن یا

شارحدی J_1 ، به یک واحد سطح) [۱۳۹] .

(۱۵-۱۳)

$$J_L = D \left(\frac{\delta c}{\delta y} \right)_{y=0} = D \left(\frac{C_b - 0}{\delta} \right)$$

δ ضخامت لایه نفوذی می باشد که به وسیله واکنش زیر به دست می آید :

^۱ Bulk concentration

(۱۵-۱۴)

$$\delta = 1.6 \left(\frac{D}{\nu} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\nu}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}}$$

دانسیتیه جریان حدی در دیسک چرخان به وسیله معادله (۱۵-۱۵) بیان می شود :

(۱۵-۱۵)

$$i_L = nFJ_L = 0.620nFD^{\frac{2}{3}}\nu^{\frac{-1}{6}}\omega^{\frac{1}{2}}C_b$$

که ν گرانیوی جنبشی (تقریباً برابر با $(10^{-2} \text{ Cm}^2 \text{ s}^{-1})$)، سرعت زاویه ای (rad s^{-1}) و n تعداد مول الکترونهاي انتقال یافته در هر مول ذرات ، F ثابت فارادی و متغیرهای باقیمانده قبلاً تعریف شدند [۱۵۱].

به عقیده لویچ این معادله فقط برای جریان لایه ای به کار می رود . هنگامی که عدد رینولد^۱ (Re) کمتر از ۱۰ باشد جابجایی عادی^۲ در محلول نقش مهمی را بازی می کند و باید در تجزیه منظور شود . عدد رینولد بزرگتر از ۱۰^۳ می تواند ایجاد اغتشاش^۳ کند، انحراف دیگر جریانهای آزمایشگاهی از مقادیر تئوری در دیسکهای چرخانی که اثر لبه ای^۴ ایجاد می کنند، می باشد [۹۲-۹۴].

معادله (۱۵-۱۵) بیان کننده این است که دانستیه جریان حدی تحت شرایط کنترل نفوذی متناسب با جذر سرعت چرخش دیسک می باشد . بسیار از افرادی که در این زمینه کار

کرده اند عملاً نشان داده اند که این حدس درست می باشد ، بنابر این :

^۱ Reynolds number
^۲ Natural convention
^۳ Turbulence
^۴ Edge effects

(۱۵-۱۶)

$$i_L = K \omega^{\frac{1}{2}}$$

با رسم i بر حسب $\omega^{\frac{1}{2}}$ یا $1/i$ بر حسب $\omega^{-\frac{1}{2}}$ خط صافی بدست می آید که از مبدا می گذرد و شیب آن

k یا $1/k$ می باشد. از این مقدار می توان برای تخمین زدن ضریب نفوذ (D) استفاده کرد.

شکل (۱۵-۴۳-a) و (۱۵-۴۳-b) رسم i بر حسب $\omega^{\frac{1}{2}}$ و $1/i$ بر حسب $\omega^{-\frac{1}{2}}$ تحت این شرایط را نشان می دهد.

در بعضی از نمونه ها دانسیته جریان از جمع دو یا چند واکنش حاصل می شود. برای مثال در حالتی که یک واکنش تحت کنترل فعالیت باشد و واکنش دیگر تحت کنترل نفوذ می باشد رابطه خطی دانسیته جریان حدی با سرعت زاویه ای دیگر صدق نمی کند. بنابر این جریان کلی عبارتست از ترکیب کنترل فعالیت و نفوذی. I_D ممکن است به صورت:

(۱۵-۱۷)

$$I_D = I_a + I_d$$

که I_a جریان فعالیت می باشد که بر روی جریان کلی تاثیر دارد و بستگی به نرخ چرخش دارد I_d مؤلفه نفوذی می باشد که بستگی خطی به ریشه دوم سرعت چرخش دارد. بنابر این I_D به سرعت زیر نوشته می شود:

(۱۵-۱۸)

$$I_D = C + K \omega^{\frac{1}{2}}$$

که C و K در پتانسیل معین ثابت می باشد .

اثر فیلم سطحی روی الکتروود تحت کنترل انتقال جرم

بحث زیر درباره اثر فیلم سطحی روی کنترل انتقال جرم برای $1/i$ بر حسب $\omega^{-1/2}$ که به صورت عملیات ریاضی می باشد خیلی ساده شده است . اگر سطح الکتروود با لایه ای پوشیده شده باشد ، این لایه مانعی برای نفوذ ذرات می باشد . شکل (۱۵-۴۴) و (۱۵-۴۵) را در نظر بگیرید . در حالت پایدار انتقال ذرات از لایه نفوذی باید برابر با انتقال از میان لایه باشد . با فرض اینکه غلظت سطح $C_s = 0$ ، با به کار بردن معادله

(۱۵-۱۲) بدست می آوریم :

(۱۵-۱۹)

$$\frac{D_f}{\delta_f}(C_1 - 0) = \frac{D_o}{\delta_o}(C_b - C_1)$$

بنابر این :

(۱۵-۲۰):

$$C_1 = \frac{D_o \delta_f C_b}{D_f \delta_o + D_o \delta_f}$$

جریان برابر خواهد شد با

(۱۵-۲۱)

$$i_L = nF \frac{D_f}{\delta_f}(C_1 - 0)$$

جایی که δ_o هست :

(۱۵-۲۲)

$$\delta_o = 1.61 D_o^{\frac{1}{3}} \omega^{\frac{-1}{2}} \nu^{\frac{1}{6}}$$

بنابر این :

(۱۵-۲۳)

$$\frac{1}{i} = \left(\frac{1}{nFA C_b} \right) \left(\frac{\delta_f}{D_f} + \frac{\delta_o}{D_o} \right)$$

با استفاده از معادله (۱۵-۱۵) و (۱۵-۲۳) معادله (۱۵-۲۴) بدست می آید :

(۱۵-۲۴)

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{i_1} \left(\frac{1}{nFA C_b} \right) \left(\frac{\delta_f}{D_f} \right)$$

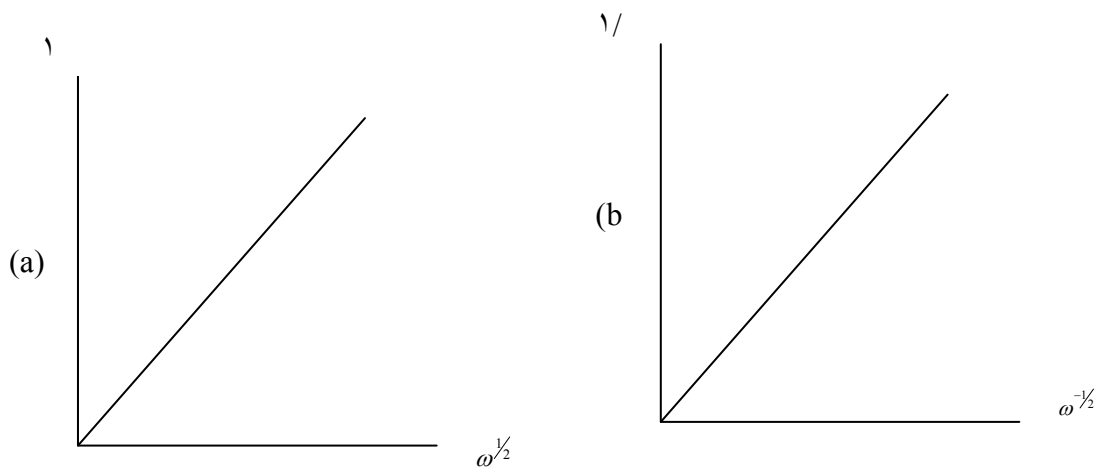
رسم i بر حسب $\omega^{\frac{1}{2}}$ مانند آنچه در شکل (a-۱۵-۲۴) مشاهده می شود خطی نخواهد بود

ولی هنگامی که $1/i$ بر حسب $\omega^{-\frac{1}{2}}$ برای این حالت رسم شود یک خط راست با شیب $1/K$

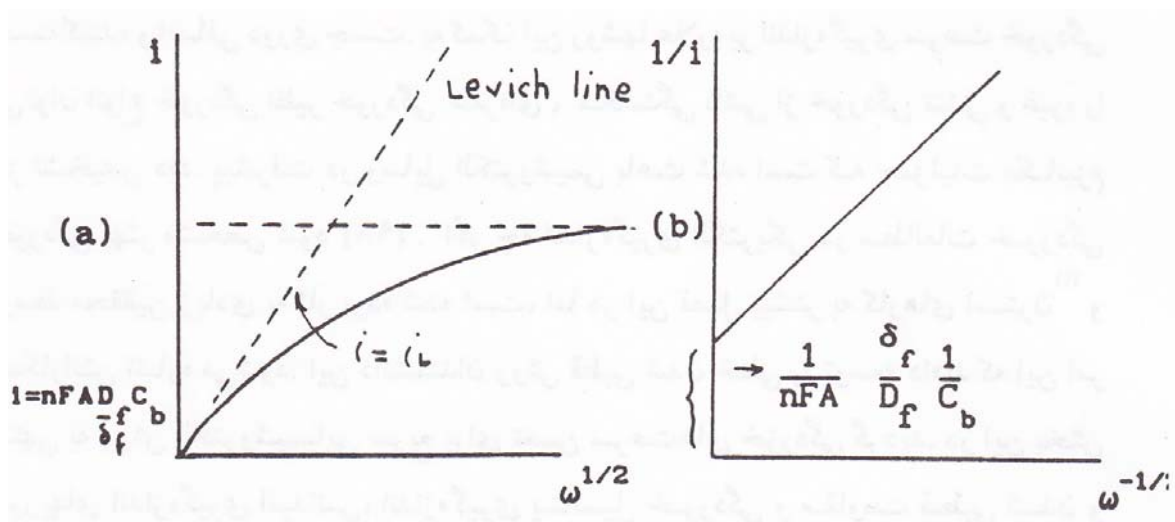
بدست می آید شکل (b-۱۵-۲۴) را ملاحظه فرمایید . اگر C_b یا A کاهش یابد شیب خط

افزایش می یابد ، ولی هنگامی که δ_f افزایش یا D_f کاهش یابد، این افزایش قطع می شود

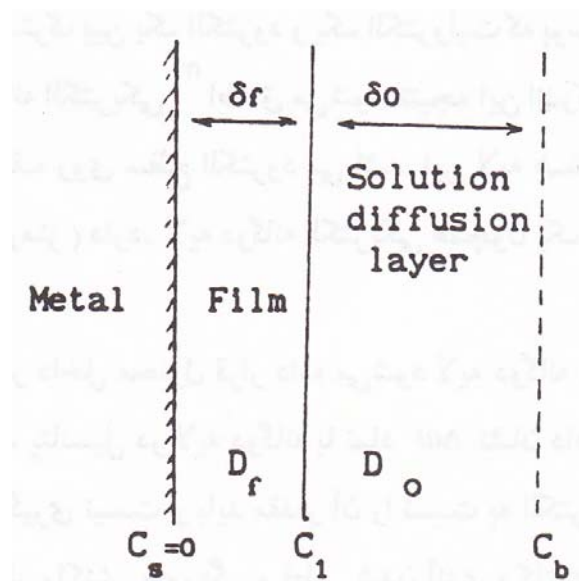
[۹۷-۹۵] .



شکل (b, a - ۱۵-۴۳) رسم i بر حسب $\omega^{1/2}$ و $1/i$ بر حسب $\omega^{-1/2}$ زمانی که فرآیند تحت کنترل انتقال جرم باشد.



شکل (b/a - ۱۵-۴۴) اثر فیلم سطحی در رسم $1/i$ بر حسب $\omega^{1/2}$ و $1/i$ بر حسب $\omega^{-1/2}$



شکل ۴۵-۱۵: دیاگرام شماتیکی لایه نفوذی محلول و فیلم تشکیل شده روی سطح فلز [۸۸]

۸-۱۵- تئوریهای اندازه گیری الکتروشیمیایی

به هر روش اندازه گیری میزان خوردگی که مبنای آن بر پایه واکنش الکتروشیمیایی خوردگی باشد، اندازه گیری الکتروشیمی اطلاق می شود. از اندازه گیریهای الکتروشیمیایی می توان برای ارزیابی خوردگی فلزات و آلیاژها استفاده نمود و به این طریق از آزمایشهای خسته کننده و اضافی دوری جست. به کمک این روشها علاوه بر اندازه گیری سرعت خودگی می توان انواع خوردگی نظیر خوردگی حفره ای، شکستگی ناشی از خوردگی تنش و غیره را نیز تشخیص داد. پیشرفت در وسایل الکتروشیمی باعث شده است که جزئیات مکانیزم خوردگی بهتر مشخص شود [۹۸]. اگر چه اندازه گیری الکتریکی در مطالعات خوردگی توسط محققین زیادی به کار برده شده است، اما در این فصل بیشتر

به کارهای استرن^۱ و همکارانش اشاره می شود. این دانشمند روش قطبی شدن خطی را توسعه دادند که این امر منتهی به روش الکتروشیمیایی سریع برای تعیین سرعت های خوردگی گردید. در این بخش تئوریهای اندازه گیری امپدانس، اندازه گیری پتانسیل خوردگی و مقاومت قطبی شدن و الکتروددیسک چرخان بررسی می شود تا مهندسين و محققين علاقه مند با تئوریهای این روش ها آشنا شوند.

تمامی روش های آزمایشی الکتروشیمیایی در تعیین خواص لایه دوگانه الکتریکی درگیر هستند. به فصل مشترک بین الکتروود و یک الکترولیت که بوسیله اندرکنش بار - بار بوجود می آید، لایه دوگانه الکتریکی^۲ اطلاق می شود. نتیجه این اندرکنش بوجود آمدن یک دسته یونهای با بار مختلف روی سطح الکتروود

می باشد. این لایه ضخامتی در حدود 10^{-7} سانتیمتر (معادل یک نانومتر) دارد. لایه دوگانه الکتریکی همچون یک خازن الکتریکی عمل می کند [۹۹].

هنگامی که فلز در داخل محلول قرار داده می شود لایه دوگانه الکتریکی در روی آن تشکیل می گردد. اختلاف پتانسیل در لایه دو گانه با نماد $\Delta\omega$ نشان داده می شود. مقدار $\Delta\omega$ به طور مطلق قابل اندازه گیری نیست و باید مقدار آن را نسبت به الکتروود مرجع اندازه گیری نمود. مقدار $\Delta\omega$ به خاطر واکنش خوردگی و قطبی شدن آندی و کاتدی افزایش می یابد.

لایه دوگانه الکتریکی ممکن است به وسیله یک خازن و مقاومت نشان داده شود که این خازن و مقاومت به طریق موازی بهم متصل شده اند. با استفاده از اندازه گیری امپدانس

^۱ Stern

^۲ Electrochemical double layer

می توان اطلاعاتی راجع به طبیعت این لایه بدست آورد . از روش امپدانس اخیراً برای مطالعات الکتروشیمیایی و همچنین تحقیقات خوردگی یعنی هم در زمینه علوم شیمی و هم در زمینه علوم مهندسی خوردگی استفاده فراوانی می گردد [۱۰۰] . متداولترین کاربردهای امپدانس را می توان به صورت زیر عنوان کرد [۱۰۰] :

۱) اندازه گیری پتانسیل خوردگی (E_{cor}) در حالت پایا

۲) اندازه گیری تغییرات (E_{cor}) با زمان

۳) اندازه گیری شیب ($E-i$) در طول قطبی شدن در دانسیته جریان ثابت (گالوانواستات)

۴) اندازه گیری شیب های ($E-i$) در طول قطبی شدن در پتانسیل (پتانسیواستات)

۵) اندازه گیری الکترو شیمیایی امپدانس تحت شرایط پتانسیل متغیر به صورت یک تابعی از فرکانس .

۶) اندازه گیری اغتشاشات (نویز)^۱ الکتروشیمیایی : نوسانات پتانسیل آزاد یا نوسانات جریان ، زمانی که پتانسیل ثابت می ماند .

۱-۸-۱۵- تئوریهای اندازه گیری امپدانس

درچند سال اخیر علاقه به استفاده از اندازه گیری امپدانس برای بدست آوردن اطلاعات راجع به طبیعت فصل مشترک الکترولیت - الکتروود افزایش یافته است . این روش در بسیاری از شاخه های علم خوردگی استفاده می شود . همچنین در محلولهای آبی که دارای هدایت بسیار کمی می باشد و به وسیله روش D.C

^۱ Noise

نمی توان آنها را مورد مطالعه قرار داد ، روش امپدانس کاربرد دارد . (مزیت دیگر روش A.C نسبت به روش پلاریزاسیون D.C این است که در این روش چنانچه مقاومت اهمی بالا باشد ، نظیر مقاومت موجود در روی پوششها و رنگها می توان از آن استفاده نمود) [۱۰۱].

روش امپدانس A.C ممکن است برای تعیین ثابت های نفوذ^۱، مقاومت محلول ، مقاومت انتقال بار ، ظرفیت لایه دوگانه به کار رود [۱۰۱]. همچنین در بتن های مسلح ، الکترولیت های آلی یا معدنی می تواند استفاده شود . [۹۱] روش امپدانس A.C حساسیت الکتروود را به نوسانات ولتاژهای ناچیز که به صورت سینوسی می باشد (حدود ۱۰ mV +) مورد تجزیه و تحلیل قرار می دهد .

اطلاعات بیشتر راجع به مکانیزم خوردگی را می توان از دیاگرام امپدانس به دست آورد [۱۰۲].

۱-۱-۸-۱۵- مفهوم اساسی امپدانس

سطح الکتروود در حال خورده شدن را می توان ترکیبی از مدارهای الکتریکی مانند مقاومت ، خازن و القا کننده دانست . با اعمال یک جریان متناوب به این اجزا با استفاده از قانون اهم ($V = R \cdot I$) جریان حاصل شده را می توان بدست آورد .

R در این فرمول عبارتست از مقاومت که با مقاومت ظاهری (χ) جایگزین می شود بنابراین خواهیم

^۱ Diffusion constants

داشت :

$$(15-25)$$

$$v_{\max} = I_{\max} \cdot x$$

$$(15-26)$$

$$x_L = j\omega L, X_C = \frac{1}{j\omega C}, X_R = R$$

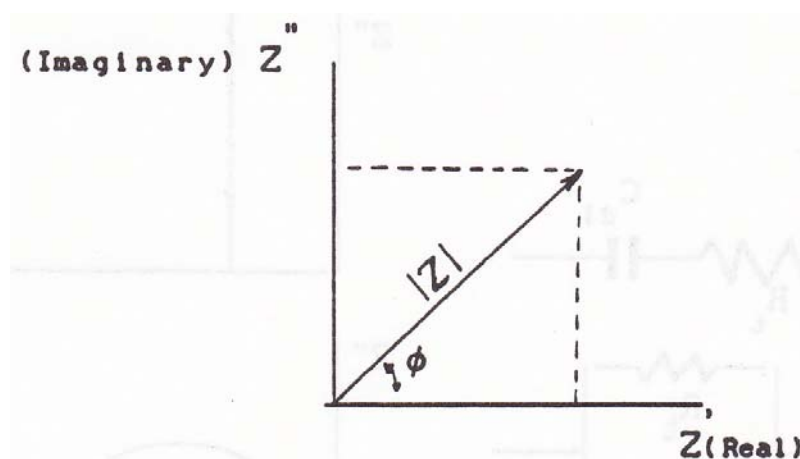
$$\omega = 2\pi f = \text{فرکانس زاویه ای}$$

$$R = \text{مقاومت} \quad C = \text{ظرفیت خازن} \quad L = \text{ضریب القایی}$$

j نیز یک عدد مختلط و $(j = \sqrt{-1})$ می باشد با استفاده از این مقادیر مقاومت ظاهری یا

امپدانس حاصل از ترکیب این مقاومت‌های ظاهری را می توان از روی طرح نایکوسیت^(۲)

شبيه به نمودار شکل (۱۵-۴۶) بدست آورد .



شکل ۱۵-۴۶ : طرح نایکوسیت یا صفحه مبهم (ترکیب) امپدانس^۱

^۱ Complex plan impedance

امپدانس Z را می توان با استفاده از مقدار $|Z|$ و زاویه \varnothing تعریف کرد . با استفاده از یک

مقدار موهومی و یک مقدار حقیقی (Z', Z'') تعریف می شود :

$$Z'' = Z \sin \varnothing \quad (15-27)$$

$$Z' = Z \cos \varnothing$$

از روابط بالا دیده می شود که مقاومت ظاهری خازنی و القایی به فرکانس بستگی دارد و

حد آن برابر با :

$$W \rightarrow 0, \quad X_c \rightarrow \infty, \quad X_L \rightarrow 0 \quad \text{وقتی که}$$

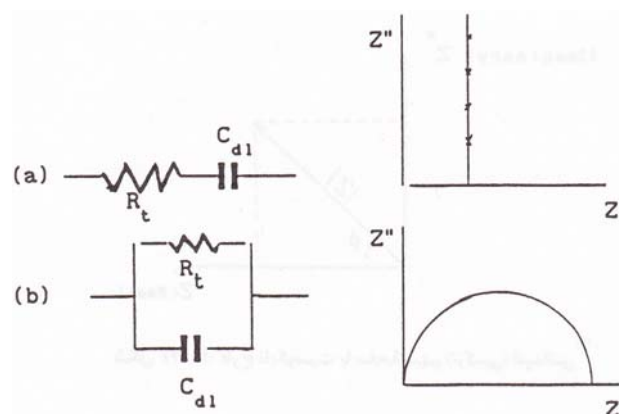
$$W \rightarrow \infty, \quad X_c \rightarrow 0, \quad X_L \rightarrow \infty \quad \text{همچنین هنگامی که}$$

این مطلب را می توان به صورت یک صفحه ترکیبی مانند شکل (a-15-47) و (b-15-47)

نشان داد .

یکی از این دو نمودار برای حالتی است که مقاومت و خازن با هم سری باشند و نمودار

دیگر برای وقتی است که مقاومت و خازن به صورت موازی قرار گرفته باشند .



شکل ۱۵-۴۷ : a) نمودار ترکیب مقاومت و خازن در حالت سری

b) نمودار ترکیب مقاومت و خازن در حالت موازی

۲-۱-۸-۱۵- مدار معادل

برای بررسی تغییرات مقاومت ظاهری با فرکانس لازم است که یک مدار معادل فرضی در نظر گرفته شود .

راندلس^۱ [۱۰۶] و بعد از او اسلویترز^۲ [۱۰۷] اولین افرادی بودند که برای فرایندهای الکتروشیمیایی چنین مدار معادلی را فرض کردند .

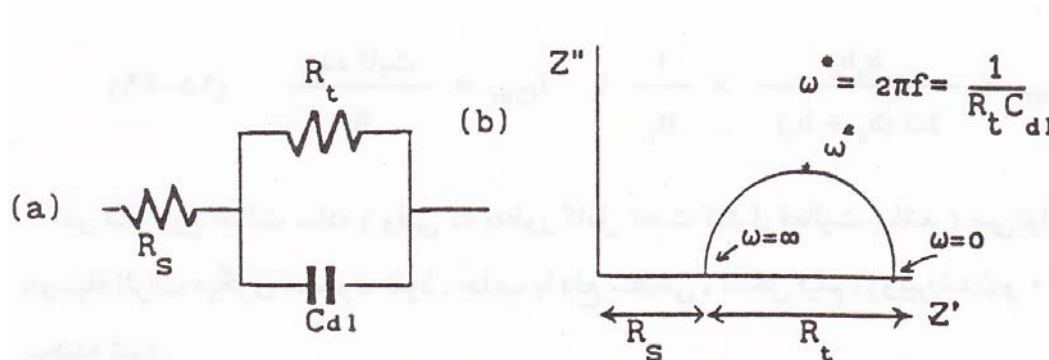
مدار معادل راندلس در شکل (a-۴۸-۱۵) نشان داده شده است . در این مدار یک مقاومت R_s دیده می شود که بیان کننده مقاومت محلول ، فیلم های حاصل شده از خوردگی می باشد . (این مقاومت از ترکیب با مقاومت R_t و خازن C_{dl} که به صورت موازی می باشند بیان کننده فصل مشترک خورده شدن می باشد ، C_{dl} ظرفیت خازنی لایه دوگانه الکترو شیمیایی می باشد که نتیجه جذب یونها و مولکولهای آب به سطح می باشد . R_t نیز مقاومت انتقال بار^۳ است که تعیین کننده نرخ واکنش خوردگی و کنترل کننده انتقال الکترون در عرض فصل مشترک می باشد .

نمودار ترکیبی آن در شکل (a-۴۸-۱۵) نشان داده شده . این شکل به طور شماتیک رفتار این مدار را نشان می دهد .

^۱ Randles

^۲ Sluyters

^۳ Charge transfer resistance



شکل ۱۵-۴۸: نمودار ساده ای از مدار معادل راندلس و نتیجه آن

مقاومت انتقال بار (R_t) را می توان با یک نیم دایره بدست آورد ، مقاومت محلول (R_s) نیز با بدست آوردن فاصله نقطه ابتدایی محور تا نقطه ای که فرکانس بی نهایت می شود ، حاصل می شود . ظرفیت خازنی لایه دوگانه را می توان از حداکثر فرکانس زاویه ایی که در شکل (a-۱۵-۴۸) به طور شماتیک نشان داده شده به دست آورد .

$$(15-28)$$

$$W^* = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{R_t C_{dl}}$$

τ یک ثابت زمانی می باشد .

عموماً به نظر می رسد که فرآیند انتقال بار در محدوده فرکانس ۰٫۱ Hz تا ۱۰۰۰ Hz صورت می گیرد ، در صورتی که مقاومت محلول در فرکانس بالاتر از ۱ KHz می تواند اندازه گیری شود [۱۰۸] .

در یک سیستمی که تحت کنترل فعالیت می باشد $R_t + R_s$ را می توان به طور کمی با روش مقاومت پلاریزاسیون خطی^۱ اندازه گرفت . در این حالت R_t بستگی به انرژی اکتیواسیون

^۱ Linear polarization resistance

انتقال بار^۱ (با فرض اینکه کنترل کننده سرعت باشد) دارد که در این حالت معادل مقاومت

پلاریزاسیونی (R_p) خواهد بود که از اطلاعات D . C به دست می آید [۹۷].

$$I_{Corr} = \frac{1}{R_t} \quad (15-29)$$

$$I_{Corr} = \frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)} \times \frac{1}{R_t} \text{ یا}$$

در عمل این حالت ساده (وقتی که به طور کامل تحت کنترل فعالیت باشد) می تواند به

وسیله اثرات دیگری همچون نفوذ ، جذب یا دفع سطحی ، تشکیل فیلم ، روپین شدن و ...

پیچیده شود .

هنگامی که اثرات غلظتی (نفوذ ذرات) وجود داشته باشد یک جزء دیگر به مدار اضافه

می شود (Z_w) که این جزء با R_t سری می باشد . این مطلب در شکل (a - ۴۹-۱۵) نشان

داده شده است . این پدیده را امپدانس واربرورگ^۲ [۱۰۹] می نامند که مقاومت ظاهری

فرآیندهای مربوط به انتقال جرم را شرح می دهد .

$$(15-30)$$

$$W = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} + J \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}}$$

در این فرمول σ ضریب واربرورگ می باشد . برای سیستمهای رداکس^۳ ضریب واربرورگ

به وسیله فرمول زیر محاسبه می شود [۱۱۰] .

^۱ Crge transfer activation energy

^۲ Warburg impedance

^۳ Redox System

(۱۵-۳۱)

$$\sigma = \frac{RT}{n^2 F^2 \sqrt{2}} \left[\frac{1}{C_o^b D_o^{1/2}} + \frac{1}{C_R^b D_R^{1/2}} \right]$$

برای واکنش



C_o^b = غلظت حجمی نمونه اکسید شده

C_R^b = غلظت حجمی نمونه احیا شده

D_o = ضریب نفوذ نمونه اکسید شده

D_R = ضریب نفوذ نمونه احیا شده

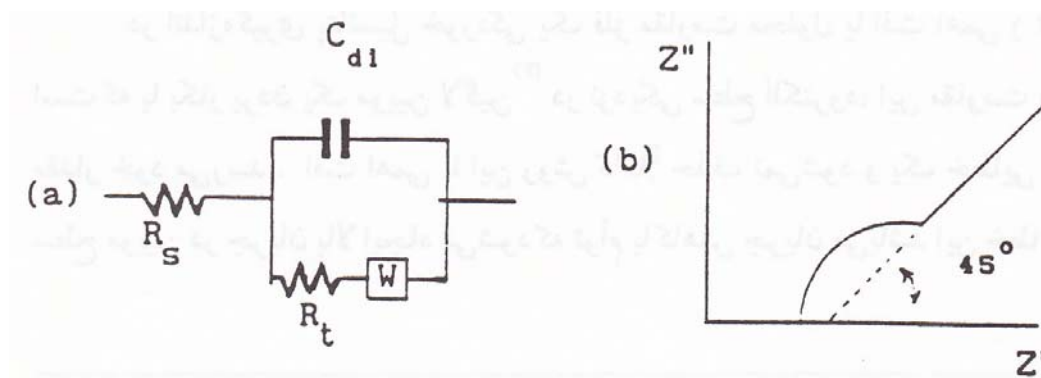
n = تعداد الکترون منتقل شده

همچنین R ثابت عمومی گازها ، T دمای مطلق و F ثابت فارادی می باشد .

تحلیل این مدار در شکل (a- ۱۵-۴۹) مه شامل انتقال بار و نفوذ می باشد نشان داده شده است .

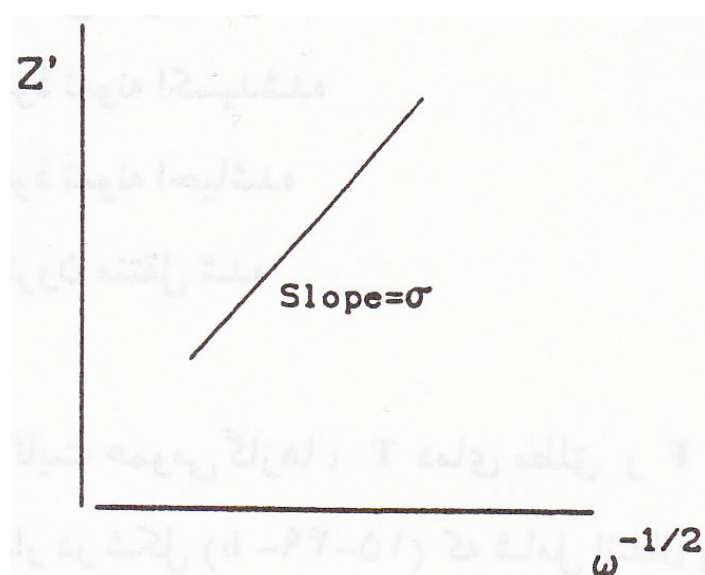
در ساده ترین حالت ، امپدانس واربرگ به وسیله یک خط با زاویه 45° نسبت به محور حقیقی صفحه نایکوئیست نشان داده می شود . مطلب در فرکانس های پایین مشاهده می

شود ، بنابراین $\frac{1}{\sqrt{\omega}}$ در فرکانس های بالا کوچک است [۱۱۱] .



شکل (b و a-۴۹-۱۵): مدار ساده امپدانس وارپورگ و تحلیل آن

ضریب وارپورگ از طریق رسم منحنی امپدانس حقیقی^۱ (Z') بر حسب معکوس جذر فرکانس زاویه ای ($\omega^{-1/2}$) و بدست آوردن شیب آن می توان تعیین شود [۱۰۱]. این شیب را می توان از روش «حداقل مربعات»^۲ با منحنی مربوطه بدست آورد. این مطلب در شکل (۱۵-۵۰) دیده می شود [۱۱۱].



شکل ۱۵-۵۰: رسم Z' بر حسب $\omega^{-1/2}$ برای بدست آوردن ضریب وارپورگ (از اطلاعات امپدانس)

^۱ Real impedance

^۲ Least square

۲-۸-۱۵- تئوری اندازه گیری پتانسیل خوردگی و مقاومت قطبی شدن^۱

پتانسیل یک فلز به تنهایی قابل اندازه گیری نیست و نیاز به یک الکتروود مرجع نظیر الکتروود جیوه و یا نقره دارد. کار آبی الکتروود هیدروژن به دلیل مشکلات استفاده از آن بسیار محدود می باشد [۱۱۲].

در اندازه گیری پتانسیل خوردگی یک فلز مقاومت محلول یا افت اهمی (IR) مؤثر است که با بکار بردن یک مویین لاگین^۲ در نزدیکی سطح الکتروود، این مقاومت به حداقل مقدار خود می رسد. افت اهمی با این روش کاملاً حذف نمی شود و یک خطایی به وسیله سطح مویین در جریان بالا ایجاد می شود که توأم با کاهش جریان می باشد این خطای مربوط به افت اهمی در ناحیه تافل حذف می شود. بایستی توجه نمود که برای هر دانسیته جریان ضریب تصحیح اعمال گردد. این ضریب تصحیح بستگی به مقاومت محلول دارد. محلولهای با مقاومت بالا خطای زیادی ایجاد می کنند، در حالی که در محلهایی که دارای هدایت الکترولیتی می باشند خطای بسیار کمتری ایجاد می شود. در این حالت مویین لاگین همراه با یک پل نمکی و الکتروود مرجع استفاده می شود.

برای مطالعات رفتار قطبی شدن بایستی از پیللهای سه الکتروودی که شامل الکتروود مرجع، الکتروود کارگر و الکتروود کمکی می باشد بهره جست. بمنظور کاهش اثرات مقاومت محلول بهتر است از مویین لاگین استفاده شود. ضمناً برای بررسی اثرات گازهای مختلف مانند

^۱ Polarisation Resistance

^۲ Luggin capillary

نیترژن و اکسیژن پیل‌های مورد نظر بایستی به نحوی ساخته شوند تا ورود چنین گازهایی را به سیستم امکان پذیر نمایند . ضمن آنکه در این پیلها ،

می توان از هم زن مغناطیسی برای بهم زدن محلول استفاده نمود [۱۱۲] .

شکل (۵۱-۱۵) پیل شیشه ای را نشان می دهد که در استاندارد ۱۹۸۷ : ASTM GS به عنوان پیل استاندارد معرفی شده است . از این پیل برای مطالعات اساسی خوردگی و آزمایشات مربوطه استفاده می شود .

با وجود این از الکترودهای مرجع کالومل اشباع و نقره - کلرید نقره و مس - سولفات مس در مطالعات خوردگی و دیدبانی خوردگی استفاده زیادی می شود . برای کاهش پتانسیل اتصال مایع از پیل نمکی استفاده می شود و در بعضی مواقع از این پتانسیل چشم پوشی می شود [۱۱۲] .

در مورد ارتباط بین پتانسیل خوردگی با پتانسیل های تعادلی و سینتیک واکنشهای کاتدی و آندی در بخش های قبلی توضیحاتی داده شده است ، اما در این بخش لازم است که مثالهایی از کاربرد آن در آزمایشهای خوردگی ارائه شود . پوربه^۱ یک ارزیابی از اندازه گیری های پتانسیل در ارتباط با ترمودینامیک و سینتیک خوردگی بعمل آورده است .

توصیف پتانسیل خوردگی : هنگامی که دو فلز با هم جفت^۲ شده باشند یکی از آنها نسبت به دیگری نقش آند را خواهد داشت . و پتانسیل خوردگی از اختلاف پتانسیل کاتد و آند بدست می آید : به طور مشابه ، اثر میکروسکپی غیر یکنواختی و ناهم‌هنگی در آلیاژها سبب ایجاد

^۱ Puorbaix

^۲ Couple

نواحی کوچک آندی و تغییر پتانسیل این نواحی نسبت به زمینه آلیاژ می شود و پتانسیل خوردگی در آلیاژ قابل اندازه گیری است .

اسمیت^۱ و پینگل^۲ آزمایشاتی را در زمینه پتانسیل خوردگی انجام دادند . آنها سطح فلز را با اتیل سلولز پوشش دادند. سپس آن را خشک نمودند و نواحی از پوشش سطح را به طور انتخابی سوراخ کردند . سوراخهایی به قطر $35 \mu m$ روی سطح ایجاد کردند . سپس پتانسیل خوردگی را به وسیله میکروالکترودهایی اندازه گیری نمودند. میکروالکترودهایی از الکتروده نقره به همراه نوکهای مویین کمتر از $15 \mu m$ برای اندازه گیری پتانسیل خوردگی در این موارد تعبیه کردند [۱۱۳] .

آقای کلیری^۳ میکروالکتروده شیشه ای را برای اندازه گیری pH طراحی کرده است . همچنین به کمک میکروالکترودهایی به اندازه قطر نوک حدود $0.2 \mu m$ می توان پتانسیل خوردگی در مرز بین AI-Mg و AI-Cu را اندازه گیری نمود [۱۱۴] .

ارتباط بین پتانسیل - زمان به طور وسیعی برای مطالعه تشکیل و شکست لایه سطحی فلز به کار برده می شود ، به طوری که تشکیل و یا شکست این لایه همراه با کاهش یا افزایش پتانسیل خوردگی است .

می^۴ خوردگی برنج ۷۰/۳۰ و برنج آلومینیومی را در آب دریا مطالعه کرد و نشان داد که چگونه با ایجاد خراش یک افت ناگهانی در پتانسیل ایجاد می شود ، حفره موجود در فولاد

^۱ Smith

^۲ Pingel

^۳ Cleary

^۴ May

زنگ نزن در واحدهای شیمیایی ممکن است با یک کاهش ناگهانی در پتانسیل مشخص شود [۱۱۵].

هوار^۱ و همکارانش تغییرات پتانسیل را برای مطالعه شکست لایه و اصلاح آن در ضمن خوردگی شکستگی تنشی فولاد زنگ نزن در محلول کلریدمنیزیم اشباع در حال جوش بکار بردند [۱۳۰]. اخیراً دانشمندان از اندازه گیریهای پتانسیل برای پیشگویی محصولات خوردگی آلیاژهای آلومینیم استفاده کرده اند [۱۱۶]. در کتاب ASTM G۵ : ۱۹۸۷ روشهای استاندارد برای اندازه گیریهای آندی پتانسیودینامیک و پتانسیواستاتیک ارائه شده است و همچنین در ASTM G۳ : ۱۹۷۴ نیز روشهای الکتروشیمیایی برای آزمایش خوردگی ارائه شده است.

۱-۲-۸-۱۵- مقاومت قطبی شدن

بدیهی است که از روی میزان پتانسیل خوردگی (E_{Corr}) نمی توان سرعت خوردگی را تعیین نمود و نمی توان محلهای آندی و کاتدی را در یک فلز در حال خورده شدن از هم جدا کرد. همچنین i_{Corr} را نمی توان به وسیله آمپر متر اندازه گیری نمود. قبلاً از روش کاهش وزن برای اندازه گیری سرعت خوردگی استفاده می شد و امروزه از روشهای الکتروشیمیایی برای تعیین سرعت خوردگی استفاده می گردد. بنابراین براساس استنتاج پی ارسون^۲ چوردفیگر^۱ منحنی های قطبی شدن لگاریتمی برای شکستهای پتانسیل می توانند در ارزیابی سرعت خوردگی به کار برده شوند.

^۱ Hoar

^۲ Pearson

با این وجود این روشها به طور عمومی قابل پذیرش نیستند. اسکولد^۲ و لارسون^۳ در مطالعات خوردگی فولاد و چدن در آب طبیعی به ارتباط خطی بین پتانسیل و دانسیته های جریان آندی و کاتدی به کار برده شده پی بردند. اما اهمیت این مشاهده را آقای استرن^۴ و همکارانش درک کردند. آنها قطبی شدن خطی را برای توصیف خطی بودن منحنی $\eta-i$ در ناحیه پتانسیل خوردگی به کار بردند. شیب این منحنی خطی $(\Delta E - \Delta I)$ به نام مقاومت قطبی شدن (R_p) شناخته شد که دیمانیون آن «اهم» می باشد. و این واژه مترادف با قطبی شدن خطی در توصیف استرن - گری^۵ برای ارزیابی سرعت های خوردگی است [۱۱۷].

اساس استرن - گری بر تجزیه منحنی های قطبی شدن واکنش های آندی و کاتدی درگیر در خوردگی فلز قرار دارد و با این فرض که هر دو واکنش را انتقال بار کنترل می کنند و از افت اهمی ضمن اندازه گیری پتانسیل چشم پوشی می گردد بنابراین می توان رابطه زیر را در نظر گرفت [۱۱۸]:

(۱۵-۳۲)

$$\frac{1}{R_p} = \left[\frac{\Delta i}{\Delta E_{Corr}} \right] = 2.3 \frac{b_a + |b_c|}{b_a |b_c|} i_{Corr}$$

^۱ Schwerdtfeger

^۲ Skold

^۳ Larson

^۴ Stern

^۵ Stern - Geary

در رابطه فوق Rp نشان دهنده مقاومت قطبی شدن در نزدیکی پتانسیل خوردگی ba. و خوردگی است ba و b_c ثابت های تافل می باشند. این معادله نشان می دهد که سرعت خوردگی در نزدیک پتانسیل خوردگی با Rp رابطه عکس دارد. در جایی که واکنش کاتدی را انتشار و واکنش آندی را فعالیت کنترل می کند رابطه زیر را داریم [۱۳۵]:

(۱۵-۳۳)

$$\frac{1}{R_p} = \left[\frac{\Delta i}{\Delta E_{Corr}} \right] = \frac{2.3i_{L_1}}{b_a} = \frac{2.3i_{Corr}}{b_a}$$

در رابطه فوق i_L ، حد دانسیته جریان واکنش کاتدی را نشان می دهد و فرض می شود که مقدار آن برابر

$$2.3i_{Corr} \text{ است } (i_L = i_{Corr}).$$

استرن^۱ و ویسترن^۲ نشان دادند که سرعت های خوردگی به دست آمده از روش های مقاومت قطبی شدن با سرعت های خوردگی به دست آمده از روش های کاهش وزن مطابقت دارد. استرن در یک سری از مقالات خود مفهوم قطبی شدن خطی را بخوبی نشان می دهد. بارنات^۳ یک روش آنالیتیکی برای استنتاج قطبی شدن خطی ارائه داد. لئوری^۴ روش ریاضی و گرافیکی را برای استنتاج قطبی شدن خطی به کار برد و نشان داد که این روش، شیوه معتبری برای بررسی سیستم های خوردگی است. بسیاری از دانشمندان اندازه گیری مقاومت قطبی شدن را برای پتانسیل اضافی منفی و مثبت مورد تأکید قرار دادند [۱۱۹].

^۱ Stern
^۲ Weisert
^۳ Barnartt
^۴ Leory

اولدهام^۱ و منسفلد^۲ به طریق دیگری به مسئله خطی بودن قطبی شدن رسیدند ، ولی از کاربرد روش استرن و گری اجتناب کردند . آنها نتیجه گرفتند که به قطبی شدن خطی می توان به سه طریق دسترسی پیدا کرد [۱۲۰] :

a (کنترل افت اهمی IR بیشتر از قطبی شدن خطی باشد

b (مقادیر b_a و b_c شبیه هم باشند .

c (منحنی های $\Delta E - \Delta i$ نزدیک E_{Corr} خطی باشد . در مقاله بعدی ، الدهام و منسفلد نشان دادند که خطی بودن منحنی $\Delta E - \Delta i$ لزومی ندارد و i_{Corr} می تواند از شبیهیهای تانژانت منحنی غیر خطی در پتانسیلهای حدود ۲۰/۳۰ mv مثبت تر و منفی تر از پتانسیل خوردگی اندازه گیری شود . هیکلینگ^۳ که روی خوردگی فولادها تحت شرایط قرار گیری در اتمسفر و تشکیل لایه نازک روی آنها کار می کرد وابستگی زمانی اندازه گیریهای قطبی شدن را مورد بررسی قرار داد و روش گالوانواستات را توسعه داد [۱۲۱] .

جونز^۴ و گر^۵ تئوری قطبی شدن خطی انتقال را با مطالعه سرعتهای خوردگی خیلی پایین توسعه دادند (نظیر خوردگی که روی وسایل جراحی به وجود می آید) . آنها نشان دادند که از اطلاعات مقاومت قطبی شدن می توان برای بررسی انواع خوردگی نظیر خوردگی حفره ای و خوردگی موضعی سود جست [۱۲۲]

^۱ Oldham
^۲ Mansfeld
^۳ Hickling
^۴ Jones
^۵ Grech

ویدل^۱ از روش پل D.C جونز برای جبران خطاهای ناشی از افت اهمی (IR) استفاده کرد و سرعتهای خوردگی را از اطلاعات مربوط مقاومت قطبی شدن در دمای بالا برای آب خالص در راکتورهای هسته ای به دست آورد [۱۲۳].

بوریا^۲ و دیگران از روش مقاومت قطبی شدن برای تعیین سرعت خوردگی مواد رنگ شده استفاده کردند [۱۲۴].

برخی محقق یک سری مقادیری را برای سرعتهای خوردگی دیدبانی از اندازه گیری های مقاومت قطبی شدن به دست آوردند و یک وسیله تجارتي را ارائه دادند [۱۲۴].

۲-۲-۸-۱۵-استنتاج روش قطبی شدن خطی برای اندازه گیری سرعت خوردگی

فرض می شود که :

(۱) جریان خوردگی در مقدار حدود ناحیه تافل برای واکنش آندی و کاتدی اتفاق می افتد و از پتانسیل اضافی انتقال چشم پوشی می گردد .

(۲) پتانسیل خوردگی (E_{Corr}) از پتانسیل های برگشت پذیر واکنش های آندی و کاتدی فاصله زیادی دارد.

(۳) از افت اهمی (IR) در اندازه گیری پتانسیل قطبی شدن چشم پوشی می شود [۱۲۵].

بر طبق نظر الهام و منسفلد خواهیم داشت :

^۱ Wilde
^۲ Bureau

(۱۵-۳۴)

$$\left[\frac{di}{dE}\right]_{E_{Corr}} Z = i_{Corr} \left[\frac{1}{b_a} + \frac{1}{b_c}\right]$$

b_a و b_c نشان دهنده شیبهای تافل در ناحیه آندی و کاتدی در واکنش خوردگی هستند مثلاً

i_{Corr} خطی است و وابسته به مقاومت قطبی شدن (dE/di) در پتانسیل نزدیک به E_{Corr}

است [۱۲۵].

در هر پتانسیل، جریان خالص^۱ به صورت زیر داده می شود.

(۱۵-۳۵)

$$i = i_1^{\text{su}} - |i_1^{\text{su}}| + i_2^{\text{su}} - |i_2^{\text{su}}|$$

در معادله فوق i_1^{u} جریان آندی را برای فلز در حال حل شدن و i_1^{su} جریان کاتدی برگشت

پذیر را نشان می دهد و i_2^{u} جریان کاتدی را برای احیاء واکنشگر کاتدی (اکسیژن، آب

و H_3O^+ حل شده) و i_2^{su} جریان برگشت پذیر را نشان می دهد [۱۲۶].

(۱۵-۳۶)

$$i_1^{\text{u}} = i_{0.2} \exp\left\{\frac{E - E_{r.1}}{b_a}\right\}$$

در معادله فوق $E_{r.1}$ پتانسیل برگشت پذیر را برای واکنش حل شدن آندی، b_a شیب تافل و

$i_{0.1}$ دانستیه جریان مبدل را نشان می دهد و برای واکنش کاتدی مشابه می توان نوشت:

^۱ Net current

(۱۵-۳۷)

$$i_2 = i_{0,1} \exp\left\{\frac{E_{r,2} - E}{b_c}\right\}$$

به طور مشابه ، برای سرعت‌های برگشت پذیر جزئی ممکن است به صورت زیر نوشته شود

i_2 ، اما تحت شرایط فرض شده می توان در اینجا از آنها چشم پوشی کرد . اگر

معادله (۱۵-۳۶) و (۱۵-۳۷) در معادله جایگزین شوند خواهیم داشت :

(۱۵-۳۸)

$$i = i_{0,1} \exp\left\{\frac{E - E_{r,1}}{b_a}\right\} - i_{0,2} \exp\left\{\frac{E_{r,2}}{b_c}\right\}$$

در پتانسیل خوردگی E_{Corr} ، جریان خالص برابر صفر می شود ، زیرا $i_1 = i_2$ بنابراین ۲

ترم سمت راست معادله (۱۵-۳۸) با هم برابر می باشند و برابر با i_{Corr} (دانستیه خوردگی)

هستند . بنابراین ، جایگزینی E در معادله (۱۵-۳۸) به وسیله E_{Corr} به صورت زیر خواهد

شد [۱۲۷] .

(۱۵-۳۹)

$$i_{Corr} - i_{0,1} \exp\left\{\frac{E_{Corr} - E_{r,1}}{b_a}\right\} = i_{0,2} \exp\left\{\frac{E_{r,2} - E_{Corr}}{b_c}\right\}$$

با دیفرانسیل گیری از معادله (۱۵-۳۸) خواهیم داشت :

(۱۵-۴۰)

$$\frac{di}{dE} = \frac{i_{0,1}}{b_a} \exp\left\{\frac{E - E_{r,1}}{b_a}\right\} + \frac{i_{0,2}}{b_c} \exp\left\{\frac{E_{r,2} - E}{b_c}\right\}$$

اگر $E = E_{Corr}$ باشد خواهیم داشت :

(۱۵-۴۱)

$$\left[\frac{di}{dE}\right]_{Corr} = \frac{i_{0,1}}{b_a} \exp\left\{\frac{E_{Corr} - E_{r,1}}{b_a}\right\} + \frac{i_{0,2}}{b_c} \exp\left\{\frac{E_{r,2} - E_{Corr}}{b_c}\right\}$$

ترکیب معادلات (۱۵-۴۰) و (۱۵-۴۱) معادله ای شبیه معادله استرن - گری است . با وجود

این الدهام و منسفلد از معادله (۱۵-۴۰) دوباره دیفرانسیل گرفتند که [۱۴۴] :

(۱۵-۴۲)

$$\frac{d^2 i}{dE^2} = \frac{i_{0,1}}{b_a^2} \exp\left\{\frac{E - E_{r,1}}{b_a}\right\} - \frac{i_{0,2}}{b_c^2} \exp\left\{\frac{E_{r,2} - E}{b_c}\right\}$$

لذا معادله بدست آمد که اثبات می کند فقط در یک نقطه (نقطه تغییر شکل ، برابر با یک شیب

حداقل) منحنی خمیدگی ندارد و به صورت . خطی این مسئله شرح می دهد که [۱۲۸] :

(۱۵-۴۳)

$$\left[\frac{d^2 i}{dE^2}\right]_{E_{Corr}} = \frac{i_{0,1}}{b_a^2} \exp\left\{\frac{E_{Corr} - E_{r,1}}{b_a}\right\} + \frac{i_{0,2}}{b_c^2} \exp\left\{\frac{E_{r,2} - E_{Corr}}{b_c}\right\}$$

و ترکیب این معادله با معادله (۱۵-۳۹) رابطه زیر را می دهد :

(۱۵-۴۴)

$$\left[\frac{d^2 i}{dE^2}\right]_{E_{Corr}} = i_{Corr} \left[\frac{1}{b_a^2} - \frac{1}{b_c^2}\right]$$

برای منحنی $E - i$ در $E = E_{Corr}$ شیب باید خطی باشد . مقدار $\left[\frac{d^2 i}{dE^2}\right]_{E_{Corr}}$ باید صفر باشد ،

اما معادله ۱۵-۴۴ نشان می دهد که اگر $b_a = b_c$ باشد این حالت درست خواهد بود [۱۲۸-۱۲۶] .

۳-۲-۸-۱۵- تعیین همزمان شیب های تافل و سرعت های خوردگی از روی R_p

منسفلد اثبات کرد که برای اندازه گیری I_{Corr} ، نیاز به اندازه گیری $\frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)}$ و R_p می باشد.

معادله استرن-گری به شکل زیر نوشته می شود [۱۲۹]:

(۱۵-۴۵)

$$I_{Corr} = \frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)} \times \frac{1}{R_p} = \frac{B}{R_p}$$

در معادله فوق $B = \frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)}$ و $R_p = \left(\frac{dE}{dI}\right)_{E_{Corr}}$ معادله (۱۵-۴۵) وقتی معتبر است که

ارتباط بین I و E به صورت زیر بیان شود:

(۱۵-۴۶)

$$I = I_{Corr} \left\{ \exp \left[\frac{2.3(E - E_{Corr})}{b_a} \right] - \exp \left[\frac{2.3(E - E_{Corr})}{b_c} \right] \right\}$$

ترکیب معادله (۱۵-۴۵) و (۱۵-۴۶) به صورت زیر خواهد بود:

(۱۵-۴۷)

$$2.3R_p = \frac{b_a b_c}{(b_a + b_c)} \left\{ \exp \left[\frac{2.3\Delta E}{b_a} \right] - \exp \left[\frac{-2.3\Delta E}{b_c} \right] \right\}$$

در معادله فوق $\Delta E = E - E_{Corr}$ است. معادله فوق وابسته به شیبهای تافل است که باید b_c و

b_a از نمودار R_p در مقابل ΔE قابل ارزیابی باشد.

شکل (a-۱۵-۵۱) نمودار تئوری طرف راست معادله (۱۵-۴۸) را در برابر ΔE نشان می دهد که شیب تافل کاتدی ۱۲۰ mV فرض شده است و شیب تافل آنودی برابر ۴۰ و ۶۰ و ۱۲۰ در نظر گرفته شده است [۱۲۹].

همانطوری که ملاحظه می شود وقتی $b_a = b_c$ است تافل در محدوده های بالایی پتانسیل چه به سمت مثبت و چه به سمت منفی نمودار به صورت خطی در می آید ولی وقتی b_a و b_c با هم اختلاف دارند خطی بودن در $\Delta E = 0$ محصور می شود. در شکل (b-۱۵-۵۱) فرض شده که شیبهای تافل با هم برابرند. طرف راست معادله (۱۵-۴۸) در برابر ΔE برای مقادیر مختلف b رسم شده است. (۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ میلی ولت). مقایسه شکل (a-۱۵-۵۱) و (b-۱۵-۵۱) نشان می دهد که چطور خمیدگی نمودارها در پتانسیل های کاتدی، یعنی $\Delta E < 0$ متفاوت هستند. بنابراین رفتار سینتیکی یک فلز در حال خورده شدن بواسطه ترکیبات مختلف و شیب های تافل با این روش، از منحنی های مورد نظر می تواند شکا گیرد. منسفلد این راه عملی (تئوری) را در مورد سیستم $Fe / H_2 SO_4$ از طریق آزمایش تأیید کرده بود [۱۴۷].

منسفلد خاطر نشان کرد، می توان I_{Corr} را از منحنی قطبی شدن از طریق چهار مرحله ذکر شده در زیر بر اساس معادلات ۱۵-۴۴ و ۱۵-۴۶ تعیین کرد [۱۲۸]:

(۱) اندازه گیری R_p از:

(۱۵-۴۸)

$$\left[\frac{dI}{dE} \right]_{E_{Corr}} = R_p^{-1}$$

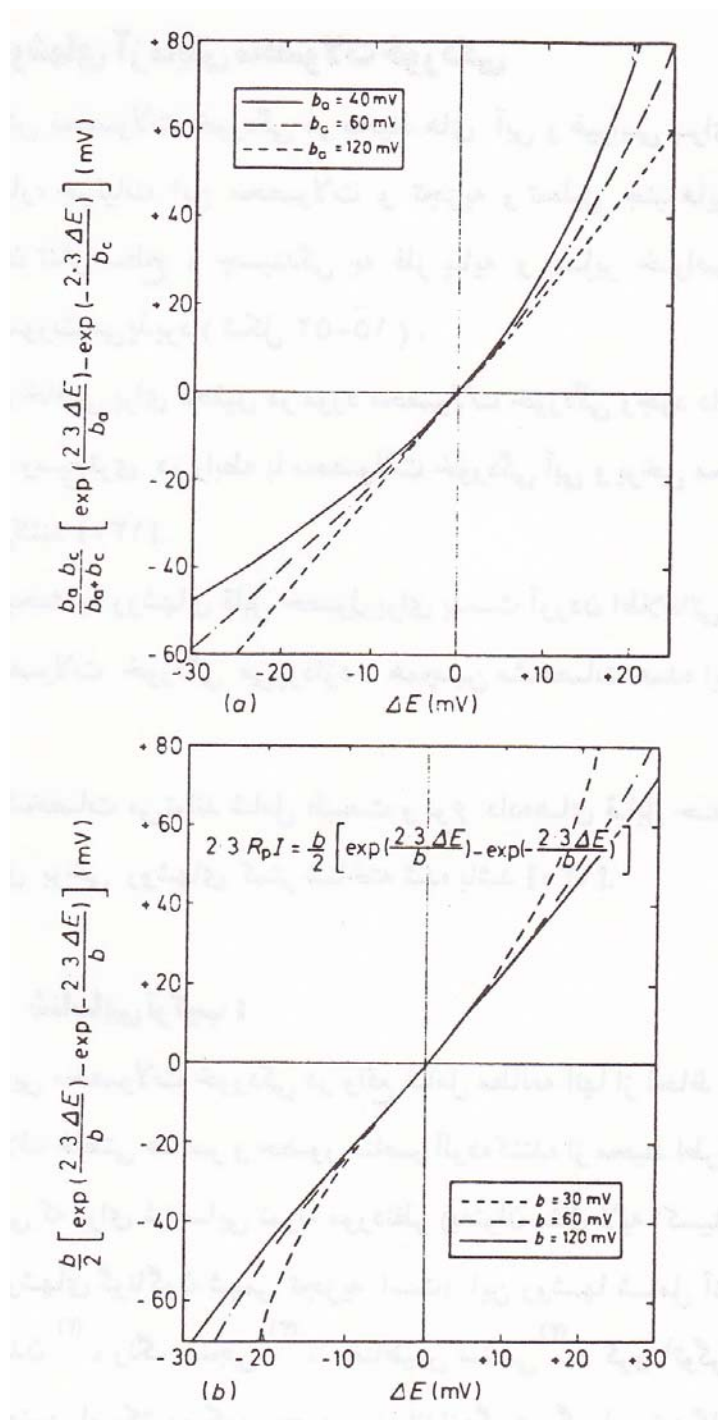
به وسیله رسم یک تانژانت در $\Delta E = 0$ یعنی در E_{Corr}

(۲) جندگانی جریان I اندازه گیری شده در یک مقدار معین ΔE به وسیله $2.3R_p$ و نمودار

$2.3R_p I$ در مقابل ΔE برای مقادیر مختلف .

(۳) اندازه گیری شیب های تافل b_a و b_c به طریق تئوری و عملی .

(۴) محاسبه I_{Corr} از معادله (۴۵-۱۵) با بکار بردن R_p



شکل (a-۵۱-۱۵) و (b-۵۱-۱۵): رسم سمت راست معادله (۴۷-۱۵) بر حسب $\Delta E = E - E_{Corr}$

برای شیبهای تافل مختلف

a) شیب تافل کاتدی (b_c) در ۱۲۰ mV ثابت بوده و b_a متغیر است.

b) $b_a = b_c = b$

۹-۱۵- روشهای آزمایش محصولات خوردگی

آزمایش محصولات خوردگی در محیط های آبی و غیر آبی برای به دست آوردن اطلاعاتی در باره جزئیات این محصولات و تجزیه و تحلیل جنبه هایی چون ترکیب ، سختی ، میزان تنش سطح ، چسبندگی به فلز پایه و سایر خواص مکانیکی این محصولات صورت می پذیرد (شکل ۵۲-۱۵)

البته روشهای خاصی برای تحقیق در مورد محصولات خوردگی وجود دارد که برخی از این روشها کاربرد وسیع تری در رابطه با محصولات خوردگی آبی و برخی محصولات خوردگی گازی پیدا می کنند [۱۳۰] .

این مبحث به روشهای قابل حصول برای بدست آوردن اطلاعات در مورد جنبه های گوناگون محصولات خوردگی می پردازد ؛ همچنین مشخصات عمده این روشها را مطرح می نماید .

این مشخصات می تواند شامل طبیعت و نوع داده های قابل حصول ، مزیت ها و محدودیت های برخی روشهای کمتر شناخته شده باشد [۱۳۰] .

۱-۹-۱۵- شناسایی ترکیب :

شناسایی محصولات خوردگی در واقع شامل مطالعه آنها از لحاظ ترکیب شیمیایی ، ساختار ، اختلاف غلظتی عناصر و حضور عناصر آلوده کننده از محیط اطراف می باشد . بیشتر روشهایی که برای شناسایی نمونه مورد نظر (بعنوان مثال لایه اکسیدی) مورد

استفاده قرار می گیرد روشهای گوناگون شیمی تجزیه است؛ این روشها شامل آنالیزتر^۱، تجزیه از طریق سوزاندن^۲، رنگ سنجی^۳، مغناطیس جنسی^۴، کروماتوگرافی گازی و... می باشد. همچنین اسپکتروسکوپی جرمی و اندازه گیری گرمایی نیز گاهی مورد استفاده قرار می گیرد.

در بیشتر این روشها، اگر چه عناصر موجود، در دقت بالا و در مقادیر جزئی اندازه گیری و شناسایی می شوند، ولی مشخص کردن تغییر ترکیبات به صورت موضعی بسیار مشکل است.

روشهای دیگری که توانایی مشخص کردن محصولات خوردگی را دارا هستند در شکل (۵۲-۱۵) بصورت فهرست وار آمده است. در تمام این روشها برخی اجزاء یا ذرات بنیادین بر روی سطح گسیل می یابند.

سپس از تجزیه این ذرات انتشار یافته اطلاعاتی جمع آوری می شود. برخی عوامل مهم این روشهای تجزیه ای در شکل (۵۲-۱۵) موجود است [۱۳۱].

^۱ Wet analysis
^۲ Ignition analysis
^۳ Colorimetry
^۴ Polarography

جدول ۱-۱۵: روشهای آنالیز و بعضی از پارامترهای دیگر

TABLE — TECHNIQUES OF ANALYSIS AND SOME OF THEIR PARAMETERS						
No.	Techniques of analysis	Incident species	Emergent species	Elements detected	Detection Limit (ppm)	Depth of Information (Å)
1	Electron probe micro	Electrons	Charac.X-rays	$\geq \text{Be}$	100-1000	~5000
2	Energy dispersive	Electrons	Charac.X-rays	$\geq \text{Na}$	~1000	~10000
3	Back scattered electron spectroscopic	Electrons	Back scattered electrons	$\geq \text{Li}$	~1000	10-50
4	Auger spectroscopic	Electrons	Auger Electrons	$\geq \text{Li}$	~1000	5-20
5	X-ray fluorescence	X-rays	Charac.X-rays	$\geq \text{Mg}$	atomic number 12-22 > 1000	10-80
6	Neutron activation	Neutrons	δ -rays	$\geq \text{Na}$	> 22 ~1 ~ 0.1	Complete specimen upto 1 cm
7	Electron spectroscopic	Photons	Electrons	$\geq \text{He}$	~1000	5-20
8	Secondary ion mass spectroscopic	Ions	Secondary ions	$\geq \text{H}$	0.1-100	3-10
9	Ion scattering spectroscopic	Ions	Ions	$\geq \text{Li}$	~1000	3-10
10	Rutherford backscattering spectroscopic	Ions	Ions	$\geq \text{C}$	~100	3×10^4
11	Elastic recoil detection	Ions	Ions	H to F	~100	~10 ⁴
12	Nuclear reaction	Ions	Deuterons, δ -ray Protons, He ⁺	Specific elements	~50	5×10^6
13	Mössbauer spectroscopic	X-rays	δ -rays, X-rays electrons	Mössbauer	~5000 elements	~10 ⁴
14	Laser Raman spectroscopic	Mono chromatic (laser)	Scattered Light	Raman active molecules	>1 mono layer	~10 ³

در میان آنها، روشهایی چون ریز تجزیه کاوش الکترونی^۱ (EPMA)، آنالیز پراکندگی انرژی^۲، طیف سنجی الکترونیهای برگشتی^۳ و طیف سنجی الکترونیهای اوژه^۴ همچون دیگر روشها مث میکروسکوپ الکترونی عبوری^۵ (TEM) و آنالیز تفرق الکترونی^۶ بر اساس تأثیر متقابل بین الکترونیهای گسیل داده شده و مواد برگشتی و مطالعه و بررسی آنها می باشد. روشهای ۱، ۲، ۴ و ۵ در جدول (۱-۱۵)، به طور گسترده ای در مطالعات خوردگی مورد استفاده قرار می گیرند [۱۳۳].

^۱ Electron probe micro analysis

^۲ Energy dispersive analysis

^۳ Back scattered electron

^۴ Auger electron spectroscopy

^۵ Transmission electron microscopy

^۶ Electron diffraction analysis

روشهایی که برای شناسایی ترکیبات و محصولات خوردگی به کار می رود در جدول (۱)-
(۱۵) آمده است .

از طیف سنجی الکترونیهای برگشتی برای مطالعه توزیع عناصر استفاده می شود . در این روش ، شدت الکترونیهای برگشتی از عناصری با عدد اتمی بالاتر ، بیشتر و در نتیجه تصاویر روشن تری ایجاد می شود . همچنین به واسطه وابستگی به توزیع عناصر ، تصاویر وضوح نوری (کنتراست) بیشتری دارند . تصاویر در این روش با تصاویر ایجاد شده از الکترونیهای ثانویه در یک میکروسکوپ الکترونی جارویی (SEM) قابل مقایسه هستند [۱۳۳-۱۳۴] .

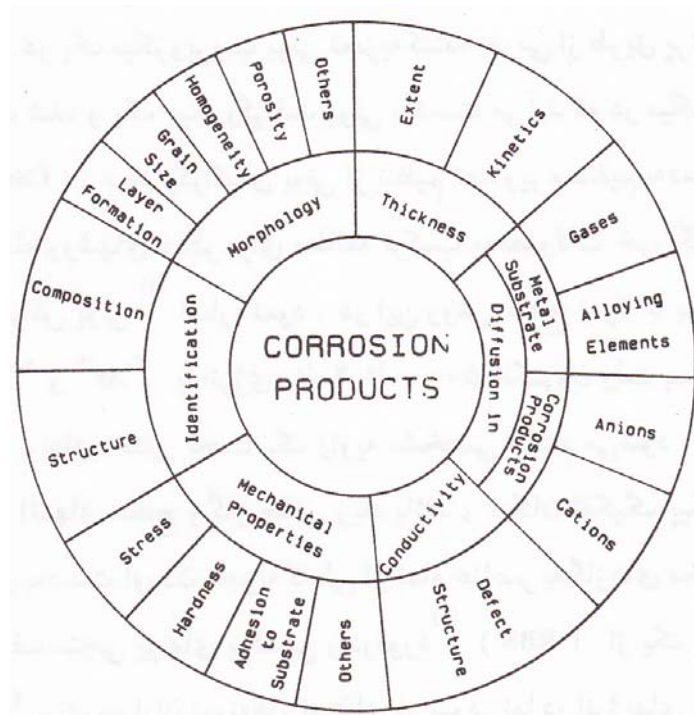
فعال کردن نوترونها از دیگر روشهای تجزیه ای موجود است ؛ که در این روش نمونه در یک واکنشگر^۱ ساده در معرض نوترونهای حرارتی قرار گرفته و به دنبال آن توسط طیف سنجی δ ، تجزیه کمی برای مشخص نمودار محصولات خوردگی صورت می گیرد .

روش اسپکتروسکوپی الکترونی^۲ به صورت زیر تقسیم بندی می شود :

-اسپکتروسکوپی فوتوالکترون (PES) : در این روش فرآیند یونی کننده توسط تشعشع ماوراء بنفش صورت می گیرد .

^۱ Reactor

^۲ Electron Spectrometry



شکل ۵۲-۱۵: طرح شماتیکی از جنبه های اصلی مربوط به محصولات خوردگی

اسپکتروسکوپی الکترون برای آنالیز شیمیایی (ESCA). در این روش نیز از یک منبع اشعه X تک انرژی^۱ استفاده می شود. رشد لایه های محافظ در زیر لایه پوشش فلزات مختلف می تواند توسط ESCA مطالعه شود. البته این روش برای اندازه گیری تغییرات کمی در ترکیبات شیمیایی استوکیومتری مناسب نیست [۱۳۵].

^۱ Monoenergetic

در این روش ترکیباتی مانند اکسیدها با استفاده از تغییر خطوط طیف ، از فلز پایه تشخیص داده می شوند . تغییر خطوط طیف اکسیژن در تشخیص اکسید ، هیدروکسید و شکلهای مختلف آب تبلور مفید است [۱۳۵] .

طیف سنجی جرمی یونهای ثانویه^۱ (SIMS) روشی است که برای تجزیه میکرونی سطح و یا داخل مواد جامد و برای تمامی عناصر در محدوده ppm و پایین تر از آن کاربرد دارد. در مطالعه سطوح ، به کمک این روش می توان اطلاعات بسیار جزیی از ترکیبات به دست آورد . در یک میکروپروب یونی تجزیه کننده جرمی از طریق پرتو یونی متمرکز شده ، سطح جاروب شده و یک میکروگرافت یونی به دست می آید که در میکرو تجزیه کننده یونی کامکا (Cameca) ، میکروگرافهای یونی از تنظیم تصاویر مستقیم به دست می آورد [۱۳۶] .

از جمله روشهای دیگر برای مطالعه ترکیب محصولات خوردگی می توان به روش طیف نمایی پراش یونی^۲ اشاره نمود . در این روش سطح نمونه با یونهای گاز خنثی نظیر He^+ ، Ne^+ و Ar^+ با انرژی ۲۰۰ تا ۵۰۰۰ الکترون ولت بمباران می شود .

تفرق یونهای خنثی شده تحت یک زاویه مشخصی انجام می شود . در این روش ، اگر اختلاف جرم اتمهای سطح و گاز خنثی زیاد باشد ، امکان تفکیک پیک ها کاهش می یابد . همچنین برای به دست آوردن تجزیه کاملی از تمام عناصر به گازهای مختلفی نیاز است .

^۱ Secondary ion mass spectroscopy

^۲ Ion Scattering spectroscopy

در طیف سنجی یونهای برگشتی را در مورد^۱ (RBS) از یک پرتو یونی تک انرژی معمولاً $^4\text{He} +$ برای بمباران نمونه ها ، استفاده می شود . اما در انرژی های خیلی زیاد (۲ Mev) به کمک این روش می توان اطلاعاتی در مورد جرم ، مقدار متعلق عناصر ، عمق مقطع عناصر حاضر در حد چند میکرون به دست آورد .

RBS روشی سریع و کمی بوده و احتیاج به کالیبراسیون ندارد. عمده ترین محدودیت این روش ناتوانی در شناسایی عناصری با جرم مشابه است .

از روش تجزیه آشکار ساز برگشتی الاستیک^۲ (ERDA) یا انرژی های بالاتر (۴۰ Mev) -۱۰ نیز برای کاوش سطح استفاده می کنند . این روش با RBS متفاوت است . اما می تواند به عنوان مکمل RBS نیز به کار رود . روش تجزیه آشکار سازی برگشتی الاستیک (ERDA) به حضور عناصر سبک در زمینه سنگین حساس است [۱۳۷] .

در روش واکنش هسته ای از یک پرتو با انرژی بالا برای تولید واکنشهای هسته ای با اتمهای ناخالصی استفاده می شود . این روش مشکل اندازه گیری عناصر سبک در زمینه سنگین را ندارد .

برای مثال کربن و اکسیژن به کمک واکنشهای $^{12}\text{C} (d, p) ^{13}\text{C}$ و $^{16}\text{O} (d, p) ^{17}\text{O}$ به ترتیب آشکار می شوند ، که «d» به دئوترون و «P» به پرتون خارج شده از عنصر آخر اشاره می کنند .

^۱ Rutherford backscattering

^۲ Elastic recoil detection analysis

روشی که از RBS و ERDA یا RBS و واکنشهای هسته ای باشد برای به دست آوردن پروفیل غلظتی سازنده های فلزی و اکسیژن در یک ضخامت لایه سطحی مؤثر است . طیف سنجی موس بائر شکلی از طیف سنجی δ است که اشعه در نمونه نفوذ می کند و یک واانگیزگی^۱ ایجاد می نماید . انتشار اشعه δ اشعه X و الکترونیایی را تولید می کند که این اشعه توسط آشکار ساز شمارش می شوند . از یک طیف موس بائر سه متغیر مشاهده می شود ؛ پارامترهای انتقال مرکز^۲ ، شکاف چهار قطبی^۳ و شکاف مغناطیسی^۴ قابل استنتاج است . از این متغیرها برای مشخص کردن یک یا چند جزء شیمیایی در اتم موس بائر استفاده می شود . البته از محدودیت های این روش می توان به ردیابهای قابل استفاده در آن اشاره نمود . در واقع فقط تعداد محدودی ردیاب برای اسپکتروسکوپی موس بائر استفاده می شود ؛ عمده ترین آنها ^{57}Fe است [۱۳۸] .

سه پارامتر ذکر شده در بالا به حالت اکسیداسیون آهن حساس هستند . روش اسپکتروسکوپی موس بائر^۵ برای شناسایی ترکیب زنگ بر روی سطوح فولادی و نیز برای تهیه اطلاعاتی در مورد غلظتهای نسبی اجزاء مختلف مورد استفاده قرار می گیرند [۷] . در مقایسه با تفرق اشعه X ، روش موس بائر هم به اجزاء بلورین^۶ و هم به اجزاء بی شکل^۷ حساس است [۱۳۹] .

^۱ Deexcitation

^۲ Center Shift

^۳ Quadrupole Splitting

^۴ Magnetic Splitting

^۵ Mossbauer Spectroscopy

^۶ Crystalline

^۷ Amorphous

طیف سنجی لیزر رامان^۱ برای شناسایی لایه های محصولات خوردگی در محیطهای گازی و آبی و در محل خود می تواند استفاده شود. این توانایی به این دلیل است که آب و بیشتر گازها، طیفهای ضعیفی از رامان را می دهند و به همین دلیل تداخل اندکی تولید می کنند. این روش بسیار سریع بوده و مشخصات واضحی از محصولات خوردگی حاضر در لایه های سطحی به نازکی $50^\circ A$ ، تهیه می کند. البته به منظور شناسایی ترکیبات و به عنوان یک مرجع مقایسه، ضروری است طیفهای ترکیبات خاصی را داشته باشیم [۱۴۰].

۲-۹-۱۵- شناسایی ساختمان

دست یابی به اطلاعاتی در باره ساختار محصولات خوردگی در شناسایی این محصولات بسیار مؤثر است. روشهای متعددی برای شناسایی ساختمان محصولات خوردگی استفاده می شود. از جمله این روشها می توان به پراش اشعه X و تفرق الکترونی اشاره کرد [۱۴۱].

این روشها، علاوه بر شناسایی ترکیبات، اطلاعاتی درباره ابعاد کریستال، جهات و پارامترهای سلول واحد نیز در اختیار قرار می دهند. پراش اشعه X هم برای مطالعه جداگانه اکسیدها به کمک روش پودری دبی شریر و هم برای مطالعه اکسیدها، با استفاده از زاویه پراگ (\emptyset) و روشهای بازتابش، استفاده شود. پراش الکترونی از بسیاری جهات مشابه پراش اشعه X است. اما در این روش عمق نفوذ الکترونها کم و در حدود چند صد آنگسترم است.

^۱ Laser Raman Spectroscopy

در پراش الکترونی با انرژی پایین (LEED) الکترونی‌هایی با انرژی به کوچکی ۱۰۰ ولت برای مشخص کردن محصولات اکسیداسیون در مراحل اولیه اکسیداسیون، به کار می‌رود. پراش الکترون عبوری هم برای مطالعه اکسیدهای پیوسته به فلزات و هم برای اکسیدهای جدا می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱۴۲-۱۴۳]

۳-۹-۱۵- شکل‌شناسی^۱

جنبه‌های مختلف اطلاعات مورفولوژیکی درباره محصولات خوردگی عموماً شامل شکل، یکنواختی، اندازه دانه، حضور تخلخل، وجود ترک‌ها و... در این محصولات می‌باشد.

اغلب روش‌های مورد استفاده برای شناسایی شکل‌شناسی محصولات خوردگی شامل شکل‌های گوناگون میکروسکوپی (نوری، الکترونی یونی) و تخلخل سنجی جیوه‌ای می‌باشد. عمومی‌ترین روش برای مطالعه ضخامت محصولات در سطح و یا در مقطع نمونه، ریز سنجی نوری^۲ است. جدول (۲-۱۵) خلاصه اطلاعاتی که از ریز سنجی نوری محصولات خوردگی به دست می‌آید را ارائه می‌کند.

^۱ MorpHology

^۲ Optical microscopy

جدول ۲-۱۵: خلاصه ای از اطلاعات راجع به زیر نویسی نوری محصولات خوردگی

TABLE II. INFORMATION OBTAINED FROM OPTICAL MICROSCOPY OF CORROSION PRODUCTS	
OBSERVATION in plan	INFORMATION OBTAINED (a) uniformity of corrosion (b) colour (c) grain size (d) spalling (e) edge effects (f) presence of protuberances
in section	(a) uniformity of thickness (b) local or general loss of adhesion (c) porosity (d) layer structure (e) cracking (f) grain size and distribution (g) grain boundary penetration (h) precipitation phenomenon (i) presence of internal oxides
with polarized light	(a) presence of complex oxides (b) layer structure
with oblique illumination	(a) with greater depth of focus (b) with increased contrast

دیگر روش های نوری که می تواند برای مطالعات شکل شناسی محصولات خوردگی استفاده شود شامل ریز سنجی تداخلی^۱ (میکروسکوپی تداخلی)، ریز سنجی تشخیص فازی^۲، ریز سنجی مادون قرمز^۳، ماوراء بنفش و ریز سنجی شیمیایی^۴ می باشد [۱۴] استفاده از نورپلاریزه شده نیز در شناسایی و طبقه بندی محصولات خوردگی مفید است.

^۱ Interference microscopy
^۲ Phase contrast microscopy
^۳ Infrared microscopy
^۴ Chemical Microscopy

روش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به طور وسیعی برای مطالعه شکل شناسی محصولات خوردگی استفاده می شود. کاربرد های SEM را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- تصویر سازی: با استفاده از الکترون های ثانویه و برگشتی، تصویر سطح نمونه به دست می آید و امکان مطالعات ریز ساختاری (دانه ، مرزدانه ، تخلخل ها، فازها ، و...) وجود خواهد داشت.

۲- تجزیه سطحی: با استفاده از اشعه x حاصل از نمونه به روش XRE، تجزیه سطحی انجام شده و علاوه بر شناسایی عناصر موجود در نمونه ، توزیع عناصر در سطح نمونه را نیز می توان مطالعه کرد (در این روش تجزیه نقطه به نقطه صورت می گیرد). به طور کلی عواملی که باعث ایجاد تصویر در روش SEM می شوند عبارتند از :

۱- سطح نمونه دارای پستی و بلندی است و بسته به اینکه اشعه در پستی یا بلندی متمرکز شود، شدت اشعه الکترونی رسیده به آشکار ساز در لحظات مختلف روبش متفاوت بوده و در نتیجه جریان خروجی از آشکار ساز نیز متغیر است . روبش این جریان متغیر روی صفحه مانیتور باعث رؤیت تصویر سطح نمونه می شود. اگر سطح نمونه فاقد پستی و بلندی باشد تصویری حاصل نمی شود.

۲- چنانچه فاز های مختلفی در سطح نمونه وجود داشته باشد ، تصویر خواهیم داشت. از آنجایی که شدت اشعه الکترونی برگشتی از فازهای مختلف (فازهای مختلف اعداد اتمی

متفاوت دارند) متفاوت است، بنابراین جریان خروجی از آشکار ساز نیز متغیر خواهد بود [۱۴۵].

روش این جریان متغیر روی صفحه مانیتور باعث رؤیت تصویر سطح نمونه می شود. بنابراین عواملی همچون عدم یکنواختی سطح، وجود فازهای مختلف و سایر عوامل شکل سازی سبب ایجاد تصویر در روش SEM می شود.

از مزایای روش SEM، درجه تفکیک بالا، بهبود عمق میدان و آماده سازی آسان نمونه ها (در مقایسه با روش TEM) می باشد.

میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) در نمونه های اکسید شده و خورده شده موارد زیر را می تواند نشان دهد: شکل سطوح خورده شده، ضخامت مقاطع اکسیدی، لایه های نازک اکسیدی بر روی فلزات بسیار نازک و ساختار لایه اکسیدی، همچنین این روش تخلخل ساختار را نیز مورد مطالعه قرار می دهد [۱۴۶].

مطالعه لایه های اکسیدی به وسیله TEM را به دلیل روشهای آماده سازی نمونه، بررسی مخصوص می نامند. در روش TEM، نمونه را نازک انتخاب می کنند تا الکترونها بتوانند از نمونه عبور کنند. ولتاژ شتاب دهنده در ستون الکترونی TEM بین ۳۰۰-۱۰۰ کیلوولت الکترون بوده و قدرت تفکیک آن در حدود $50-100 \text{ \AA}$ می باشد. البته میکروسکوپیهای نسل جدید TEM با ولتاژهای ۴۰۰-۳۰۰ کیلو الکترون ولت کار می کند و قادرند قدرت تفکیک بالایی در مقیاس اتمی داشته باشند. چنین سطحی از قدرت تفکیک عملاً در مطالعه نیمه هادیها که انطباق یا عدم انطباق در مقیاس اتمی آنها در مقطع لایه ها در اجزاء

الکترونیکی اثر بحرانی روی کیفیت نتایج دارد بسیار مهم است . مطالعه اکسیدهای ضخیم با میکروسکوپ های الکترونی ولتاژ بالا (HVEM) به حذف مراحل دشوار آماده سازی نمونه کمک می کند [۱۴۷] .

میکروسکوپ الکترونی عبوری ریشی (STEM) علاوه بر آشکار کردن شکل شناسی نمونه در زمینه تصویر الکترون ثانویه ، خصوصیات منطقه پراش انتخاب شده ، الگوهای پراش ریز پرتو^۱ ، الگوهای کانالهای الکترونی و تجزیه عنصری نیز کمک می کند .

ریز سنجی میدان نشری^۲ (FEM) برای مطالعه مراحل اولیه اکسیداسیون فلزات دیر گداز به خصوص در شکل شناسی اکسید استفاده می شود .

در ریز سنجی میدان یونی^۳ (FIM) بزرگنمایی در محدوده 10^6 و قدرت تفکیک در حد A° ۲ - ۱ ممکن می باشد بنابراین این روش مطالعه توپوگرافی سطح را در حد اتمی قادر می سازد . روش FIM برای مطالعه اکسید بر روی آهن اکسید شده در محدوده دمایی $800-250^\circ C$ و در محیط اکسیژن می تواند استفاده شود .

همچنین به کمک FIM می توان فصل مشترکهای اکسیدنیکل ، کبالت و آهن را مورد مطالعه قرار داد .

روش تخلخل سنجی جیوه ای نیز اغلب برای مشخص کردن اکسیدها در نمونه های سرامیکی مورد استفاده قرار می گیرد . به عنوان مثال در حالت بهینه این روش برای بازرسی منافذ ریزتر از $10A^0$ لایه های اکسیدی زیرکونیم استفاده می شود [۱۴۸] .

^۱ Microbeam diffraction Patterns

^۲ Field emission microscopy

^۳ Field ion microscopy

۴-۹-۱۵- اندازه گیری ضخامت

اندازه گیری ضخامت محصول خوردگی معمولاً با تابش نور روی سطح یا به کمک اندازه

گیری سرعت خوردگی انجام می گیرد .

در جدول (۳-۱۵) تعدادی از روشهایی که برای اندازه گیری ضخامت محصولات خوردگی

استفاده می شود نشان داده شده است .

برخی روشهای تجزیه سطحی که با دستگاههای بمباران یونی همراه هستند نیز برای اندازه

گیری ضخامت لایه استفاده می شوند [۱۴۸] .

جدول ۳-۱۵ : روشهایی برای اندازه گیری ضخامت محصولات خوردگی

TABLE III — TECHNIQUES FOR MEASURING CORROSION PRODUCT THICKNESS		
TECHNIQUE	FILM/SCALE THICKNESS AND OTHER FEATURES	REFERENCES
<i>A. Optical techniques</i>		
1. Optical microscopy	$>1/\mu$ and also $> 100 \text{ \AA}$	20
2. Differential reflection spectroscopy	$< 7 \text{ A}^\circ$	21,22
3. Differential reflectometry	$\sim 50 \text{ A}^\circ$ and insitu measurements	23
4. Two beam or multiple beam interferometry	$\sim 5 \text{ A}^\circ$	24
5. Interference colour measurement	$\lambda/4$ to few λ with 10% accuracy where λ is wavelength	25
6. Spectrophotometric measurements	250 A° to 15μ	26
7. Ellipsometry	$< 100 \text{ A}^\circ$ and insitu measurements	20
<i>B. Non-optical techniques</i>		
8. Coulometric reduction	$\sim 5 \text{ A}^\circ$	20
9. X-ray diffraction	$0,1\mu - 100\mu$	27
10. Capacitance measurement	Ion conducting anodic films $> 10 \text{ A}^\circ - 1\mu$	28
11. Electrical resistance measurement	Suitable for rapidly oxidising thin specimens	29
12. Film forming voltage measurement	Requires calibrated forming voltage vs thickness curves	30
13. Radioactive tracers	upto several 1000 A°	31
14. Thermogravimetric measurements	Thickness determined as a function of weight gain	32
15. Surface analysis techniques coupled to ion bombardment apparatus.	examples: AES, SIMS, Activation analysis and others	—

۵-۹-۱۵- اطلاعات دیگر

در روشهای ذکر شده ، اطلاعاتی در باره ضریب نفوذ در خود و گرادیان غلظتی کاتیونها و یا آنیونها در لایه های اکسید شده حرارتی به دست می آید . EPMA و سایر روشهای تجزیه ای که با تجهیزات بمباران یونی همراه شده باشند می توانند برای اندازه گیریهای پروفیلهای غلظتی فلز ، مورد استفاده قرار گیرند . برخی روشها نیز اطلاعاتی در باره پروفیلهای آنیونی ارائه می دهند . آثار رادیواکتیو نیز به طور مؤثری برای اندازه گیری ضرایب نفوذ می تواند استفاده شود [۱۴۸-۱۴۹] .

اخیراً از اتورادیوگرافی مقاطع بریده شده اکسید - فلز که شامل ایزوتوپهای رادیواکتیو هستند در تخمین ضرایب نفوذ در خود و انرژی اکتیواسیون استفاده می شود و این امر به تشخیص مکانیزم نفوذ قالب (چه در داخل نمونه و چه در مرزخانه ها) کمک می کند .

پروفیلهای یون اکسیژن در اکسیدها ، بوسیله روش فعال سازی پروتون اکسید مورد مطالعه قرار می گیرند ؛ در این روش ایزوتوپهای رادیواکتیو توسط استحاله اتمی $F^{18}O(p,n)$ بوجود می آیند و مکان ایزوتوپ - بعداً توسط اتورادیوگرافی مقاطع مشخص می شود [۱۴۹] .

معمولاً مقدار معینی گاز در حجم مشخصی از فلزات به طور ذاتی حل می شود . بنابراین اندازه گیری مقدار گاز در داخل فلز نیز اغلب صورت می گیرد .

پروفیلهای اکسیژن در فلزات معمولاً با اندازه گیری ریز سنجی یا پراش اشعه X یا تجزیه های گرافت در خلاء مورد مطالعه و اندازه گیری قرار می گیرند .

روش پراش اشعه X ، بر اساس تأثیر مقدار اکسیژن روی پارامتر شبکه، اطلاعاتی درباره مقدار اکسیژن می دهد. روشهای اصطکاک درونی نیز داده های کمی از سطوح اکسیژن ارائه می دهند.

EPMA هم نسبت به روشهای فوق از حساسیت کمتری برخوردار است، ولی برای اندازه گیری غلظت اکسیژن در فلزات می توان از این روش بهره گرفت.

هدایت الکترونی اکسیدهای سطح فلز بر اساس عیوب موجود در اکسید اندازه گیری می شود.

در طی مطالعه داده هایی چون اندازه دانه لایه اکسید سطحی، توزیع اندازه دانه، توزیع ناخالصی در سنجش اکسیدهای حجمی باید نهایت توجه را مبذول داشت.

دستیابی به اطلاعاتی در باره عیوب ساختاری در اکسیدها به کمک اندازه گیریهای امپدانس A.C امکان پذیر می باشد؛ روش امپدانس به ناخالصیها و ترکها در اکسید حساس است [۱۴۹].

بررسی خواص مکانیکی گوناگون اکسیدهای سطحی از جمله تنش ها، سختی و چسبندگی به فلز پایه از اهمیت ویژه ای برخوردار است. روشهایی برای اندازه گیری میزان تنش در نمونه های اکسید شده وجود دارد. عمده ترین آنها شامل اندازه گیری تنش براساس مقدار خم شدن یک ورق نازک یا انحراف زاویه ای یک پوشش مارپیچی شکل با یک ماده خنثی روی منطقی از قطعه در طی اکسیداسیون است. البته روشهای دیگری شامل اندازه گیری کاهش تنش در طی اکسیداسیون - احیاء، اندازه گیری نیروهای بازگرداننده با سیستم های

الکترومغناطیسی (که این سیستم ها از ایجاد تنشهای احتمالی در حین تغییر شکل جلوگیری می کنند) ، استفاده از پراش اشعه X نیز به کار می رود [۱۴۹].

ریز سختی لایه های اکسیدی تک فاز فقط با اندازه دانه تعیین می شود ، ولی در اکسیدهای مخلوط ، گرادیان سختی وجود دارد ، بنابراین در این گونه اکسیدها باید در انتخاب نقاط دندانده ای^۱ احتیاط نمود .

برای اندازه گیری چسبندگی اکسیدها به فلزات پایه هیچ روش استاندارد وجود ندارد . البته روشی شامل چسباندن اکسید به یک نگهدارنده به کمک یک رزین و کشیدن آن با استفاده از ماشین های کشش وجود دارد که البته این روش از محدودیت های آشکاری برخوردار است . دیگر خواص مکانیکی مانند استحکام کششی ، افزایش طول ، کاهش چکش خواری و خزش محصولات خوردگی را می توان با استفاده از روشهای متداول اندازه گیری نمود ، اما باید انطباقهایی در رابطه با نمونه ، نوع اکسید ، دما و ... صورت می گیرد.

۶-۹-۱۵- نکات تکمیلی

روشهای تجزیه براساس کاربردشان ، که یا برای تجزیه سطحی یا به دست آوردن اطلاعات شکل شناسی (مورفولوژی) یا اندازه گیری ضخامت و یا هر پارامتر دیگری به کار می روند ، مشخصات و ویژگیهای ساختار را تحت خلأ بالا بررسی می کنند ، بنابراین این امر بر محصولات خوردگی نیز تأثیر گذارده و باید تأثیر خلأ بالا را روی داده های حاصل مد نظر قرار داد [۱۴۹] .

^۱ Indentation

با وجود این بسیاری از تجهیزات و سیستم های تجزیه به طور مداوم در حال توسعه و پیشرفت هستند ، ولی بسیاری از روشهای قدیمی هنوز در ارائه اطلاعات درست و پرمعنی کاربرد دارند .

۱۰-۱۵- روشهای دیدبانی خوردگی نقطه شبیم اسیدی در صنعت

این بخش شامل روشهای بکار برده شده برای دیدبانی خوردگی نقطه شبیم اسیدی و جلوگیری نمودن از تشکیل اسید در مسیر دود خروجی دیگهای بخار می باشد . اساس این روشها بر مبنای دیدبانی نقطه شبیم تشکیل اسید می باشد که می توان با تنظیم مقدار هوا و سوخت از مشعل ها و کنترل درجه حرارت ، از تشکیل اسید حاصل از تری اکسید گوگرد در مسیر دود خروجی جلوگیری نمود .

روشهای خوردگی الکتروشیمیایی مختلفی برای این منظور مورد استفاده قرار می گیرد که از آن جمله می توان به نویز الکتروشیمیایی^۱ ، امپدانس^۲ و پاسخ جریان کوپل^۳ اشاره نمود . در این بخش مزایا و معایب این روشها نیز مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد .

زمانی که در دیدبانی خوردگی از پروب های ورقه ای^۴ استفاده می شود ، باید توجه داشت که سرعت این پروب ها با کیفیت دود خروجی متناسب بوده و می توان با این روش بصورت مداوم^(۵) میزان خوردگی دود خروجی را با کاهش وزن حاصل از نمونه ها اندازه گیری نمود [۱۵۰] .

^۱ Electrochemical noise

^۲ Impedance technique

^۳ Coupling current response

^۴ Laminar probes

در واقع کاربرد روشهای دیدبانی خوردگی نه تنها از پدیده خوردگی جلوگیری می کند ، بلکه به انتخاب مواد و طراحی مناسب تر دیگ بخار نیز کمک می کند .

۱-۱۰-۱۵- مقدمه

در پنجاه سال اخیر پیشرفتهای زیادی در زمینه نگهداری و بهره برداری دیگهای بخار صورت گرفته است . وجود گوگرد در سوخت های فسیلی و نهایتاً اسید ایجاد شده از گوگرد موجود در سوخت ، سبب خوردگی مسیر دود خروجی می گردد . انجمن نگهداری دیگهای بخار^۱ (BAC) تحقیقات وسیعی را در این زمینه انجام داده است . آنها دریافتند که در اثر کندانسه شدن بخارات اسیدی در مسیر دود خروجی مشکلات خوردگی فراوان ایجاد می شود و نهایتاً این امر منجر به ایجاد شکستهایی در دماهای پایین می گردد . ضمن آنکه خاکستر رسوبات حاصله از احتراق نیز به تسریع و تشدید شدن واکنش های خوردگی کمک می نماید . بررسی های انجام شده نشان می دهد که چنانچه درجه حرارت گاز خروجی از حد معینی بالاتر (بالای نقطه شبنم) نگهداشته شود . مشکلات خوردگی فوقالذکر پدید نخواهد آمد ، بنابراین می بایست روشی جهت تعیین دمای نقطه شبنم ابداع می شد . ساخت دستگاههای دیدبانی خوردگی نقطه شبنم را می توان تلاشی در این راستا قلمداد کرد [۱۵۱] .

^۱ Boiler Availability Committee (BAC)

۲-۱۰-۱۵- روشهای دیدبانی گازهای خروجی

تری اکسید گوگرد در اثر احتراق ، در دیگ بخار تشکیل شده و روی سطوح سردتر رسوب می کند . این تری اکسید گوگرد و بخار آب موجود در گازهای خروجی ، اسید سولفوریک را تولید می کند .

مقدار جزیی تری اکسیدگوگرد در دود خروجی سبب می شود تا نقطه شبنم تشکیل اسید تا حدود $145-105^{\circ}C$ افزایش یابد . لازم به ذکر است که در غیاب تری اکسیدگوگرد نقطه شبنم بخار آب در حدود $40^{\circ}C$ می باشد.

مقدار دقیق نقطه شبنم اسیدی ، بستگی به مقدار تری اکسیدگوگرد و دما و مقدار رطوبت موجود در گاز خروجی دارد .

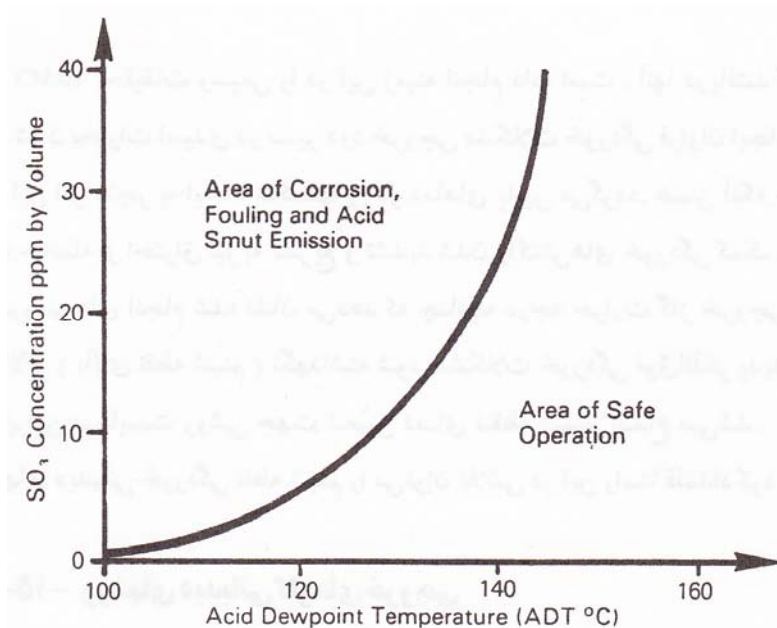
منظور از دمای نقطه شبنم اسیدی در این بحث دمای نقطه شبنم سولفوریک می باشد و این دما بالاترین دمایی است که در آن سطح سرد شده در تعادل با یک اتمسفر شامل تری اکسیدگوگرد و آب قرار می گیرد .

شکل (۵۳-۱۵) اثر مقدار تر اکسیدگوگرد را به دمای نقطه شبنم بیان می دارد . تری

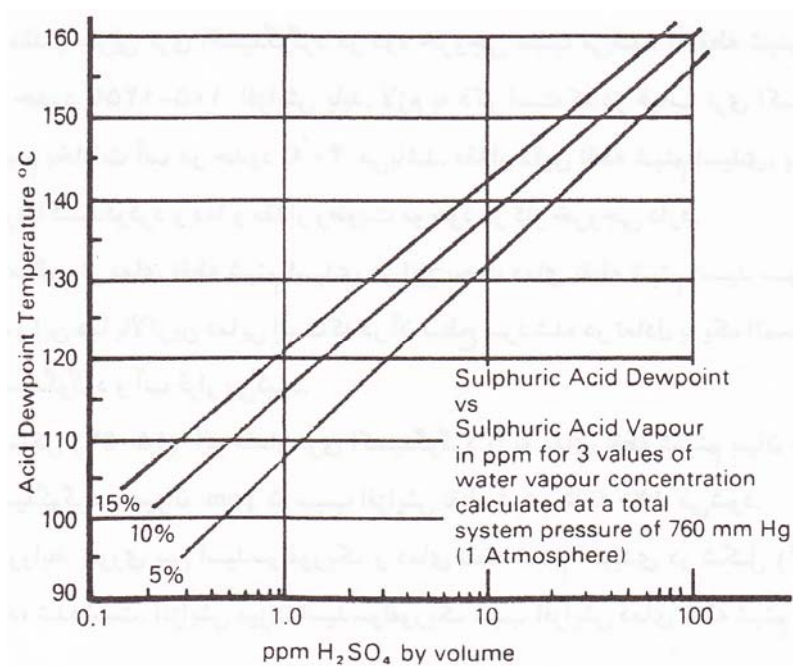
اکسیدگوگرد به میزان ۵ pmm سبب افزایش نقطه شبنم تا $120^{\circ}C$ می شود .

روابط تئوری بین اسیدسولفوریک و دمای نقطه شبنم اسیدی در شکل (۵۴-۱۵) نشان داده

شده است . افزایش میزان اسیدسولفوریک سبب افزایش دمای نقطه شبنم می شود .



شکل ۱۵-۵۳: اثر مقدار دی اکسید گوگرد (SO_3) روی دمای نقطه شبنم



شکل ۱۵-۵۴: رابطه تئوری بین اسیدسولفوریک و دمای نقطه شبنم اسیدی

اولین وسیله برای تعیین نقطه شبنم گاز های خروجی بطریقه هدایت الکتریکی در سال ۱۹۲۹ طراحی و ابداع گردید. بعد ها، این وسیله در سال ۱۹۵۲ در موسسه تحقیقاتی بهره برداری زغال سنگ بریتانیا^۱ تکمیل گردید. و هم اکنون بصورت تجاری بوسیله شرکت های تجاری صنعتی تولید می گردد [۱۵۲].

پیشرفت های دیگری نیز در زمینه دیدبانی به کمک تغییر در خازن یا مقاومت یک نمونه سرد شده صورت گرفته است که بسیار شبیه وسیله ساخته شده در موسسه تحقیقاتی مذکور می باشد.

در این وسیله دو پلاتین (ترموکوپلهای پلاتین pt / ردیم Rh) روی الکترودهایی قرار گرفته اند و این الکترودها در لوله سرامیکی یا شیشه ای غوطه ورنند. با دمش هوا به کناره های لوله، لوله سرد می شود به طوری که یک لایه اسیدی سرد بین ترموکوپلها کندانس می شود. هنگامی که دما به دمای نقطه میعان می رسد هدایت الکتریکی افزایش می یابد در بالاتر از نقطه شبنم، اسید کندانس نمی شود و لذا خوردگی اتفاق نمی افتد، در حالی که اگر دما زیر نقطه شبنم باشد امکان خوردگی موجود دارد.

همچنانکه پیش از این اشاره شد دمای نقطه شبنم به وجود تری اکسید گوگرد در بخار گازی وابسته است. که وجود تری اکسید گوگرد نیز تابع تغییرات هوای اضافی در مشعل می باشد. با بکار بردن هوای اضافی، نقطه شبنم بالا می رود. در صورتی که با کنترل صحیح احتراق هم دمای نقطه شبنم و هم گرمای اضافی غیر ضروری برای کوره کاهش

^۱ British Coal Utilisation Research Association

می یابد . کنترل احتراق در بسیاری حالات می تواند بوسیله دیدبانی مستقیم جریان اکسیژن موجود در دود خروجی و یا مقدار منواکسیدکربن انجام شود [۱۵۲].

از آنجایی که سرعت خوردگی فولاد به سرعت راسب شدن اسید وابسته است ، لذا دیدبانی سرعت تر سیب اسید به منظور اسید بررسی سرعت خوردگی فلز در زیر دمای نقطه شبنم اسیدی صورت می گیرد [۱۵۳].

بررسی سرعت خوردگی در این شرایط به دو طریق انجام می شود : استفاده از هدایت سنج و یا نمونه گذاری به طور مستقیم . در روش هدایت سنجی ، همچنانکه اشاره شد ، هدایت لایه کندانس شده در یک دمای مخصوصی افزایش می یابد و این فرآیند برای دماهای مختلف تکرار می شود و سرعت راسب شدن اسید از تغییرات هدایت تخمین زده می شود . در واقع در روش هدایت سنجی ، یک لوله سرد شده در داخل مجرای عبور جریان گازی قرار داده می شود . هوای خنک از لوله داخلی می گزرند و سپس از خارج سطح لوله برگشت داده می شود که در سطح خارجی ، لوله ها دوباره سردتر می گردد . ترموکوپلها در چندین نقطه در طول لوله به قسمت بیرونی لوله متصل می شوند تا دمای سطح را ثبت کنند . بعد از چند دقیقه که سیستم در معرض بخار گازی قرار گرفت . لوله تمیز می شود و اسید متراکم شده در بخش هایی از لوله که همان طراحی مشخصی از ترموکوپلها است ، شسته می شود . مواد حاصل از شستشو برای تعیین اسیدیته کل^۱ ، تیترا

^۱ Total acidity

می شوند و نمودار اسیدی (gr / Lit) برحسب دما رسم می گردد . از از روی این نمودار می توان دمای نقطه شبنم را تخمین زد [۱۵۳] .

در روش نمونه گذاری به طور مستقیم ، با کار بردن یک لوله فلزی سرد شده اندازه گیری مستقیمی از خوردگی گازها امکان پذیر است . یک نمونه بکار رفته به منظور دیدبانی خوردگی در سال ۱۹۵۲ مورد استفاده قرار گرفته است .

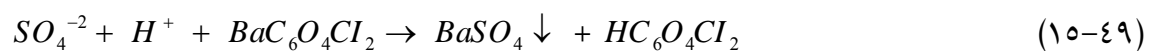
این نمونه ها معمولاً از جنس فولاد نرم می باشند که در انتهای یک لوله به صورت مانع شده قرار می گیرند و توسط یک لوله هوای خنک به کناره های نمونه می رسد تا گرما را از آن بگیرند . دمای نمونه توسط یک ترموکوپل آهن / کنستانتان کنترل می شود . در پایان هر مورد آزمایش نمونه پاک شده و با تجزیه محصولات خوردگی ، سرعت خوردگی مشخص می شود . همچنین از روش کاهش وزن نیز می توان سرعت خوردگی را تعیین کرد [۱۵۲-۱۵۳] .

با به کار بردن این روشها این واقعیت مورد تأکید قرار می گیرد که سرعت خوردگی وابسته به سرعت رسوب اسید است .

آزمایش کاهش وزن کوپن ، ساده ترین روش برای ارزیابی خوردگی یک محیط است . از این روش ، متوسط سرعت خوردگی یا مجموع سرعت خوردگی بدست می آید . همچنین از این روش می توان به عنوان یک مرجع مقایسه ، برای دستیابی به دیگر اطلاعات خوردگی استفاده کرد [۱۵۴] .

یک نمونه کوپنی بوسیله CA PCIS/UMIST به شکل پروژه خوردگی تقطه شبیم طراحی شده است .

کوپنها از نظر الکتریکی نیبت بهم عایق هستند و با استفاده از هوای متراکم خنک می شوند .
مجموع کوپنها بطور هم سطح در مجرای عبور جریان گاز به صورت مانت شده قرار می گیرند . این کوپنها بسته به نوع سیستم در عمق خاصی در دیواره مجرای جریان مستقر می شوند . تمامی روشهای ذکر شده ، در واقع به اندازه گیری غیر مستقیم خوردگی جریان گازی می پردازند . همچنان که اشاره شد میزان خوردگی به مقدار SO_3 در جریان گازی وابسته است . روش تجزیه تری اکسید گوگرد از جمله روشهای دیدبانی خوردگی نقطه شبیم اسیدی محسوب می شود . این روش اولین بار توسط آزمایشگاههای مهندسی خوردگی در آمریکا به کار گزفته شد . در سال ۱۹۴۸ از ایزوپروپانل آبی در آزمایشها برای جذب تری اکسیدگوگرد استفاده شد و مانع از اکسیداسیون دی اکسیدگوگرد شد . بررسیها نشان می دهد که ایزوپروپانل با کلروآنیلات باریم طبق واکنش زیر تشکیل یونهای اسیدکلر و آنیلات می دهند . این ماده نور با طول موج ۵۳۵ آنگسترم را جذب می کند . بنابراین غلظت آن را با بکار بردن یک فتومتر می توان بطور مداوم اندازه گیری نمود . طرحی از این سیستم در شکل (۵۸-۱۵) نشان داده شده است [۱۵۴] .



در واقع با استفاده از این طرح می توان غلظت تری اکسیدگوگرد را به طور مداوم در جریان گازی اندازه گرفت . و به این ترتیب می توان اطلاعاتی در مورد خوردگی جریان

گاز بدست آورد . البته نمی توان میزان خوردگی واقعی را تعیین نمود و باید توجه داشت که این روش نیاز به کاربر و مراقبت روزانه دارد . ولی با این حال این طرح روش خوبی برای کنترل خوردگی و مراقبت از احتراق محسوب می شود [۱۵۴] .

استفاده از نمونه های مقاوم الکتریکی^۱ نیز در دیدبانی خوردگی نقطه شبی در صنعت کاربرد دارد .

نمونه های مقاوم الکتریکی اولین نمونه های دیدبانی خوردگی بودند که تولید شدند . براساس یک اصل کلی مقاومت الکتریکی هادی با کاهش سطح مقطع آن بیشتر می شود . اساس کار نمونه های مقاوم الکتریکی نیز بر این اصل استوار است .

این نمونه ها از جنس ماده مورد نظر که قرار است آزمایش شود انتخاب می شوند و به شکل سیم ، ورق یا لوله می باشند . مقاومت این نمونه ها هنگامی که در معرض خوردگی قرار می گیرند با یک الکتروود مرجع در همان دما مقایسه می شود . با افزایش میزان خوردگی نمونه مقاومت آن نسبت به مرجع افزایش می یابد [۱۵۴] .

این روش ، روشی ساده برای بدست آوردن میزان خوردگی فلز می باشد ، اما از نظر کاربرد در نقطه شبی محدودیتهایی دارد . از جمله این محدودیتهای می توان به مواردی از قبیل ، عدم حساسیت آشکار سازی در زمان کوتاه و طول عمر کم نمونه ها اشاره کرد .

^۱ Electrical resistance probes

اخيراً پیشرفتهایی در زمینه ساخت نمونه ها برای ارزیابی سرعت خوردگی و بررسی خوردگی نقطه شببم اسیدی صورت گرفته است و نمونه های مارپیچی شکل در سال ۱۹۸۵ طراحی شده است .

علاوه بر روشهای ذکر شده روشهای پیشرفته ای نیز برای دیدبانی خوردگی در شرایط نقطه شببم وجود دارد از جمله روشهای الکتروشیمیایی که در چند سال اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است و در مرکز محافظت و خوردگی UMIST توسعه داده شده است [۱۵۴] .

از جمله این روشها می توان به روش امپدانس اشاره نمود .

امپدانس الکتروشیمیایی یک واژه ای است که عکس العمل یک الکتروود در حال خورده شدن را در محیطی که در معرض اغتشاشات A.C قرار دارد توصیف می کند . مرز الکتروشیمیایی (مرز بین الکتروود و محلول) بصورت ترکیبی از مقاومت ، خازن و سلف رفتار می کند . محدوده اندازه گیری فرکانس بین ۱۰ KHz تا ۱۰۰MHz می باشد .

در فرکانسهای بالا ، مقدار امپدانس ، مقدار مقاومت محلول را نشان می دهد و در فرکانسهای پایین امپدانس مجموع مقاومت محلول و سایر مقاومت های وابسته به نوع واکنش را نشان می دهد.

از معایب این روش ، قیمت بالا و پیچیدگی سیستم است . یک وسیله ساده شده که برای سیستم های خوردگی کاربرد زیادی دارد ، در سال ۱۹۸۱ ساخته شد . این دستگاه برای الکتروودهای فولادی که تحت شرایط خوردگی قرار دارند . فرکانسها در مقادیر بسیار بالا و

بسیار پایین برای اندازه گیری مقاومتها مهم می باشند . تعیین میزان مقاومتها اعم از مقاومت محلول و یا مقاومت انتقال بار برای ارزیابی خوردگی نقطه شبم اسیدی بسیار مفید است ، زیرا به این طریق می توان سینتیک حمله اسیدی را مشخص نمود . تئوریهای مربوط به روش امپدانس در قسمت قبلی این فصل مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵۵] .

از جمله روشهای پیشرفته دیگری که برای دیدبانی خوردگی نقطه شبم به کار می رود می توان به نویز الکتروشیمیایی اشاره کرد . به کمک این روش ، تغییرات پتانسیل خوردگی به طور دقیق مشخص می شود این تغییر بین دو الکتروود مشخص و یا بین یک الکتروود در حال خورده شدن و یک الکتروود مرجع با نویز پایین رخ می دهد . سیگنالها بطور دیجیتالی تجزیه می شود . عمل تجزیه سیگنالها با بکار بردن یک کامپیوتر کوچک و یا بوسیله روشهای مقایسه ای^۱ صورت می گیرد . این روش یک روش دیدبانی مداوم^۲ محسوب می شود .

کوئل گالوانیک و نویز جریان^۳ ، سیستم های چند تکنیکی نیز از جمله روشهای پیشرفته دیدبانی خوردگی نقطه شبم محسوب می شوند [۱۵۵] .

در مورد روش کوئل گالوانیکی و نویز جریان ، در سال ۱۹۸۴ دستگاهی بر این اساس ابداع شد . برای مطالعه جزئیات بیشتری در این زمینه می توان به نشریات دیدبانی خوردگی UMIST مراجعه نمود .

^۱ Analog

^۲ On line

^۳ Galvanic Coupling & Current noise

در سیستم های چند تکنیکی از دو یا بیشتر ، روشهای الکترو شیمی استفاده می شود .
نویز الکتروشیمیایی و امپدانس به طور مستقل اخیراً برای بررسی رفتار خوردگی تحت شرایط نقطه شبنم مورد استفاده قرار گرفته اند . به کار بردن همزمان این روشها مزایای بیشتری را به دنبال خواهد داشت . به طوری که نویز الکتروشیمیایی اطلاعات مفیدی در مورد خوردگی حفره ای و شکافی در اختیار قرار می دهد . ولی اگر سرعت خوردگی بالا باشد سطح نویز آشکار شده کاهش می یابد . در این صورت روش A.C امپدانس تحت شرایط سرعت خوردگی بالا بسیار مؤثر است ، با این که روش AC امپدانس نسبت به خوردگی حفره ای حساس نیست [۱۵۵] .

کاربرد هر دو روش به صورت توأم برای بررسی خوردگی بسیار مفید است . در اینجا روشهای صنعتی که امروزه برای دیدبانی نقطه شبنم اسیدی کاربرد دارند مورد بررسی قرار می گیرد .

در یک نگاه کلی ، هنگامی که گوگرد در سوخت دیگ بخار محترق می شود ، تشکیل دی اکسیدگوگرد می دهد . بیشتر این دی اکسیدگوگرد در اتمسفر پخش می شود ، اما مقدار کمی از آن در محفظه احتراق به تری اکسید گوگرد تبدیل می شود و در صورت وجود بخار آب در سیستم ، گازهای اسید سولفوریک تشکیل می شود [۱۵۶] .

گازهای اسیدسولفوریک روی سطوحی که دمای کمتری از نقطه شبنم اسیدی (ADT) دارند کندانس می شوند . مشکل بزرگتری که باید به آن توجه داشت این است که ذرات کربن بر روی سطح اسید رسوب می کنند و یک لایه اسیدی اشباع از کربن تشکیل می دهند

و این امر سبب آلودگی^۱ سیستم می شود. این لایه های اسیدی اشباع ممکن است شکسته شوند و از طریق دودکش وارد محیط شده و پخش شوند که نهایتاً آلودگی محیط زیست از جمله خسارات خوردگی به واحدها و تجهیزات پیرامون کارخانه را بدنبال خواهد داشت.

تری اکسیدگوگرد در جریان گاز دیگ بخار زمانی به عنوان یک مشکل جدی مطرح می شود که با بخار آب ترکیب شده و به اسیدسولفوریک در جریان گاز دود خروجی تبدیل شود. بنابراین به منظور جلوگیری از حمله اسیدی در داخل سیستم بسیاری از دیگهای بخار با جریان گازی با دمایی بسیار بالاتر از دمای شبنم اسیدی کار می کنند.

البته به منظور کم کردن چگالش اسید، اگر سیستم در دمای بالا عمل کند اتلافی در حرارت و سوخت صورت می گیرد و بازده سیستم کاهش می یابد.

اثرات تری اکسیدگوگرد در دمای شبنم اسیدی در شکل (۵۳۳-۱۵) بررسی شده است. بهترین حالت آن است که دمای گاز کمی بالاتر از نقطه شبنم اسیدی نگه داشته شود. بنابراین بیشترین بازدهی، چگالی اسید به حداقل می رسد.

تشکیل گازهای اسیدسولفوریک در فرآیند احتراق تقریباً غیر قابل اجتناب است. همچنین خطرات خوردگی در قسمتهای سرد انتهایی که دمایی کمتر از نقطه شبنم اسیدی دارند، بسیار جدی است. به منظور حل این مشکل و با توجه به ارزش اقتصادی سوخت و همچنین با توجه به آلودگیهای زیست محیطی ناشی از اسیدسولفوریک، مهندسين و

^۱ Fouling

مدیران کارخانه و شیمییدانها توجه زیادی به دیدبانی نقطه شب‌بم اسیدی معطوف داشته اند تا بدین طریق بازده کارخانه افزایش یابد و مشکل خوردگی برطرف شود .

در این قسمت سه مدل از دستگاههای دیدبانی نقطه شب‌بم اسیدی بررسی می شود [۱۵۶]:

الف - مدل شب‌بم متر ۲۰۰ (قابل حمل)

این مدل برای دیدبانی نقطه شب‌بم اسیدی خصوصاً برای کارخانجاتی که تنها به طور متناوب نقطه شب‌بم را دیدبانی می کنند ، به کار می رود .

به کمک این دستگاه می توان بازده دیگ بخار را کنترل نمود ، و حفاظت از خوردگی را نیز به طور دقیق بررسی کرد . و همچنین ارزیابی صحیحی از اضافه کردن افزودنیها به سیستم و تغییرات در وضعیت سوخت ، داشت .

این وسیله بسیار محکم و قابل اعتماد است و می تواند به راحتی از نقطه ای به نقطه دیگر حمل شود .

مدل شب‌بم متر ۲۰۰ شامل یک پروب از جنس فولاد زنگ نزن و یک واحد کنترل است . این پروب در روزنه های مناسب دیدبانی در سیستم دیگ بخار قرار می گیرد و پروب ثبت کننده نقطه شب‌بم ، دمای نقطه شب‌بم اسیدی (ADT) و میزان اسید تشکیل شده (RBU) و دمای جریان گاز را به صورت سیگنالهایی به واحد کنترل ارسال می کند . واحد منترل از دو الگوی سنجش و یک شیر کنترل هوا تشکیل شده است .

این دو الگوی سنجش دو هدف را دنبال می کنند . یکی از آنها جریان الکتروود و RBU را ثبت می کند و دیگری دمای آشکارساز و دمای جریان گازی را بیان می کند .

شیر کنترل هوا به اپراتور کمک می کند تا جریان هوای سرد را بمنظور نگهداشتن پروپ در میزان چگالش اسید ثابت ، تأمین کند .

اگر مجموعه ای از نقاط مختلف سیستم دیگ بخار دیدبانی شود ، اپراتور می تواند میزان تشکیل اسید (RBU) را ارزیابی کند و بنابراین مقدار خوردگی در سیستم مشخص می شود ، بنابراین تنظیم فرآیند احتراق بدون نیاز به نمونه برداری از گاز و آنالیزتر انجام پذیر است [۱۵۶] .

مزایای این مدل شبنم متر از این قرار است [۱۵۶] :

۱ - کاربرد آسان و سریع

۲ - قابل حمل بودن

۳ - اندازه گیری دمای جریان گاز ، ADT و RBU

۴ - استحکام تجهیزات آن

۵ - عدم نیاز به کالیبراسیون یا مهارت های شیمیایی

در اینجا لازم است به کاربردهای شاخص این مدل اشاره شود :

۱) در نقاط و مواضع دشواری مثل انتهای سرد^۱ سیستم و پیش گرمکن های هوا .

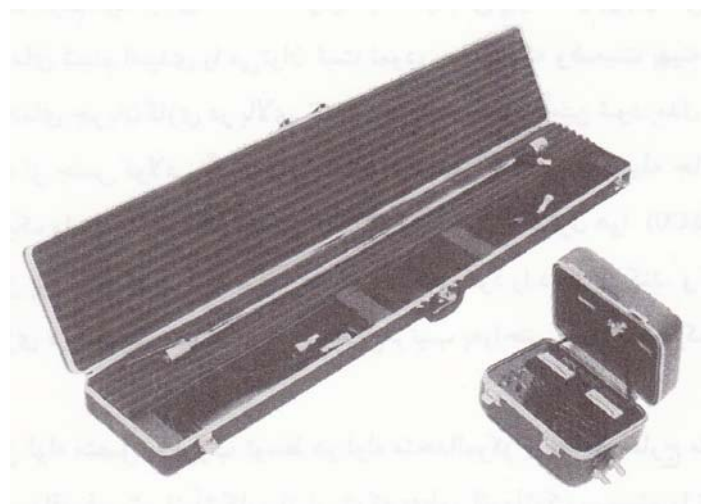
قبل و یا بعد از گرمکن های هوا ، بمنظور ارزیابی مشکلات خوردگی و آلودگی و تشخیص عملکرد صحیح سیستم ، می توان این مدل شبنم متر را بکار برد .

۲) در ارزیابی افزودنیهای سوخت .

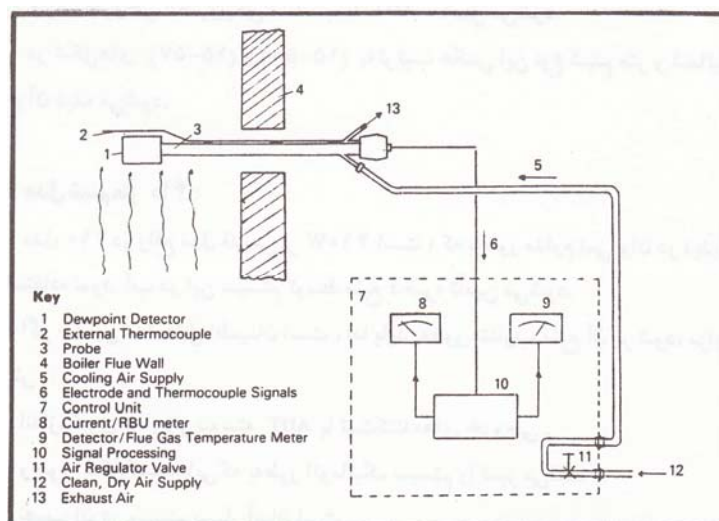
^۱ Cold End

به منظور تعیین تأثیر افزودنیها به سوخت و نحوه برآورد عملکرد آنها می توان از این مدل دستگاه شبنم سنج استفاده نمود .

در شکل های زیر ، این نوع شبنم متر شماتیکی از نقشه و طرح آن نشان داده می شود :



شکل ۵۵-۱۵: مدل ۲۰۰ شبنم متر اسیدی



شکل ۵۶-۱۵: شماتیکی از طرح مورد نظر

ب (شبنم سنج پیوسته مدل W ۴۱۰ :

مدل شبنم متر اسیدی W ۴۱۰ زمینه یک دیدبانی پیوسته را بوجود می آورد و به کمک این مدل دمای شبنم اسیدی را می توان ثبت نمود ، به نحوی که وضعیت بهینه احتراق توسط بکار بردن دمای جریان گازی در بالای ADT ، در همه زمانها تأمین شود . مدل W ۴۱۰ شامل یک پروپ از جنس فولاد زنگ نزن و یک لوله متصل به آن و دو وسیله جانبی متصل به سیستم و یک واحد کنترل الکترونیکی (ECU) و یک واحد کنترل هوا (ACU) است .

این پروپ به کمک لوله متصل به آن عملکرد خود را دنبال می کند . و در دیواره عبور جریان گازی دیگ بخار نصب می شود و بدین ترتیب به راحتی می تواند حرکت کند یا ثابت شود .

این لوله متصل به پروپ توسط دو لوله متحدالمرکز به محیط خارج متصل می شود و این لوله در واقع قسمتی از آشکارساز است که به طور اتوماتیک سیستم را تمیز می کند و بخاراتی از آب و هوا را به سمت سطح آشکارساز هدایت می کند [۱۵۶] .

سیگنالهایی که از آشکارساز یعنی الکتروود و ترموکوپل به واحد ECU می آید پردازش می شود و یک خروجی الکترونیکی متناسب با ADT حاصل می شود .

در شکل های (۱۵-۵۷) و (۱۵-۵۸) به ترتیب عکس این نوع شبنم متر و شماتیکی از طرح آن دیده می شود .

ج (مدل شبنم متر ۴۱۰ :

مدل ۴۱۰ در واقع مدل قدیمی تر W ۴۱۰ است ؛ که به طور مداوم نمی توان در دیدبانی از

آن استفاده نمود . آب در این سیستم توسط منبع ذخیره تأمین می شود .

اگر چه این مدل قابل اطمینان است ، اما باید به طور متناوب منبع آب پر شود ، مزایای این

روش :

۱ - اندازه گیری مداوم و پیوسته ADT با ثبت کننده های خروجی .

۲ - وجود آشکار کننده هایی که به طور اتوماتیک سیستم را تمیز می کنند .

۳ - نصب آن در سیستم بسیار آسان است .

۴ - عملکرد مطمئن دارد .

۵ - نیاز به نگهداری ندارد .

۶ - نیاز به کالیبراسیون و مهارت های شیمیایی ندارد [۱۵۶] .

کاربردهای شاخص این مدل :

۱- در مسیر ورود هوا به پیش گرمکن ها :

برای دیدبانی مداوم در تشکیل اسید در دیگ بخار و نیز کنترل وضعیت سوخت و ارائه

کمترین حد میزان تشکیل اسید ، می توان از این مدل بهره برد .

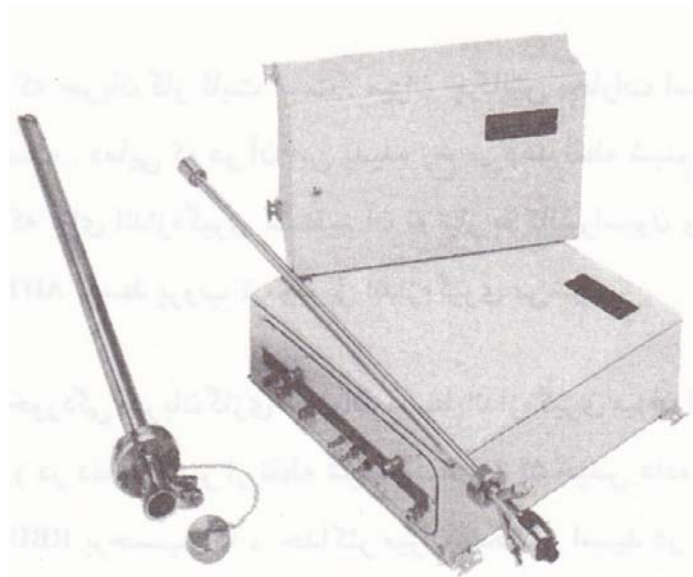
۲- در مسیر خروجی هوا از پیش گرمکن ها :

برای دیدبانی مداوم ADT به منظور دمای صحیح گاز و ارائه حداکثر بازده در دیگ

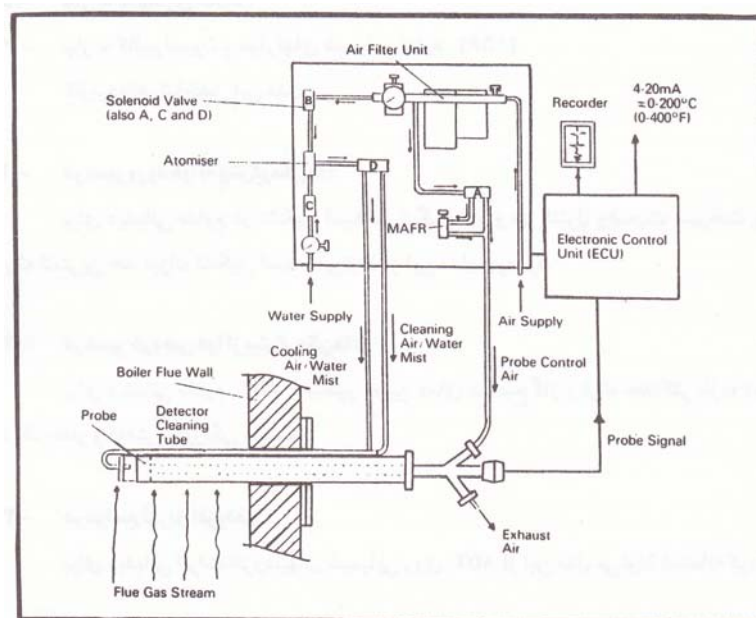
بخار و کاهش خوردگی سیستم .

۳- در مواضع تزریق افزودنی :

برای دیدبانی اثرات افزودنیها شیمیایی روی ADT از این مدل می توان استفاده کرد .



شکل ۵۷-۱۵ : مدل 410W شبنم متراسیدی

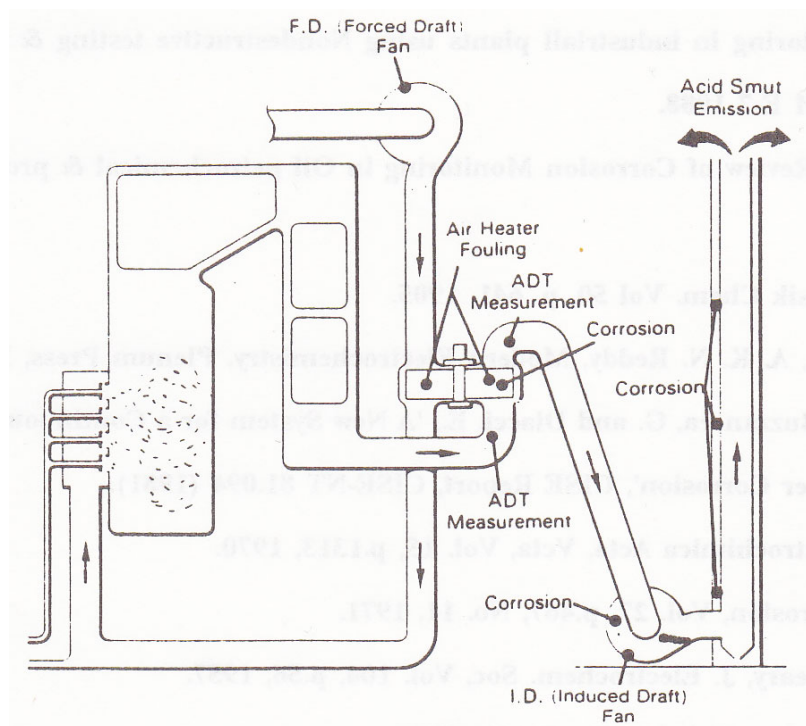


شکل ۵۸-۱۵ : شماتیکی از طرح شبنم متر مدل 410 W

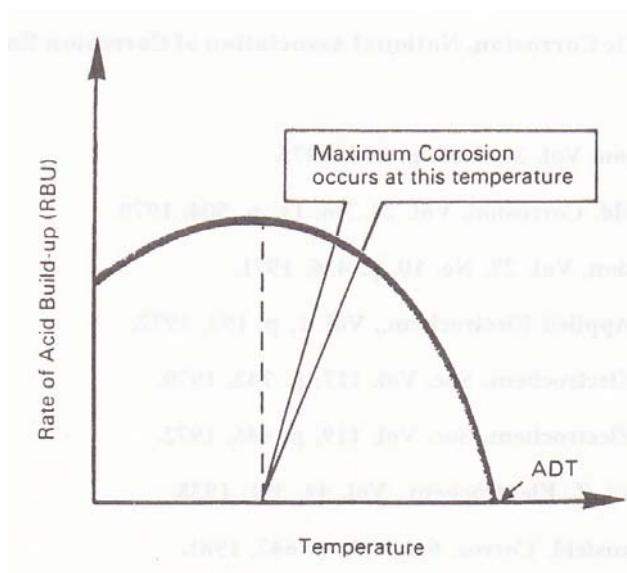
ADT : هنگامی که جریان گاز ثابت است . میزان چگالش بخارات اسید برابر میزان تبخیر است . دمایی که در آن این پدیده رخ می دهد نقطه شبنم اسیدی (ADT) نام دارد که برای اندازه گیری مستقیم آن نه نیاز به کالیبراسیون و نه نیاز به مرجع است . ADT توسط پروب ترموکوپل اندازه گیری می شود .

RBU : پتانسیل خودگی جریان گازی می تواند توسط اندازه گیری میزان اسیدی که تشکیل می شود (در دمایی کمتر از نقطه شبنم اسیدی) تشخیص داده شود . با رسم منحنی RBU بر حسب دما ، حداکثر میزان چگالش اسید در یک دمای ویژه مشخص می شود . هر سطح فلزی که در معرض جریان گازی در این دما قرار گیرد حداکثر چگالش اسید و حداکثر خوردگی روی آن رخ می دهد [۱۵۶] .

در شکل های زیر اثرات چگالش اسید و منحنی RBU برحسب درجه حرارت نشان داده می شود :



شکل ۵۹-۱۵: اثرات چگالش اسید



شکل ۶۰-۱۵: منحنی RBU بر حسب حرارت

١. Dillon, C.P. Corrosion control in chemical process industries" New York ١٩٨٦
٢. Sheri, ١١ "Corrosion", Vol ٢, third ed. ١٩٩٥.
٣. Grills, R. H, Tsue M.C, "Nondestructive Inspection With Portable Ultrasonic Imaging", corrosion monitoring in industrial plants using Nondestructive testing & electrochemical Methods", ASTM E' ١٩٨٨.
٤. Dawson, J. L. "Review of Corrosion Monitoring in Oil petrochemical & process Industries, ١, ٨٢.
٥. J. Tafel, Z. Physic Chem. Vol ٥٠, p. ٦٤١, ١٩٠٥.
٦. J. O.M, Bockris, A. K. N. Reddy, Modern Electrochemistry. Plenum Press, New York ١٩٧٣. , Ron Cherri, c., Buzzancea, G. and Dice, E., 'A New System for a Continuous Monitoring of Steam Condenser Corrosion', CISE Report, CISE-NT ٨١, ٠٩٤ (١٩٨١).
٨. S. Barnett, Electrochemical Alta, Veta, Vol. IS, p. ١٣١٣, ١٩٧٠.
٩. S. Barnett, Corrosion, Vol. ٢٧, p. ٤٦٧, No. ١١, ١٩٧١.
١٠. M.Stem, A.L. Geary, J. Electrochemical. Soc, Vol. ١٠٤, p. ٥٦, ١٩٥٧.
١١. M. Stem, Corrosion, Vol. ١٤., No. ٩ ٤٤٠t, ١٩٥٨.
١٢. S. Barnett, Ceros. Sci., Vol ٩ p. ١٤٥, ١٩٦٩.
١٣. M. Stem, Corrosion, Vol. ١٤., No. ٧, ٣٢٩t, ١٩٥٨.
١٤. G. A. Match. "The Measurement of Instantaneous Corrosion Rates." Proc. Second Int.

Congress on Metallic Corrosion, National Association of Corrosion Engineers, Houston, Texas, p. 936, 1963.

15. S. Barnett, Corrosion, Vol. 31, No. 5, p. 164, 1975.

16. G. Lauer, F. Mansfield, Corrosion, Vol. 26, No. 11, p. 504, 1970.

17. F. Mansfield, Corrosion, Vol. 27, No. 10, p. 436, 1971.

18. Fontana, Green, J. Applied Electrochemical., Vol. 1, p. 193, 1972.

19. R. J. Morrissey, J. Electrochemical. Soc. Vol. 117, p. 742, 1970.

20. R. J. Morrissey, J. Electrochemical. Soc. Vol. 119, p. 446, 1972.

21. C. Wagner, W. Traud, Z. Electrochemical., Vol. 44, 391, 1938.

22. W. J. Lorenz, F. Mansfield, Corros. Sci, Vol., p. 647, 1981.

23. Roe Strummer, Corrosion Monitoring Pros, Signs "Presented at ICOSM 83, London 1973.

24. John Newman, "Mass Transport and Distribution in the Geometries of Localized Corrosion, R. W. Staehle, Brown, J. Kruger, A. Agawam, Eds., National, Association of Corrosion Engineers, Houston, p. 40, 1974.'

25. John Newman, J. Electrochemical. Soc., Vol. 117, p. 507, 1970.

26. William H. Tiedemann, John Newman, Douglas N. Benn ion, J. Electrochemical. Soc., Vol. 120, p. 206, 1973.

27. F. Mansfield, M. W. Ken dig, S. Tsai, Corros. Sci, Vol. 22, p. 400, 1980, 1966.

28. John Newman, J. Electrochem. Soc., Vol. 113, P. 400, 1980, 1966.

29. John Newman, J. Electrochem. Soc., Vol. 117, p. 198, 1970.

30. Kemal Nisancioglu, J. Electrochem. Soc., Vol. 121, p. 523, Appendix II, 1974.

٣١. Kemal Nisancioglu, Lawrence Berkeley Laboratory Report No. LBL.١٨٨٠ (Dissertation) University of California, Berkeley" September, ١٩٧٣.
٣٢. Kemal Nisancioglu, SINTEF Report No. STF٣٤ F٧٩٠٢٢ Sondheim.
٣٣. B. Tribollet, J. Newman, Abstract ١٩٤, presented at the ١٦٤th meeting of the Electrochemical Society, Washington" DC, ١٩٨٣.
٣٤. A. Caprani, C. Deslouis, M. Keddam, Ph. Morel, B. Tribollet, Abstract ١٩٨٣ presented at the ١٦٤th meeting of the Electrochemical Society, Washington, DC, ١٩٨٣.
٣٥. C. Fiaud, R. Chanrouri, M. Keddam, G. Maurin H. Takenoute Layers, "Impedance Measurements in Thin" Met., Corros., Mainz" ١٩٨١.
٣٦. C. Deslous, M. Duprat, M. Keddam G. Moran" B. Tribollet, Abstract ١٩٨٣, presented at the ١٦٤th Meeting of the Electrochemical Society, Washington, DC, ١٩٨٣.
٣٧. S. H. Glarum, J. Electrochemical Soc., Vol., ١٢٤, p. ٥١٨, ١٩٧٧.
٣٨. John Newman, J. Electrochemical Soc., Vo., ١١٣, p. ٥٠١, ١٩٦٦.
٣٩. F. Mansfeld, M. W. Kendig, Werkst. Korros., Vol., ٣٤, p. ٣٩٧, ١٩٨٣.
٤٠. Florian Mansfeld, Corrosion, Vol., ٣٥, No. ٥, p. ٣٠١, ١٩٨١.
٤١. Notes for PHD course, Southampton Colledge of further Education ١٩٩١.
٤٢. Bevaga T.G, "Engineering consideration systems" petrolite corp.
٤٣. Britton C.F "Effective corrosion monitorinng " Material performance, National Association of Corrosion Engineers" April ١٩٨٨.
٤٤. Cooper G. L. "proper Electrical - Resistance corrosion probe span selection", "Electrochemical techniques corrosion", NACE, ١٩٧٦.

٤٥. NACE publication ID ١٨٢, Wheel test Method for Evaluation of mm persistent Inhibitors for oilfield Applications, Mater. Performline., ٢١(١٢), ٤٥ (١٩٨٢).
٤٦. Wachter, A., Skei I. and stillman, No, corrosion, ٧, ٢٨٤" (١٩٥١).
٤٧. Stroud, E. G. and vernon, W.H., J. Appl. Chem., ٢, ١٧٨, (١٩٨٢).
٤٨. Levin, S. Z., Gintzbery, S. A., Dinner, SM, and Kuchinsky, V. N., ٢nd Ferara Conference on Corrosion Inhibitors (٢SETC) ١٩٦٥, University of Ferara.
٤٩. U. R. Evans "The Mechanism of Rusting". Quarterly Reviews (١٩٦٧) ٢١,٢٩ "The Oxidation of Metals and Alloys" First supplementary volume, Arnold (١٩٦٩), ٩, ٨١٣.
٥٠. U. R. Evans "The Mechanism of Rusting" corrosion (١٩٦٩) ٩, ٨١٣.
٥١. Dawson J. L Review of Corrosion Monitoring. Petrochemical & Process Industries ١٩٨٢.
٥٢. "Seminar on Conditioning Monitoring" Southampton Ins. ١٩٩١.
٥٣. Hobin, T. P., Survey of Corrosion Monitoring and the Requirements,. Brit. J. ٢٨٤-٢٩٠, (١٩٧٨).
٥٤. Koven, R., 'Reaching Tose Remote Corners of Reactors', Atom, ٣٨٨, ٨. ١١.
٥٥. Halmshaw, R., Non - Destructive Testing, Arnold, London (١٩٨٧).
- Calliste, W. G., Corrosion Monitoring by Non-Destructive Testing as an Inspection Tool and Means of loss Prevention', Bull.Inst, Corrosion Science and Tech. Issue ٥٢, pp ٢١٢, August (١٩٧٥).

๑๖. Corrosion Control Engineering Joint Venture Task Group Review of Current Practices for Monitoring Bacteria Growth in Oilfield systems" ICorr Document ๐๐๑๑๙๗ (๑๙๙๗).
๑๗. Fothergill, J. R. Willis, P. and Waywells, D. 'Development of High Temperture Ultrasonic Transducers for under Sodium Viewing Applications', Brit. J. of Not, ๓๑, ๐, ๒๐๙-๒๖๓ (๑๙๙๙).
๑๘. Birring, A. S., 'Ultrasonic Detection of Hydrogen Attack in Steels', Corrosion, ๔๐ No. ๓, ๒๐๙-๒๖๓ (๑๙๙๙).
๑๙. Maggard, M. G., 'Detecting Internal Hydrogen Attack', Oil and Gas J., ๙๐-๙๔, ๑๐ March (๑๙๙๐).
๒๐. Amonna., Monitoring Flow Growt, NST Centre, HarweU Laboratory (๑๙๙๙).
๒๑. Silk, M. G., 'Can Non-Destructive Inspection Be Reliable ?' Atom ๓๗๗, ๔-๗ March (๑๙๙๙).
๒๒. Loushin, L.L., First Application of Artificial Intelligence for Corrosion Control in the Petroleum Industry', Materials Performance, ๓๗, ๖, ๗๗-๙๓, June (๑๙๙๙).
๒๓. Bergstrom, D. R., " Case Histories-Electricall Resistance Probes Control Corrosion in Chemical Industry ", Materials Performance, ๓๐, ๙ ๑๗,๒๐, September (๑๙๙๑).
๒๔. Fincher, D. R., Nestle, A, C. and Narr, [๐] "Coupen Corrosion Rates Versus Hydrogen Probe Activity",
๒๕. Harrell, J. B." Corrosion Monitoring in the CPP, Chemical Eng. Prog., ๑๗-๒๑, March (๑๙๗๙).

٦٦. Liening E.I., "Industrial Applications of Corrosion Probes (Case Histories)', Materials Prog., ٧٤, ٣, ٤٣, ٤٦, March (١٩٧٨).
٦٧. Call W, L. M, Richardson J.A and Dawson, J. L. "Corrosion Monitoring Using Polarization Resistance Measurement: i) Techniques and Correlation.ii) source of errors Br. Corros. ١, ١١ No ٣, ١٢٣-١٣٩ (١٩٧٦).
٦٨. Neufeld, P. and Queenan, E. D., "Frequency Dependence of Polarization Resistance Measured with square wave Alternating Potential" Br. Corros. J. ٥, ٧٢, ٧٥, March (١٩٧٧).
٦٩. Vennett, R. M., 'Corrosion Monitoring in oil-field operations using a vacuum hydrogen probe, materials performance, ١٦, ٨, ٣١-٤١ (١٩٧٧).
٧٠. Amer. Soc. Test Mater. Spec. Tech. Publ No. ٩٧٠ (١٩٨٨).
٧١. Gallagher, P., Malpas, R. E. and Shone, E. B., Br. Corros. J. ٢٣" ٢٢٩ (١٩٨٨).
٧٢. Mercer. A. D. and Brook" G. M., La Tribune de l'Industrie, ٤١٧-٤١٨, ٢٩٩ (١٩٧٨).
٧٣. Romco, A. J., Skride, R. T. and Eliassen, R., Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs. ٨٤. No. SA٤ (١٩٥٨).
٧٤. Rowe, L. C., J. Mater., ٥, ٣٢٣ (١٩٧٠).
٧٥. Denison, I. A., J. Res. Nat Bur. Stand., ١٧, ٣٦٣ (١٩٣٦)
٧٦. Ewing, S. P., Amer. Gas. Ass. Mon." ١٤, ٣٥٦ (١٩٣٢).
٧٧. Schwerdtfeger, W. J., J. Res. Nat Bur. Stand., ٥٠, ٣٢٩ (١٩٥٣).
٧٨. Schwerdtfeger, W. J., J. Res. Nat Bur. Stand., ٥٢, ٢٥٦ (١٩٥٤).
٧٩. Schwerdtfeger, W. J., J. Res. Nat Bur. Stand., ٥٨, ١٤٥ (١٩٥٧).
٨٠. Schwerdtfeger, W. J., J. Res. Nat Bur. Stand., ٦٥C, ٢٧١ (١٩٦١).

٨١. Logan, R. H., Ewing, S. P. and Deniso, I. A., Amer. Soc. Test Mater. Spec. Tech. Publ No. ٣٢, ٩٥ (١٩٣٧).
٨٢. Jones, D. A. and Lowe, T. A., J. Materials, ٤, ٦٠٠ (١٩٦٩).
٨٣. Fuller, T. S., Proc. Amer. Soc. Test Mater., ٢٧, ٢٨١ (١٩٢٤).
٨٤. Lathrop, E. c., Proc. Amer. Soc. Test Mater., ٢٧, ٢٨١ (١٩٢٤).
٨٥. Todt, F., Z. Elektrochem., ٢٤, ٥٨٦ (١٩٢٨).
٨٦. Southampton Electrochemical Group, "Experimental Methods in Electrochemistry", Ellis Horwood, Chichester, (١٩٨٥).
٨٧. Von Karman, T. and Angew, Z., Math. Mech., ١ ٢٤٤, (١٩٢١).
٨٨. Cochran, W. G. Proc. Camb. Phil. Soc., ٣٠, ٣٦٥, (١٩٣٤).
٨٩. Pletcher, D. "Industrial Electrochemistry" Chapman and Hall Ltd (١٩٨٢).
٩٠. Riddiford, A. C. "Advance in Electrochemical Studies" Vol ٤, (Ed Delahey), Interscience, London, (١٩٦٦).
٩١. Levich, V. c., Acta Physicochem, URSS, ١٩, ١٣٣, (١٩٤٤).
٩٢. Opekar, P., and Berran, P., J. Electroanal. Chem. ٦٩, ١, (١٩٧٦).
٩٣. Levich, V. G., Acta Physicochim. URSS, ١٧, ٢٥٧, (١٩٤٢).
٩٤. Levich, V. C., "Physicochemical Hydrodynamics" Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York, (١٩٦٢).
٩٥. Gregory, D.P. and Riddiford, A.c. J. Chem. Soc., ٣٧٥٦, (١٩٥٦).
٩٦. Newman, J., J. Phys. Chem., ٧٠, ١٣٢٧, (١٩٦٦).
٩٧. Seyed Razi. M. Ph D Thesis, Corrosion and Protection Centre UMIST. U.K. (١٩٨٩).
٩٨. Al.Sayed, M.S.A., Ph D Thesis, Corrosion and Protection Centre, UMIST (١٩٨٧).
٩٩. Armstrong, R. and Henderson, M., J. Electroanal. Chem., ٣٩, (١٩٨٧).

١٠٠. Fontana, M. G. Industr. Engn. Chem. ٣٩. ٨٧ A (١٩٤٧).
١٠١. Hladky, K., Callow, L. M. and Dawson, J.L., Brit. Cons. J., ١٥, No ١ (١٩٨٠).
١٠٢. Callow, L. M. "Use and Abuse of Water in the Process Industries" Institution of Chemical Engineering, North Western Branch, ٣/٤ November ١٩٨٧ Symposium paper No ٢.
١٠٣. Dawson, J. L., Cox W. M., Eden, D.A., Hladky, K. U.K. Corrosion ٨٣, ٩٩, (١٩٨٣).
١٠٤. Mansfield, F. Corroion, ٣٦. No ٥, ٣٠١, (١٩٨١).
١٠٥. Bard, A. and Faulkner, L. "Electrochemical Methods" John WHey & Sons New York (١٩٨٠).
١٠٦. Randles, J., Diss. Fara. Soc., ١, ١١, (١٩٤٧).
١٠٧. Sluyters, H.J., Rev. Trav. Chime., ٧٩, ١٠٩٢, (١٩٦٠).
١٠٨. Epelboin. I., Keddam, M. and Talennout H., Applied Electrochem. ,٢, ٧١, (١٩٧٢).
١٠٩. Dawson, J.L and John, D.C., Electroanal. Chem., ١١٠, ٣٧, (١٩٨٠).
١١٠. Salinas-Brovo, V.M., M.Sc Dissertation Corrosion and Protection Centre UMIST (١٩٨٨).
١١١. Sluyters- Behbach,M. and Sluyters, H.J. "Electroanalytical Chem", Vol ٤, Chapter ١, Dekkar, New York, (١٩٧٠).
١١٢. Streiche, M.A, ASTM Bull. No. ١٨٨, ٣٥, Feb (١٩٥٣).
١١٣. Smith, LW. and pingel, V.J., J. Electrochem. Soc. ٩٨, ٤٨ (١٩٥١).
١١٤. Cleary, H.I., Corrosion, ٢٤, ١٥٩, (١٩٦٨).
١١٥. May, R., J. Insl Metals, ٤٠, ١٤١ (١٩٢٨).
١١٦. Hoar, T. P. and Hines, J. G., J. Iron Steel Insl, ١٨٢, No. ١٢٤, ١٥٦ (١٩٦٥).

۱۱۷. Skold, R. V. and Lawson, T. E, Corrosion, ۱۳, ۱۳۹t (۱۹۵۷).
۱۱۸. Stern, M. and Weisert, E D., Proc. Amer. Soc. Test Mater., ۵۹, ۱۲۸۰ (۱۹۵۹).
۱۱۹. Barnartt, S., Corrosion, ۲۷, ۴۶۷, (۱۹۷۱).
۱۲۰. Oldham, K.B and Mansfeld, F., Corrosion, ۲۷, ۴۳۴ (۱۹۷۱).
۱۲۱. Hickling, J., Ph.D. Thesis, University of Cambridge (۱۹۷۴).
۱۲۲. Jones, D.A. and Greene, N. B. Corrosion, ۲۵, ۳۶۷ (۱۹۶۹).
۱۲۳. Wilde, B. E, Corrosion, ۲۳, ۳۷۹ (۱۹۶۷).
۱۲۴. Bureau, M., ۹th Fatigue Congress, ۷۹ (۱۹۶۸).
۱۲۵. Mansfeld, F., Corrosion, ۲۹, ۳۹۷ (۱۹۷۳).
۱۲۶. Mansfeld, F., Corrosion, ۳۰, ۹۲ (۱۹۷۴).
۱۲۷. Mansfeld, F., J. Electrochem. Soc. ۱۱۸, ۵۴۵ (۱۹۷۱).
۱۲۸. Mansfeld, F., J. Electrochem. Soc. ۱۲۰, ۵۱۵ (۱۹۷۳).
۱۲۹. Stern, A. c., Corrosion, ۲۵, ۴۵۵ (۱۹۶۹).
۱۳۰. P.W. Palmberg, J. Vac. Sci. Technol., ۱۲, ۳۷۹, (۱۹۷۵).
۱۳۱. G.C. Allen and R.K. Wild, J. Chem. Soc., ۴۹۳, (۱۹۷۴).
۱۳۲. D.M. Hercules. Anal. Chem., ۴۲, I, ۲۰ A, (۱۹۷۰).
۱۳۳. H.H. Brongersma and P.M. Mul, Surf. Sci., ۳۵, ۳۹۳, (۱۹۷۳).
۱۳۴. P.M. Read, Research and development, ۹, ۱۲۰, (۱۹۸۵).
۱۳۵. J. Perreira" J. Siejka and S. Rigo, Corros. Sci, ۲۰, ۹۱, (۱۹۸۰).
۱۳۶. H. Leidheiser and S. Music, Corros. Sci, ۲۲(۱۲), ۱۰۸۹, (۱۹۸۲).
۱۳۷. R.H. Thibau, C.W. Brown and R.H. Hddersbech, Appl. Spectroscopy, ۳۲, ۵۳۲, (۱۹۷۸).
۱۳۸. A.V. McRae, Surface Sci. ۳۱۹, (۱۹۷۴).
۱۳۹. V.R. Hower, Corros. Sci, ۷, ۷۳۵, (۱۹۶۷).

١٤٠. K.W. Andrews and H. Hughes, ASTM.STP.٣٩٣, Philadelphia, ٣, (١٩٦٥).
١٤١. M. Francon, Progress in Microscopy" Row. Peterson and Co., Evanston, Pa. (١٩٦١).
١٤٢. B. Cox, J. Nucl. Mat ٢٩, SO, (١٩٦٩).
١٤٣. G.E. Thompson, and G.C. Wood, Anodic films on aluminium, Treatise on Materials Science and Technology, Vol. ٢٣, Ed. J.C. Scully, Academic Press, ٢٩٤, (١٩٨٣).
١٤٤. C.W. Hughes, G.P. Sabol and G.P. Airey, Microstructural Science, Vol. I, Ed. R.J. Gray and J.L. McCall, American Elsevier, ١٩٩, (١٩٧٤).
١٤٥. K.L. Moazed, Vol. ١١, pt.1 Techniques in Metals Research, Ed. R.F.Bunshah, Interscience Publishers, ١٢٨, (١٩٦٨).
١٤٦. G.K.L. Cranston and J.T. Lynch, Appl. Surf. Sci, ٥(٢), ١٦١, (١٩٨٠).
١٤٧. , Nishikawa, Bull, Japan. Inst Mel, ١٧(٩), ٧٤٦, (١٩٧٨).
١٤٨. R Cox, J. Nuclear Mat, ٢٧, ١, (١٩٦٨).
١٤٩. J. Kruger and R.P. Frankenthal, Techniques in Metals Research, Vol. IV, pt ٢, Ed. R.F. Bunshah. Interscience, New York, (١٩٦٩).
١٥٠. LAND Combusion Company, Sulphuric Acid Dewpoint Meters, Product Data Sheet ١١٧,
١٥١. Dawso, J.L. "Review of Corrosion Monitoring Techniques", Corrosion Monitoring in oil, Petrochemical & Process Industries, (١٩٨٢).
١٥٢. Seminar on Condition Monitoring, Southampton Ins. (١٩٩١).
١٥٣. J.c. Brankovich, "Online Corrosion Monitoring for Process Plant Control", NACE, MP Nov, (١٩٩٤).
١٥٤. Monitz RJ. "Process Industries Corrosion"(١٩٨٦).

١٥٥. NACE TCP٥, "COrrOsion ContrOl in Petrolleum Production",
١٥٦. Shrier L.L, "Corrosion" Vol. ٢, third Ed. Butterworth Heinemann,
(١٩٩٥).

فصل شانزدهم

۱۶- طراحی و نقش آن در کاهش خسارات خوردگی

۱۶-۱- مقدمه

بایستی توجه نمود که در اکثر تجهیزات و دستگاهها، نقاطی وجود دارند که از بقیه قسمتها ضعیف ترند و یکی از دلایل به وجود آمدن نقاط ضعیف و نواحی آسیب پذیر در اکثر تولیدات و سازه های فنی و مهندسی، کم توجهی به پدیده خوردگی در طراحی است [۲]. داشتن اطلاعات کافی در مورد مواد مناسب و قابلیت دسترسی مطلوب به آن اطلاعات، اساس یک طراحی صحیح و خوب مهندسی را تشکیل می دهد. طراحی جهت به حداقل رسانیدن خوردگی صرفاً زمانی می تواند قابل اعتماد باشد که به عنوان بخشی از یک طراحی کامل در نظر گرفته شود [۱].

طراحی غالباً به عواملی نظیر هزینه، قابلیت دسترسی به مواد، ابتکار و استعداد طراح بستگی دارد. به عنوان نمونه، یک طراح ممکن است به صورت بالقوه خطر خوردگی را تشخیص دهد و طرحی به منظور بر طرف ساختن خوردگی یا تعمیر منظم آن سازه در نظر بگیرد. چنین طرحهایی نسبتاً ارزان می باشد. در مواردی که طراحان^۱ تجربه کمی در زمینه خوردگی و ساخت مواد و مونتاژ^۲ آنها داشته باشند، تصمیم گیری های آنان می تواند به شدت زیان بار و هزینه آور باشد [۱].

^۱ Designers

^۲ Fabrication

یک طرح ممکن است مهندس خوردگی^۱ نباشد ، ولی ضروری است که اساس دانش خوردگی را بداند.

این اطلاعات (دانش) می بایست مربوط به طراحی کل تجهیزات باشد. در برخی موارد ، شرایط فرآیند دقیقاً شناخته شده نیست تا طراح بتواند تصمیم به گرفتن یک طرح فنی^۲ بگیرد [۱].

طراحی جهت کنترل خوردگی قسمتی از کل طراحی سازه است که به نوبه خود شامل ارزیابی قیمت طراحی تا بازرسی و کنترل کیفیت^۳ و عملکرد اجزاء می باشد. طراحی نا مطلوب^۴ و ضعیف ممکن است مواد مقاوم به خوردگی را مستعد به خوردگی نماید [۱].

۲-۱۶- عوامل مؤثر بر خوردگی در طراحی

در این بخش عواملی که در طراحی سبب تسریع و تشدید خوردگی می گردد ، بررسی می شود . این عوامل عبارتند از [۴] :

شکل هندسی قطعه ، سازگاری اجزاء ، عوامل مکانیکی ، مهندسی سطح قطعات و عوامل محیطی .

۱-۲-۱۶- شکل هندسی :

از عوامل مهم در طراحی ، رعایت نمودن شکل هندسی صحیح دستگاه و قطعات می باشد . هدف از طراحی صحیح به حداقل رسانیدن یا پیشگیری از شرایط تشدید کننده خوردگی

^۱ Corrosion engineer

^۲ Technical

^۳ Inspection and quatity control

^۴ Poor design

می باشد . این شرایط تسریع کننده می تواند ساکن باشد (نظیر مایعات یا جامدات باقیمانده) یا همانند وقوع پدیده های سایش^۱ یا کاویتاسیون^۲ در قطعات متحرکی که در تماس با جریان سیال قرار دارند ، در شرایط متحرکی به وقوع بپیوندد .

تصاویر موجود در شکل (۱-۱۶) نمونه هایی از شرایط ساکن را در سازه های با آبگذر نشان می دهد ؛ در این نمونه ها ، نواحی مرده (گوشه ها) در اجزایی که در شرایط و وضعیت نامناسب مکانی قرار گرفته اند و یا در اثر عدم دقت در مونتاژ یا تعمیر و نگهداری نامناسب ایجاد شده است ، قابل مشاهده می باشد . به طور کلی انواع مشکلات خوردگی که به دلیل طراحی نامناسب شکل هندسی می تواند ایجاد گردد ، شامل خوردگی موضعی ناشی از ایجاد پیلهای اختلاف دمشی^۳ ، خوردگی شکافی^۴ و خوردگی ناشی از رسوبات^۵ (زیر رسوبی) می باشد . در پیلهای اختلاف دمشی ، منطقه ای که اکسیژن کمتری دارد آند بوده و ناحیه ای که دارای اکسیژن بیشتری است ، کاتدی می باشد . تفاوت در میزان اکسیژن می تواند به هر دلیلی از جمله تماس مستقیم آب با سطح فلز ایجاد می شود . بنابراین باید از ورود و باقیمانده رطوبت یا آب راکد در مدت زمان طولانی جلوگیری کرد . به منظور پیشگیری از این مسأله از منافذ آبگذر یا سیستم تهویه مناسب جهت خشک کردن سطوح و یا از پوششهای محافظ به همراه حفاظت کاتدی^۶ استفاده می شود [۲] . قابل ذکر است که سطوح رنگ شده نیز ، در صورت وجود قطرات آب ، در مدت زمانهای طولانی

^۱ Erosion

^۲ Cavitation

^۳ Differential aeration cells

^۴ Crevice Corrosion

^۵ Deposit Corrosion

^۶ Cathodic Protection

دچار تخریب می شود . خطر تخریب رنگ در زیر قطرات آب افزایش یافته و ممکن است خوردگی حفره ای^۱ اتفاق بیفتد [۲].

۱-۱-۲-۱۶- شکاف ها و نقاط ساکن :

هر نقطه ای که دو سطح فلزی را از هم جدا می کند با ایجاد یک فضای کوچک امکان تشکیل پیل را به وجود می آورد . در اثر خاصیت مویینگی^۲ رطوبت وارد شیار می شود و جایی که مایع با هوا در تماس است ، مقدار اکسیژن محلول افزایش پیدا می کند ، اما در قسمت مرکزی و داخلی ، لایه آب از اکسیژن فقیر است و خوردگی در آن نقطه واقع می شود . شکافهایی که در پشت مناطق جوشکاری شده^۳ یا محل اتصال قنداق تفنگ (که دارای ورق تا خورده ای از فلز است که برای ایجاد سطح بیرونی صاف این عمل انجام می شود) یا در اتصالات پیچ و پرچ یا در پوششهای فلزی می باشد ، باعث به وجود آمدن پیلهای خوردگی می شود . این پیلها همچنین در مکانهایی مه تحت تأثیر رطوبت هستند (به عنوان مثال در بستهای ثابت^۴ ، رشته ها و سیمهای پیچیده شده در بسته بندی های فلزی و پشت برچسبهایی که روی سطوح فلزی می نشینند) به وجود می آید . همچنین نوارهای لاستیکی^۵ نیز می تواند خوردگی شکافی شدیدی روی اتصالات فولاد زنگ نزن ایجاد کند . حمله شکافی^۶ در خیلی از مناطق خودروهای جدید دیده شده است این خوردگی عاملی است که عمر وسیله نقلیه را محدود می کند. این مسأله در درزها^۱ ، پروفیل های اتاق، زیر در ها

^۱ Pitting Corrosion

^۲ Capillary action

^۳ Spot welded

^۴ Inter fastenings

^۵ Rubber grommets

^۶ Crevice – type attack

پشت پوشش های تزینتی و بستها و زیر لبه های تا شده ی درپوشها و درها نمود پیدا می کند. پیلای دیگری نیز توسط صاحب اتومبیل ایجاد می شود و این هنگامی است که می خواهند وسیله نقلیه را با وسایلی مانند نورافکنهای روی سپر ، برچسب های تبلیغاتی که پشت آن رطوبت انباشته می شود و سایر وسایل ویژه و منحصر به فرد تزئین کنند. ابتدا خوردگی از داخل سازه شروع می شود و از درون فلز به سطح خارجی نفوذ می کند. به همین علت اغلب آن را خوردگی درون به بیرون^۲ می نامند.

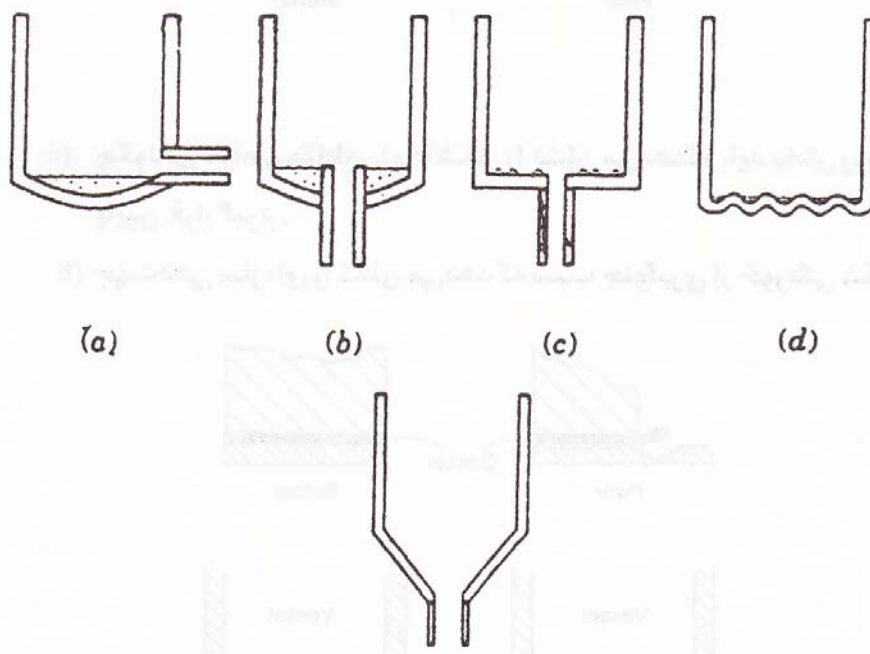
به عنوان یک اصل در طراحی ، شکل هندسی سازه ها باید به گونه ای باشد که از انباشتگی مواد زاید جلوگیری شود. مواد زایدی که آب را جذب کرده یا در خود جمع می کنند(مانند لجن، محصولات خوردگی غیر یکنواخت، لباس و کاغذ های کهنه) باعث تشکیل پیلای از نوع اختلاف دمشی می شوند. خوردگی در قسمت تحتانی مواد زاید، جایی که روی سطح فلز قرار می گیرد، اتفاق می افتد. برای اینکه این نوع خوردگی صورت نگیرد ، سازه باید طوری طراحی شود که آشغال نتواند در آن قسمت انباشته شود. گوشه ها و زوایای گرد داخل سازه باید به گونه ای طراحی شوند تا دسترسی جهت تمیز کردن ، راحت تر صورت گیرد و خطر خوردگی به حداقل برسد . اقدام دیگر جهت کاهش خسارات خوردگی ، ایجاد دسترسی راحت وآسان به پوشش ها و فیلترهاست تا بتوان آنها را مرتباً تمیز کرد. یک سیستم نا منظم و کثیف به مراتب نسبت به سیستم مرتب و تمیز امکان بیشتری برای ایجاد خوردگی دارد[۵].

^۱ Seams

^۲ Inside – out corrosion

مخازن انجام واکنش های شیمیایی و تانکرهای ذخیره^۱ باید دارای مجاری تخلیه باشند در غیر اینصورت مایعات موجود در مخزن ، محیط خورنده ای را در قسمت تحتانی آن به وجود می آورد و اگر مخزن^۲ با هوای اطراف و اتمسفر محیط در ارتباط باشد(مخازن روباز)سبب تجمع ذرات ریز موجود در اتمسفر و باعث خوردگی می گردد[۱].

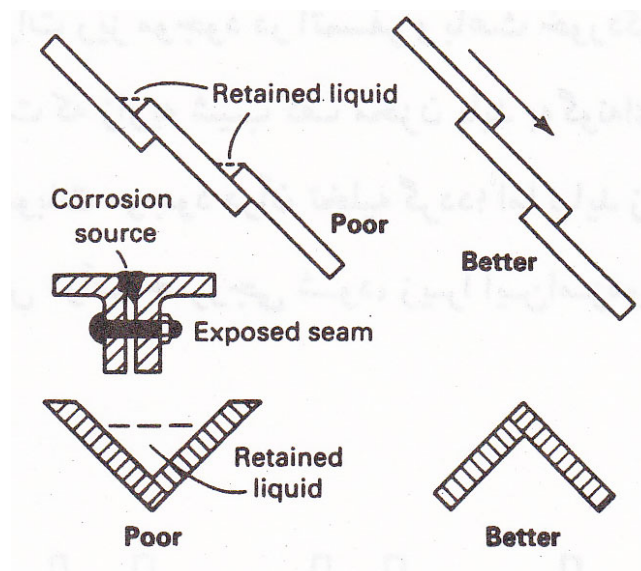
باید توجه داشت که زاویه شیب کف مخزن باید به گونه ای طراحی شود که تمامی ذرات جامد معلق و رسوبات موجود در آن تخلیه گردد اما نباید زاویه شیب به اندازه ای باشد که سبب ایجاد چرخش در آب خروجی شود، زیرا این امر موجب خوردگی سایشی^۳ می گردد.



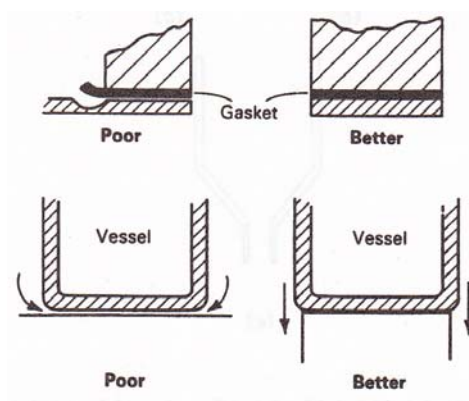
شکل ۱-۱۶: تانکها باید به نحوی طراحی شوند که به طور کامل تخلیه شوند . تصاویر (a.d) طراحیهای نامناسب وضعیت را نشان می دهد و تصویر (e) طراحی مناسب را مشخص می کند .

^۱ Storage Containers
^۲ Vessel
^۳ Erosion corrosion

طراحی اجزاء سازه ها باید به گونه ای صورت گیرد که هیچگونه آب یا مایعی بر روی سطح فلزات جمع نشود. شکلهای (۱۶-۲) تا (۱۶-۹) طراحی های مختلف را نشان می دهد.

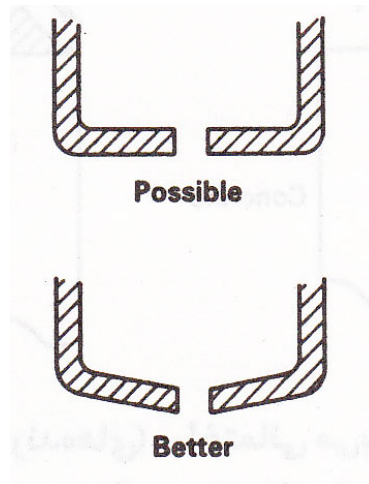


شکل ۱۶-۲: (a) چگونگی طراحی مقاطع L و U شکل را نشان می دهد که باید بخش روباز آن به سمت آن پایین قرار گیرد.
(b) جهت دهی سازه ای را نشان می دهد که سبب جلوگیری از خوردگی شکافی می گردد.

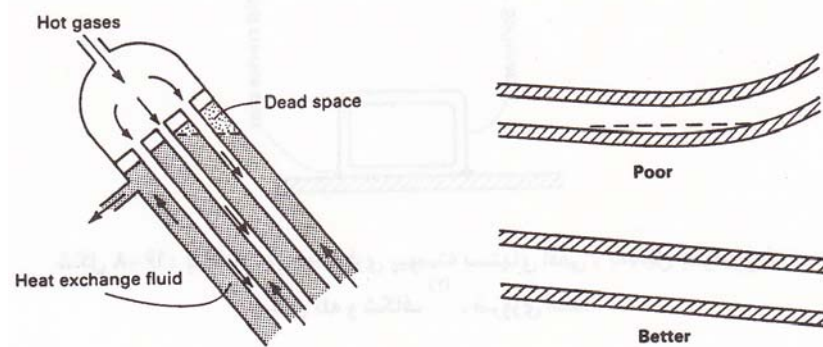


شکل ۱۶-۳: طراحی نامناسب و ضعیف آب بندها^۱ و واشرهایی^۲ را نشان می دهد که می تواند سبب ایجاد نواحی مستعد به خوردگی شکافی شود.

^۱ Seals
^۲ Gaskets



شکل ۴-۱۶: مجاری آبگذر^۱ می بایست جهت اجتناب از حفره دار شدن^۲ کف مخزن با شیبی به سمت پایین طراحی شوند.



شکل ۵-۱۶: لوله های غیر افقی و با شیب غیر یکنواخت می توانند سبب ایجاد حوضچه های کوچکی از مایعات به صورت ساکن بر روی سطوح داخلی لوله شده و منجر به خوردگی شکافی گردند.

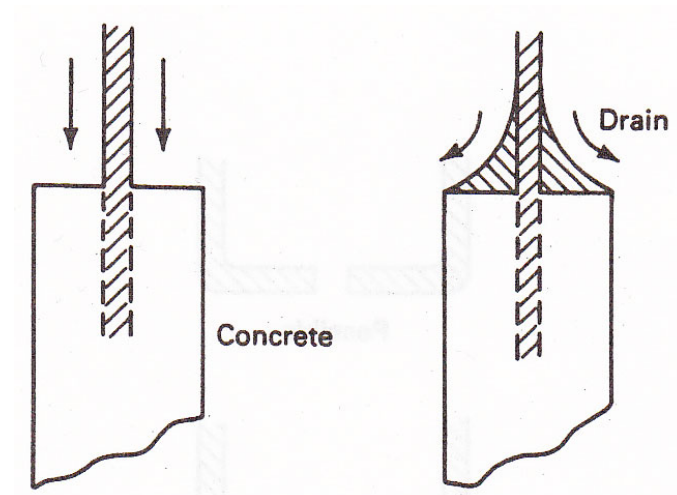
شکل ۶-۱۶: مبدلهای حرارتی غیر عمودی^۳، اگر در برگیرنده گازهای بسیار داغ باشند، سبب ایجاد نواحی مرده^۴ می گردند.

^۱ Drain valves

^۲ Pitting

^۳ Nonvertical heat exchanger

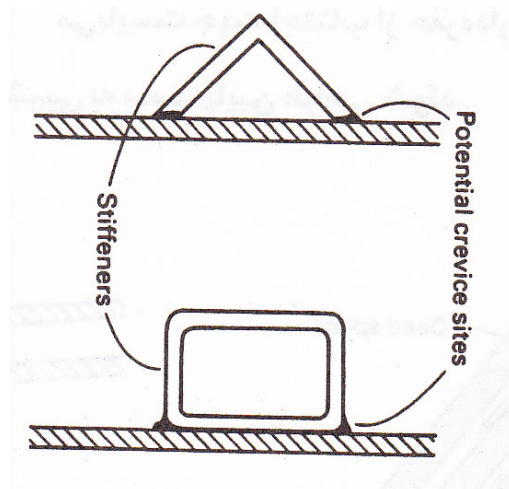
^۴ Dead space



شکل ۷-۱۶: پایه های (نگهدارنده های) ساختمانی می بایست اجازه آبکشی (زه کشی) کامل را بدهند؛ به کارگیری

شیبی در قسمت تحتانی این اجزاء سبب می گردد تا مایعات به جای برخورد مستقیم به حفاظتهای بتنی^۱

به آرامی از آن عبور کنند.

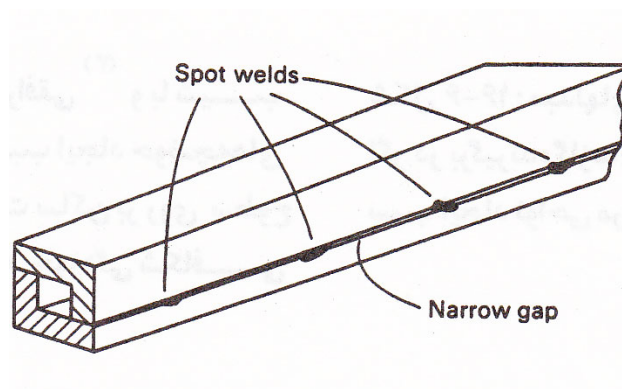


شکل ۸-۱۶: به کارگیری جوشکاری پیوسته بستهای افقی ، به دلیل جلوگیری از تشکیل تله و

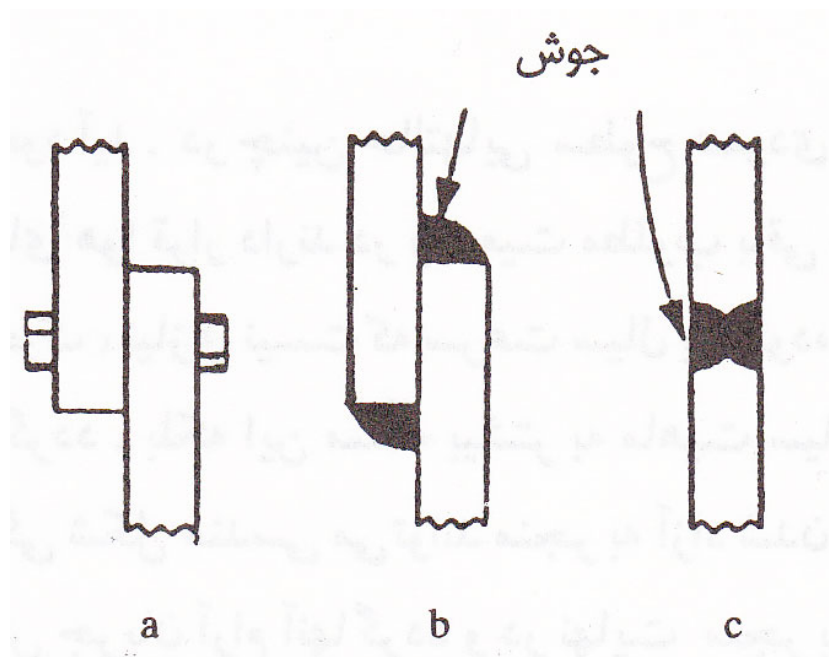
شکاف^۲ ، ضروری است.

^۱ Concrete support

^۲ Traps and crevices



شکل ۹-۱۶: مقاطع مکعب مستطیلی که از دو جزء L شکل تشکیل شده اند، جهت آب بندی آنها از محیط خارج نیاز به جوشکاری پیوسته دارند.

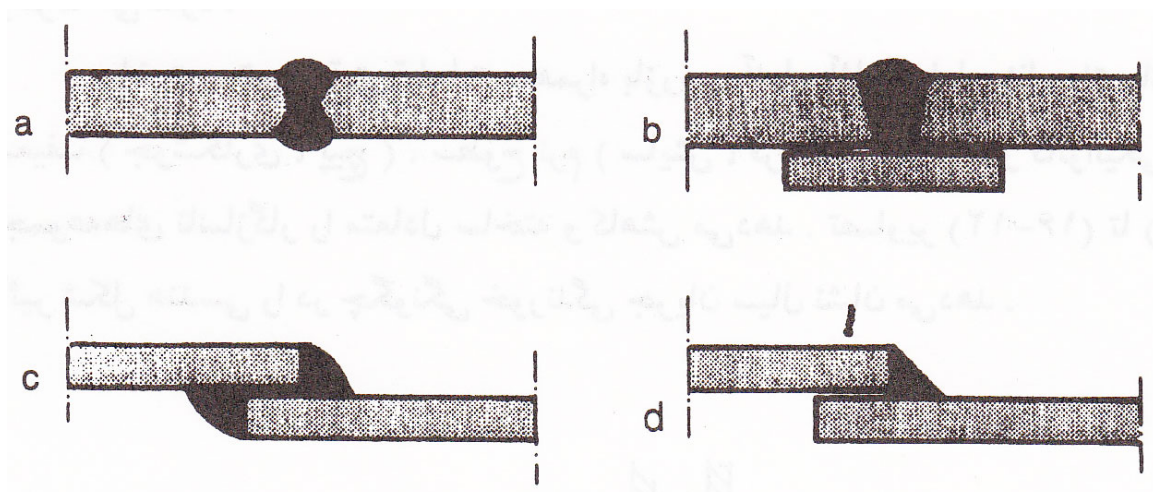


شکل ۱۰-۱۶: طراحی می بایست حتی الامکان به گونه ای صورت پذیرد که احتمال وقوع خوردگی شکافی به حداقل برسد.

(c) طراحی درست

(b) طراحی متوسط

(a) طراحی نادرست



شکل ۱۱-۱۶: در اتصال فلزات نا مشابه باید احتمال وقوع خوردگی شکافی و گالوانیکی بررسی شود (a) و (c)

طراحی نادرست (b) و (d) طراحی درست

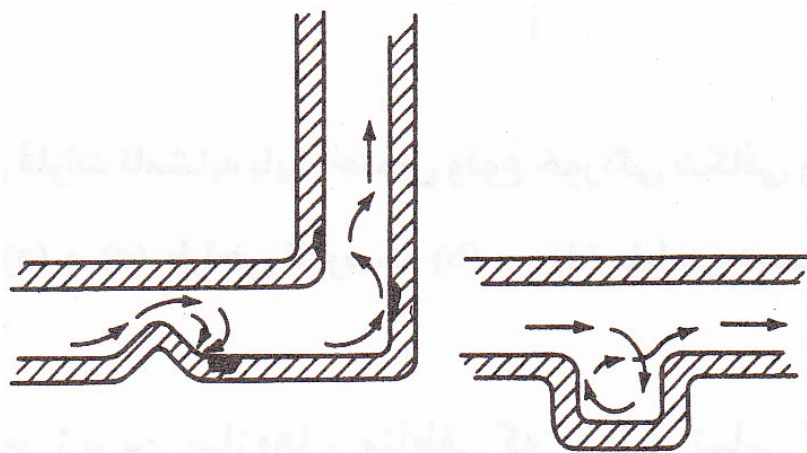
اغلب، سطوح زیرین سازه ها، مناطقی که به دلیل تماس کمتر آنها با جریان هوا، اثر تهویه در آنجا کمتر است، دچار تخریب شدید تری می گردد. در این حالت قطرات آب تا زمانی که به اندازه کافی بزرگ نشده اند (که در اثر وزن خود و نیروی جاذبه^۱ سقوط کنند) بر روی سطح باقی خواهند ماند. خوردگی شدید سطوح زیرین و بیرونی تانکرها، سطوح زیرین و جانبی قسمت های معلق پلها و برجهای فولادی و نیز قسمتهای پایینی تیرهای آهنی می تواند در اثر این عامل به وجود آید. در چنین حالتی سطوح عمودی و فوقانی نزدیک به یکدیگر که در معرض جریانهای هوا قرار دارند در وضعیت مطلوب باقی مانده اند [۲].

در شرایط متحرک، نیازی نیست که سرعت سیال بالا بوده یا حرکت سیال شدید باشد تا سبب تخریب فلز گردد، بلکه این مساله بیشتر به ماهیت سیال و سختی ماده مورد نظر

^۱ Gravity

بستگی دارد . چگونگی شکل هندسی می تواند منجر به آزاد شدن مایعات شده و یا به صورت موضعی سبب اغتشاش جریان آرام آنها گردد و در نهایت منجر به ایجاد وضعیت متلاطم^۱ شود [۱]. موجگیرها^۲ و منحف کننده های قابل تعویض ، در مکانهایی که شرایط ، اجازه استفاده از این گونه وسایل را بدهد می تواند سودمند واقع شود . این وسایل به طور مؤثری مشکلات آسیبهای ناشی از برخورد سیال را به اجزاء اصلی و مهم سازه ها کاهش داده و بر طرف می سازد .

ساخت و نهیه دقیق قطعات به همراه بازرسی آنها ، آثار عواملی نظیر اتصالهای بد و ضعیف (جوشکاری ، پیچ) ، سطوح نرم (سایش ، فرسایش) ، و آثار گالوانیگی ناشی از مجموعه های ناسازگاری را متعادل ساخته و کاهش می دهد . تصاویر (۱۲-۱۶) تا (۱۶-۱۶) تأثیر شکل هندسی را در چگونگی خوردندگی جریان سیال نشان می دهد .

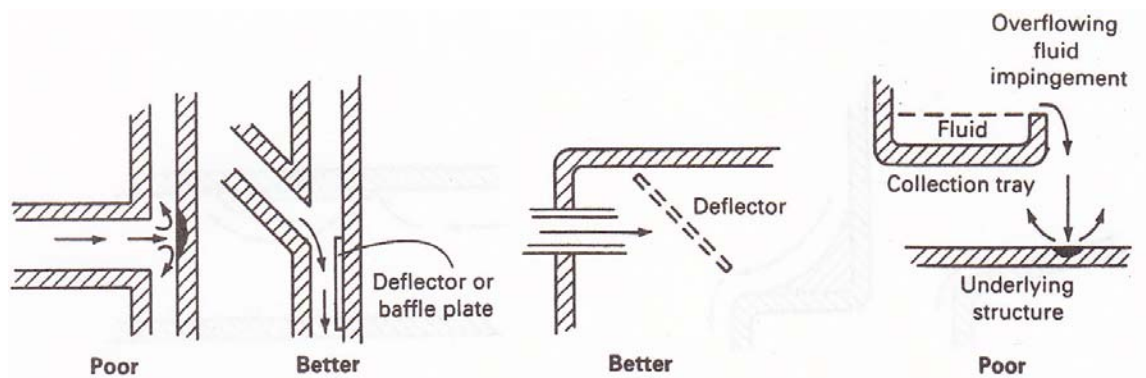


شکل (۱۲-۱۶) : عدم یکنواختی در مسیر عبور جریان سیال می تواند باعث اغتشاش و تلاطم شده و منجر به خوردندگی برخوردی^۳ (آسیب های ناشی از برخورد) گردد

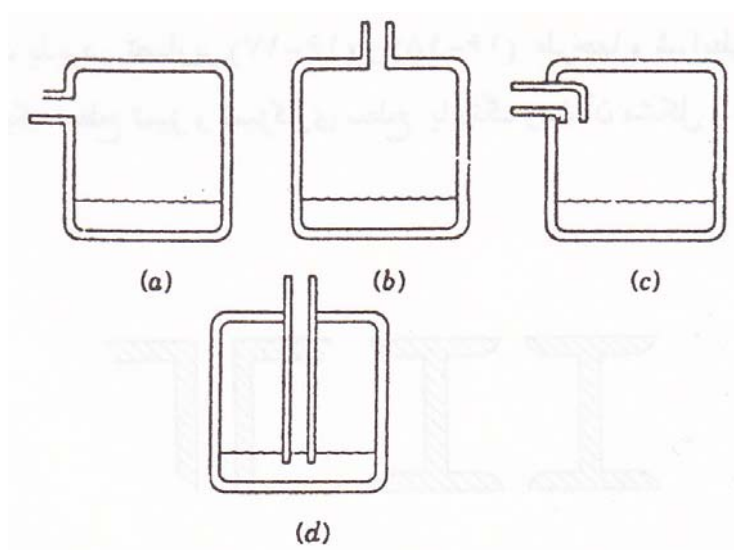
^۱ Turulence

^۲ Defelectors

^۳ Impingement damage

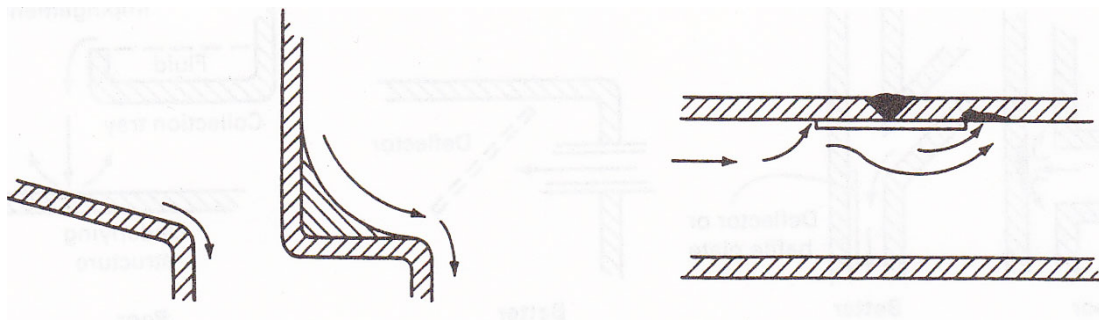


شکل ۱۳-۱۶: از برخورد مستقیم جریان سیال باید اجتناب شود. منحرف کننده ها یا موجگیرها در این موارد می توانند سودمند واقع گردند (تصویر (a)). از برخورد مستقیم سیال سرازیر شده از سینی های جمع کننده سیال به قسمت های دیگر باید جلوگیری کرد. این عمل با جابجایی مکان سازه مورد نظر، افزایش عمق سینی^۱ یا استفاده از منحرف کننده ها انجام می شود (تصویر (b)).



شکل ۱۴-۱۶: سیال تغلیظ شده نباید در حین ورود به مخزن بر روی دیواره ها پاشیده^۲ شود. تصاویر a تا c طراحی نامناسب و تصویر (d) طراحی مناسب و بهتری را نشان می دهد.

^۱ Tray
^۲ Splashing



شکل ۱۶-۱۶: برای سهولت جریان سیال و به

حداقل رسانیدن توقف مایعات باید شیبهای

مناسبی ایجاد شود .

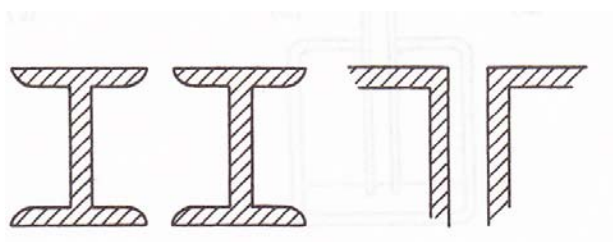
شکل ۱۶-۱۵: صفحات یا حلقه هایی که به عنوان

پشت بند جوش به کار می روند ، می توانند سبب

ایجاد تلاطم موضعی^۱ و شکاف شوند .

قابلیت دسترسی به اجزاء و قطعات در طراحی یک سازه بسیار حائز اهمیت است ؛ چرا که عملیات و ملاحظات پیشگیرانه منظمی چه از لحاظ تعمیر و چه از لحاظ نگهداری آنها می تواند صورت پذیرد .

تصاویر (۱۶-۱۷) و (۱۶-۱۸) طرحها و شرایطی را نشان می دهد که دستیابی به یک سطح تمیز و تمیزکاری سطح یا رنگ زدن آن مشکل و غیر ممکن است .

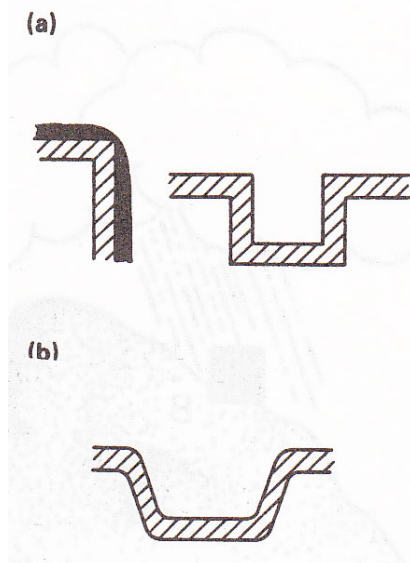


شکل ۱۶-۱۷ : قابلیت دسترسی کم به برخی از سازه های معین باعث می شود که آماده سازی سطح و رنگ زدن

آنها با مشکلاتی روبرو شود ؛ حداقل میزان دسترسی به نواحی مختلف می بایست ۴۵ mm

($\frac{3}{4}$ in) یا $\frac{1}{3}$ ارتفاع سازه باشد .

^۱ Local turbulence



شکل ۱۶-۱۸ : چنانچه سازه بخواهد رنگ شود یا پوشش داده شود باید در طراحی از گوشه ها و مقاطع تیز^۱ خود داری کرد.

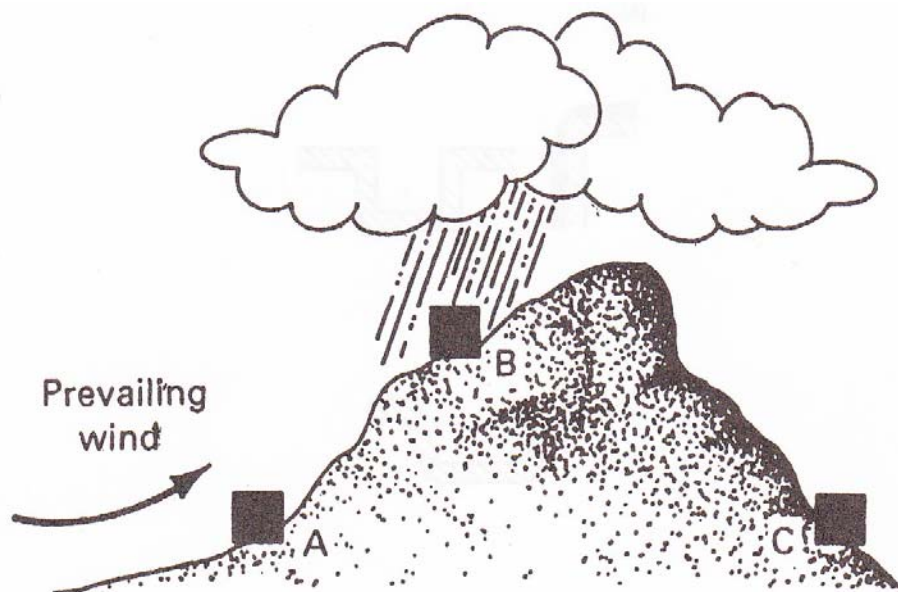
(a) طراحی نادرست (b) طراحی درست .

مناطق که در معرض باد قرار دارند نیز دچار تخریب می شوند . اهمیت آلودگی و آثار مخرب آنها بر روی میزان خوردگی و ملاحظات انجام گرفته در طراحی اینگونه سازه ها در تصاویر ذیل نشان داده شده است طراحی شکل هندسی سازه هایی که در معرض خوردگی اتمسفری^۲ قرار دارند باید با توجه به عواملی نظیر دما ، رطوبت نسبی^۳ ، میزان بارندگی و آلودگی محیط صورت پذیرد . از دیگر مواردی که باید در اینگونه طراحیها به آن دقت کرد ، میزان بارندگی و آلودگی مکان ساخت ، تهیه ، مونتاژ و رنگ زدن قطعات مورد نیاز می باشد . کدهای کاربردی مشخصی می بایست با توجه به موقعیت سازه ها و به لحاظ فصلی پذیرفته شده و انتخاب شوند [۵ و ۲] .

^۱ Sharp corners and profiles

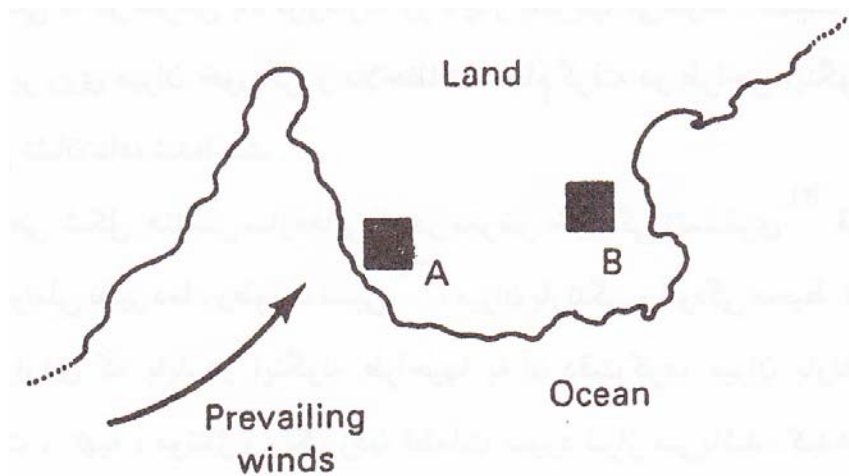
^۲ Atmospheric corrosion

^۳ Relative humidity



شکل ۱۶-۱۹: موقعیت جغرافیایی باید در انتخاب مکان تأسیسات در نظر گرفته شود.

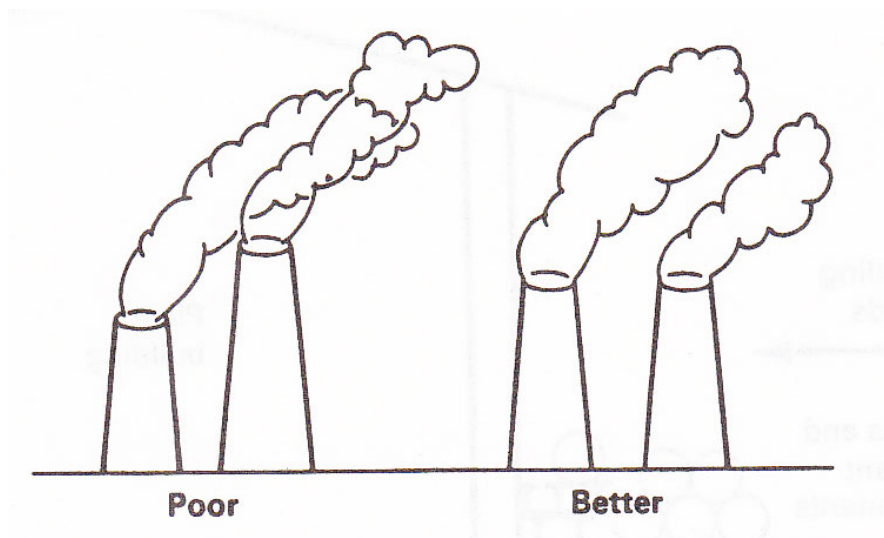
موقعیت (C) ترجیح داده می شود.



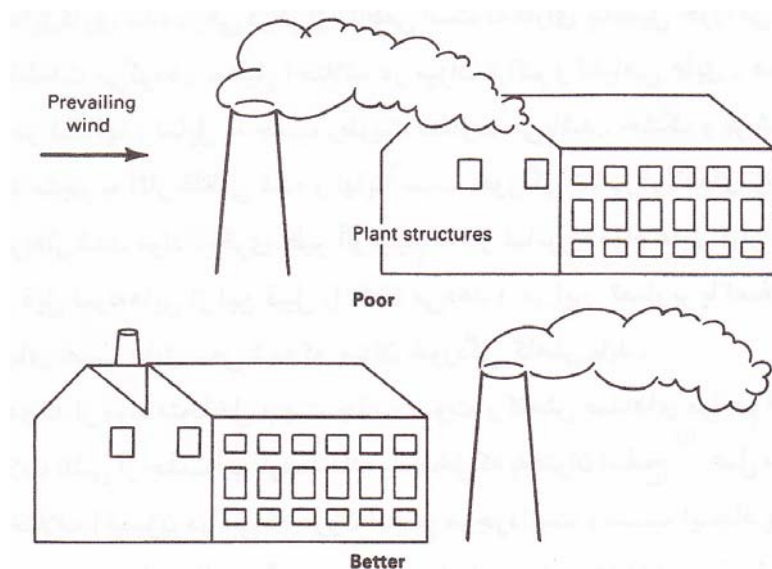
شکل ۱۶-۲۰: در اتمسفرهای دریایی، باید بادهای غالب^۱ در نظر گرفته شوند و جهت آنها مشخص گردد،

موقعیت (b) ترجیح داده می شود.

^۱ Prevailing winds

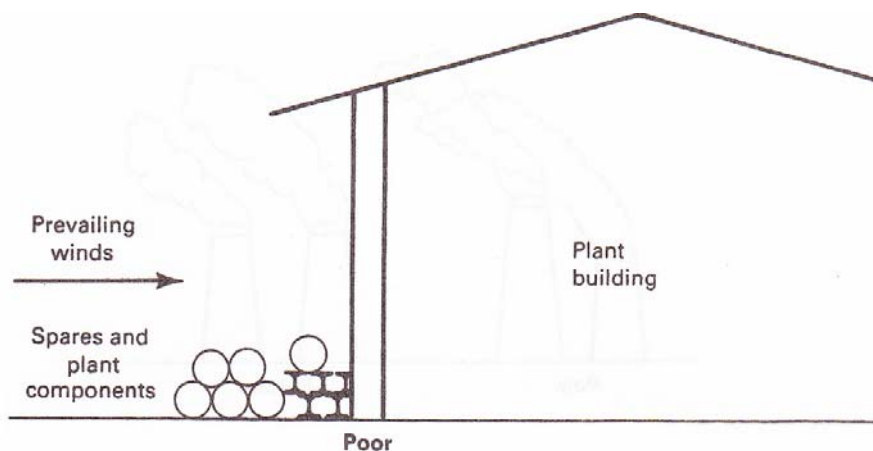


شکل ۲۱-۱۶: از خوردگی ناشی از دود دودکشها و سازه های مشابه که بستگی به ارتفاع دودکش ، مکان و بادهای غالب دارد باید اجتناب شود.



شکل ۲۲-۱۶: کارخانه ها و ساختمان ها نباید در مسیر دود ناشی از دودکش^۱ قرار گیرند.

^۱ Stack



شکل ۲۳-۱۶: اسباب و اجزاء یدکی نباید در مسیر بادهای غالب قرار گیرند و باید در مکانهای بهتری انبار شوند.

نواحی عایق کاری شده، یکی دیگر از مناطقی است که دارای پتانسیل خوردگی بوده و سبب تخریب قطعات می گردد. به دلیل اختلاف در میزان تراکم و انقباض عایق، همچنین تجمع یون کلر در شکافها، تمایل به جذب رطوبت متفاوت می باشد. خشک و تر شدنهای متناوب می تواند منجر به آثار غلظتی شده و نهایتاً سبب خوردگی تنشی فولادهای زنگ نزن خاص و یا حفره دار شدن مواد دیگری نظیر آلومینیم که در تماس با مواد عایق قرار دارند، گردد. تصاویر ذیل نمونه هایی از این قبیل را نشان می دهد؛ در این تصاویر با اصلاح نوع طراحی و روش های نصب عایق سعی شده که میزان خوردگی کاهش یابد.

در مواردی که از مواد متخلخل جهت جذب صوت و کاهش صداهای مزاحم استفاده می شود، مشکلات ناشی از جذب آب توسط ماده متخلخل که به عنوان اسفنج^۱ عمل می کند، وجود دارد. اختلاف اکسیژن در آبی که درون اسفنج موجود است، سبب ایجاد

^۱ Spange

پیل‌های اختلاف دمشی بر روی سطوح فلز می‌گردد. نمونه ای از این مواد متخلخل صفحات فوم ماندی است که در اتومبیل استفاده می‌شود. زمانی که اتومبیل در جاده های مرطوب حرکت می‌کند با جذب آب و خیس شدن صفحات لاستیکی فوم مانند، خوردگی داخل به خارج ایجاد می‌گردد [۲].

جدار حفاظتی لوله ها نیز می‌تواند مسأله ای مشابه را ایجاد نماید؛ مثال زیر گویای این مطلب است:

خوردگی شدیدی روی سطح خارجی لوله های فولادی عایق شده ای که سیستم گرمایش یک کارخانه را تأمین می‌کردند دیده شد. خوردگی در داخل یک ساختمان روی داده بود، جایی که آب نمی‌توانست به صورت قطره قطره به خارج از لایه محافظ هدایت شود و نیز هیچ نشانه ای از نشت نم از لوله دیده نمی‌شد. مشاهده گردید که آب از نقطه ای چندمتر دورتر، قطره قطره روی جداره می‌ریزد. جدار محافظ لوله به منزله یک فتیله عمل کرده و آب را در طول لوله هدایت می‌نمود.

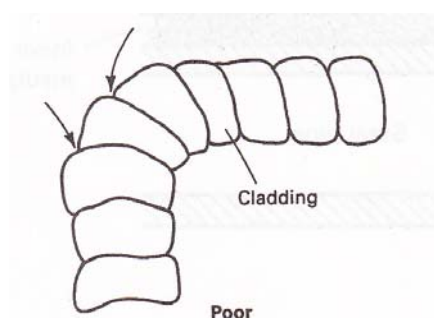
هر چند حرارت لوله مانع از نفوذ آب به سطح فلز در قسمت مدخل می‌گردید، اما هر چقدر لوله در طول خود سردتر می‌شد، آب بیشتری از طریق جداره لوله نفوذ کرده و سطح فلز در همان نقطه ای که تر و مرطوب بود، دچار خوردگی شده بود [۲].

از مواد جاذب رطوبت^۱ نیز باید در تمام مکان هایی که در آنها رطوبت نسبی بالای ۶۰٪ می‌باشد، استفاده گردد. سطوح خارجی باید به منظور جلوگیری از ورود آب کاملاً پوشانیده

^۱ Water – absorbent materials

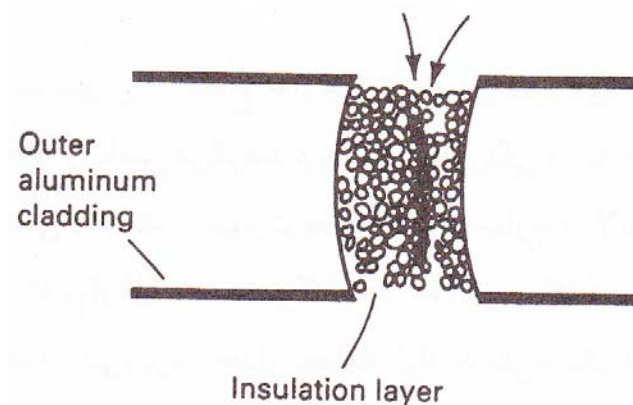
شوند. آب بندی^۱ باید تمام اتصالات را شامل شود و پوشش ها و جدار محافظ قطعات مرتباً بازبینی و تعمیر شوند[۶].

این موارد و دیگر شرایط گفته شده در تصاویر (۱۶-۲۴) تا (۱۶-۲۹) نشان داده شده است.



شکل ۱۶-۲۴: روی هم افتادن نامناسب و طراحی (جهت دهی) غلط پوششهای نوع پوست خرچنگی^۲

اجازه حرکت سیال را نداده و خطر خوردگی شکافی وجود دارد [۱].

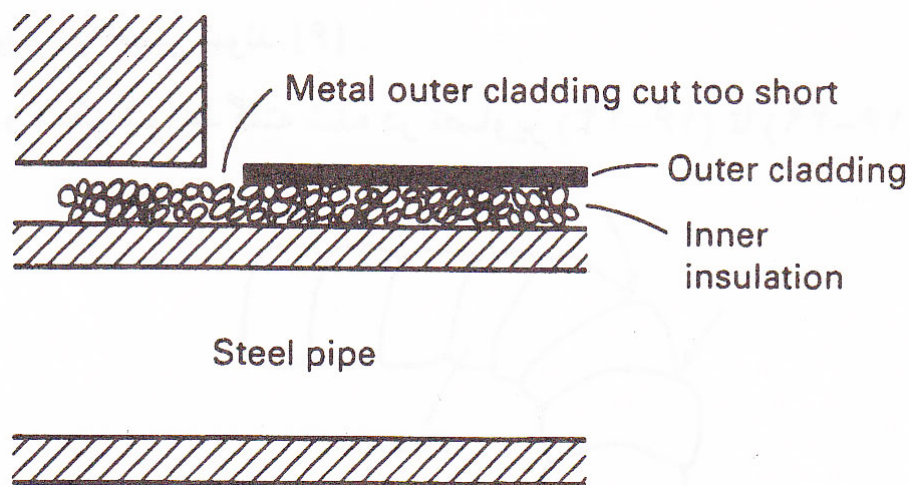


شکل ۱۶-۲۵: ایجاد فاصله ای در عایق ناشی از نصب ضعیف و نادرست آن، اجازه می دهد تا سیال

به راحتی به عناصر موجود دسترسی یابد[۱].

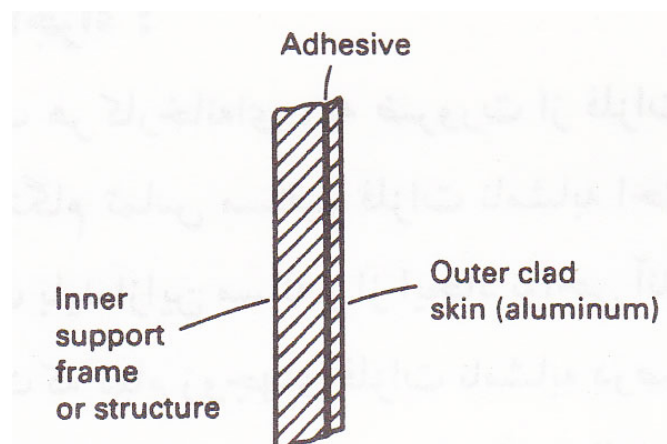
^۱ Sealing

^۲ Lobster – back cladding



شکل ۲۶-۱۶: اگر پوشش خارجی فلز به اندازه ای کوتاه بریده شود که سبب ایجاد فاصله ای با عایق درونی^۱

گردد ، این مسأله سبب می شود که فلز در معرض محیط خورنده قرار گیرد[۱].



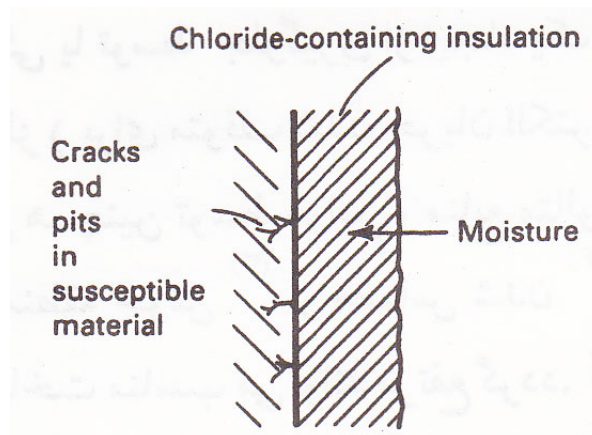
شکل ۲۷-۱۶: تماس و چسبندگی ضعیف یا ناپیوسته مواد چسبنده می تواند منجر به ایجاد شکاف شده

و سبب ورود مایعات به این گونه شکافهای مویی گردد . همچنین مواد چسبنده^۲

ممکن است از خواص آب بندی خوبی برخوردار نباشد[۱].

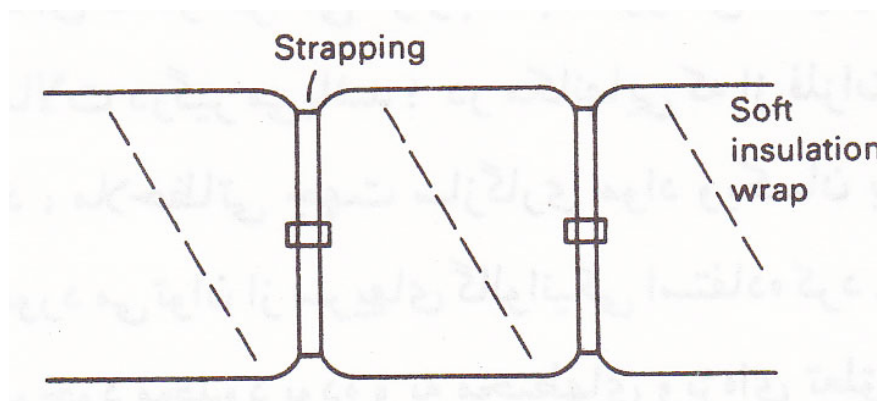
^۱ Inner insulation

^۲ Adhesives



شکل ۲۸-۱۶: عایق سازی ناقص می تواند منجر به ورود آب گردد؛ ورود یون کلر در برخی عایقها می تواند

خوردگی حفره ای یا SCC را در مواد مستعد به وجود آورد [۱].



شکل ۲۹-۱۶: تسمه هایی^۱ که به سختی بسته می شوند می توانند به لایه عایق زیرین آسیب برسانند.

^۱ Straps

۲-۲-۱۶- سازگاری^۱ اجزاء:

در قسمت‌های مختلف هر کارخانه ای ، به ضرورت از فلزات متفاوتی در مجاورت یکدیگر استفاده می شود . هنگام تماس مستقیم فلزات نامشابه احتمال خوردگی گالوانیکی وجود دارد ، که در این صورت باید از این مسأله و از ایجاد نواحی آندی کوچک اجتناب نمود . البته باید توجه داشت که تمام زوجهای فلزات نامشابه در صورت اتصال مشکل آفرین نیستند . مثالهای بی شماری از اتصال دو فلز وجود دارد که سالهای متمادی خدمات مفیدی انجام داده اند ، اگر چه آن فلزات در سری گالوانیکی با هم اختلاف زیادی نیز داشتند . خوردگی دو فلزی زمانی ایجاد می شود که یک پیل گالوانیکی ایجاد گردد . می دانیم که یک پیل تر خوردگی از چهار قسمت تشکیل شده است : آند ، کاتد ، الکترولیت و رسانا ؛ با حذف یک قسمت ، پیل خوردگی تشکیل نمی شود . اگر دو فلز نامشابه (آند و کاتد) اتصال برقرار کنند ، کنترل خوردگی یا توسط جلوگیری از ایجاد یک الکترولیت انجام می گیرد یا به ناچار باید ارتباط بین دو فلز (برای متوقف شدن جریان الکترونهاى بین دو فلز) قطع گردد . خوردگی گالوانیکی همچنین توسط عوامل و منابع متالورژیکی^۲ نیز به وجود می آید . مشکلاتی نظیر پوسیدگی منطقه جوش^۳ و حساس شدن^۴ فلزات ، معمولاً با انتخاب صحیح مواد یا روشهای ساخت مناسب می تواند مرتفع گردد . آثار جریانهای سرگردان^۵ نیز باید در طراحیها مد نظر قرار گیرند . با توجه به آثار مفید سازگاری قطعات ، لزوم به کارگیری

^۱ Compatibility

^۲ Metallurgical

^۳ Weld decay

^۴ Sensitization

^۵ Stray currents

قوه ابتکار و استعداد طراح در به حداقل رسانیدن خوردگی گالوانیکی احساس می شود .

جدول (۱-۱۶) برخی از عوامل مربوطه را فراهم کرده است [۶] .

متداولترین مسأله ای که در طراحی در رابطه با خوردگی گالوانیکی باید رعایت شود ، اجزاء متصل شده و اتصالات درگیر می باشد ؛ در مکانهایی که از فلزات نا مشابه در مجاورت یکدیگر استفاده می شود ، ملاحظات جهت سازگاری مواد و یکسان بودن پتانسیل آنها باید صورت پذیرد . در این مورد می توان از سریهای گالوانیکی استفاده کرد ، ولی باید توجه داشت که سریهای گالوانیکی موجود محدود بوده و به محیطهای ویژه ای تعلق دارد .

پیچیدگی اصطلاحات و واژگان علمی و فنی می تواند مسأله ای مشکل آفرین باشد ؛ چنین اصطلاحاتی نظیر فولاد نرم^۱ ، فولاد زنگ نزن^۲ ، هاستولی^۳ و اینکونل^۴ آنقدر مبهم هستند که اطمینان کافی از عملکرد ماده در محیطی خورنده حاصل نمی شود . زمانی که فلزات ناسازگار به یکدیگر متصل شوند ، ضروری است که از فلز نجیب تر در محل اتصال استفاده شود . اگر عایق کردن دو فلز در محل اتصال سبب ایجاد خوردگی شکافی نگردد ، می تواند در اینگونه موارد ، مفید و سودمند واقع شود . برخی دیگر از مشکلات می تواند ناشی از کاربرد مواد چسبنده ای باشد که به خوبی موضع مربوطه را آب بندی نکرده و درزهای موجود را پر نکرده است [۵] .

^۱ Mild steel

^۲ Stainless steel

^۳ Hastelloy

^۴ Inconel

مساحت نسبی سطوح آندی و کاتدی نیز نباید نادیده انگاشته شود . زیرا نمونه هایی از شکستهای ناشی از خوردگی بدلیل ترکیبی از خوردگی گالوانیکی و شکافی بوجود می آید . میزان خوردگی در نواحی کوچک آندی صدها برابر بیشتر از زمانی است که دو فلز مشابه با مساحت یکسان بکار می روند . اجزاء آندی را می توان برای اطمینان بیشتر ضخیم تر انتخاب کرد . در موارد دیگر نیز ، در نظر گرفتن تعویض راحت آنها روشی است که باید طراح به آن توجه داشته باشد .

زمانی که از پوششهای فلزی ، به خصوص در امتداد لبه های برش استفاده می شود ، همیشه مکان خطر خوردگی گالوانیکی وجود دارد . در این مورد مقاطع مدور و پوششها و آب بندهای مؤثر و مناسب ، سودمند می باشد .

از اتصالات واسطه ای^۱ نیز می توان زمانی که از فلزات مختلف در مجاورت یکدیگر استفاده می شود ، بهره برد .

این موارد و دیگر شرایط گفته شده ، در تصاویر (۱۶-۳۰) تا (۱۶-۳۹) نشان داده شده است. رنگ زدن نامناسب نیز می تواند عمر کاری قطعه را به دلیل ایجاد نواحی آندی و نهایتاً خوردگی موضعی قطعات کاهش دهد [۱] .

در عمل غیر ممکن است که هر نوع پیل گالوانیکی را حذف کرد ؛ از این رو جایی که قرارگرفتن یک پیل غیر قابل اجتناب است ، رعایت موارد زیر می تواند آسیبهای ناشی از خوردگی را به حداقل برساند :

^۱ Transition joints

الف : آندها باید بزرگ انتخاب شوند تا دانسیته جریان خوردگی کاهش یابد .

ب : اگر الکترولیت در سیستم وجود دارد ، باید آندها نسبت به کاتد عایق شوند تا از تبادل یونی بین کاتد و آند جلوگیری کرد . ناحیه کاتدی می تواند سبب ایجاد خوردگی حفره ای در آند شود . در چنین سیستمهایی می توان از آندهای فداشونده استفاده کرد . همچنین می توان فلز خورده شده را بدون از کار انداختن تمام سیستم تعویض کرد . فلزات ضعیفتر باید همیشه به گونه ای قرار داده شوند که قابل دسترسی باشند و مکانی برای تعویض آنها وجود داشته باشد [۷] .

ج : در تمام مواردی که فلزات نامشابه به یکدیگر متصلند ، ناگزیر هستیم هر دو سمت اتصال الکترولیت با فلزات را توسط پوشش محافظ عایق کنیم . فلزات باید از یکدیگر جدا شوند تا از جریان الکترونها در محل اتصال جلوگیری شود .

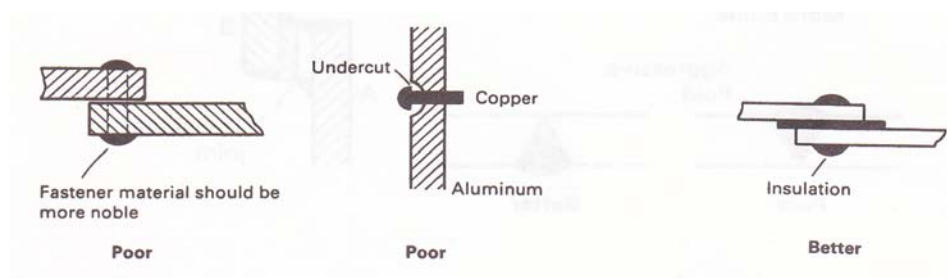
د : خوردگی محیط را تا حد امکان کاهش دهیم [۳] .

جدول (۱-۱۶) منابع خوردگی گالوانیکی را نشان می دهد .

جدول ۱-۱۶- منابع خوردگی گالوانیکی

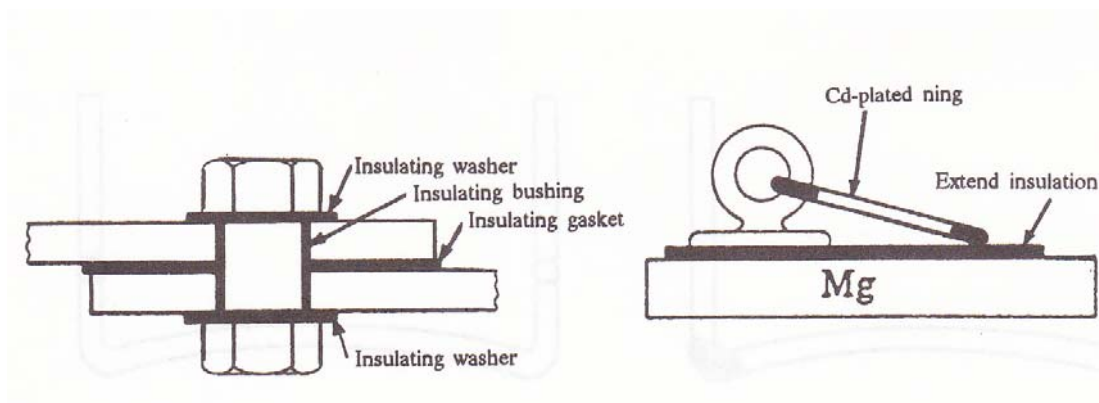
منشاء	ملاحظات طراحی
منابع متالورژیکی	اختلاف پتانسیل فلزات نامشابه ، میزان فاصله از یکدیگر ، مساحت نسبی نواحی آندی و کاتدی ، شکل هندسی عیوب مکانیکی ، کار سرد ، تغییر شکل پلاستیک ، حساس شدن و
منابع محیطی	میزان هدایت و مقاومت الکتریکی سیال ، تغییرات درجه حرارت ،

سرعت و جهت حرکت سیال ، هوادهی ، تغییرات فصلی و محیطی و . .	
میزان فاصله از یکدیگر ، مساحت نسبی نواحی آنودی و کاتدی ، جریانهای سرگردان ، مسیرهای هادی ، مواد مرکب (نظیر بتن های مسلح) و	منابع دیگر



شکل ۳۰-۱۶ : جنس اتصالات^۱ و بست ها باید نجیب تر (به لحاظ پتانسیل) از اجزایی باشد که به یکدیگر متصل می گردند . از زیربرش ها^۲ می بایست اجتناب شود و از واشره های عایق ساز استفاده شود . تصاویر (a) ، (b) و (c) روشهای عایق سازی فلزات از یکدیگر را نشان می دهد [۱] .

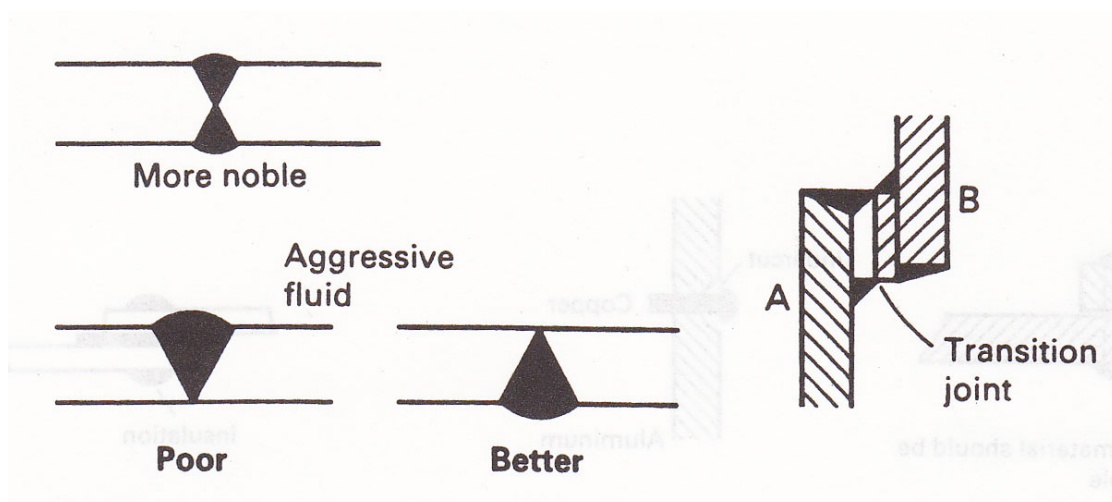
^۱ Fasteners
^۲ Undercent



شکل (۳۱-۱۶): روش های عایق سازی فلزات

(a) دو قطعه از یکدیگر و از محکم کننده عایق می شود .

(b) حلقه کادمیمی که از اتصال آن با قطعه منیزیمی جلوگیری شده است .

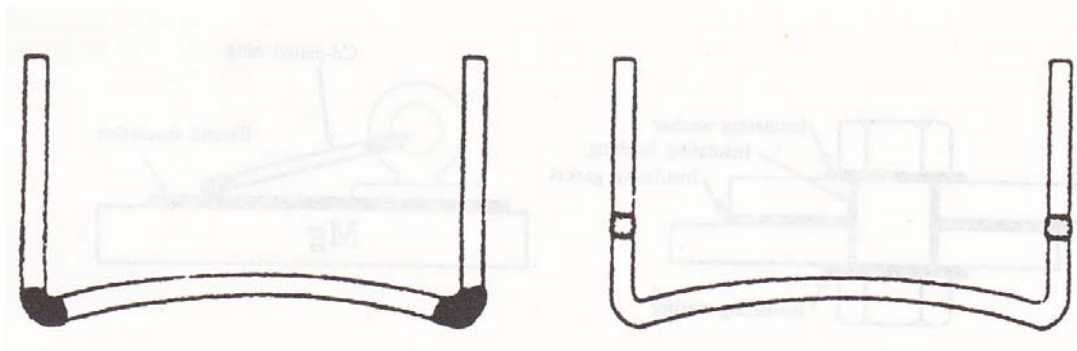


شکل ۳۲-۱۶: الکتروود های جوش^(۱) باید همجنس یا نجیب تر از فلزات پایه باشد . از اتصالات واسطه ای می توان

زمانی که در مرحله طراحی یک زوج گالوانیکی در نظر گرفته می شود ، استفاده کرد و بستر های جوش^(۲)

می بایست به شکل مناسبی و در جهتی قرار گیرنده که آثار گالوانیک به حداقل برسد .

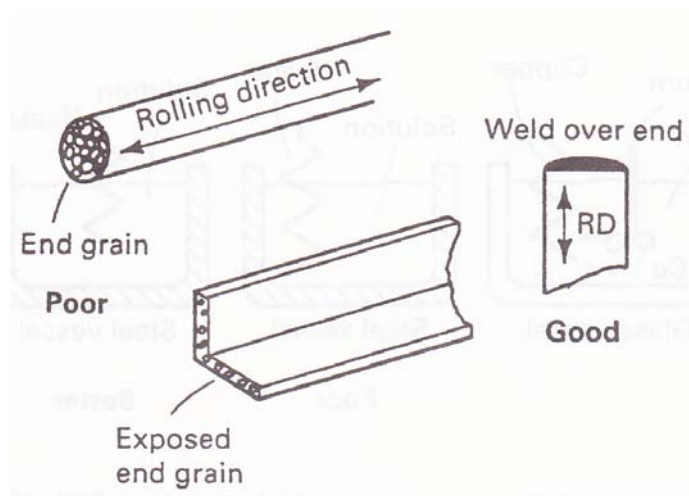
همچنین باید حداقل گرده جوش در معرض محیط خورنده قرار گیرد .



شکل (۱۶-۳۳): جوش های موجود در بخش تحتانی مخزن به دلیل وجود مایعات محبوس شده و تجمع محصولات

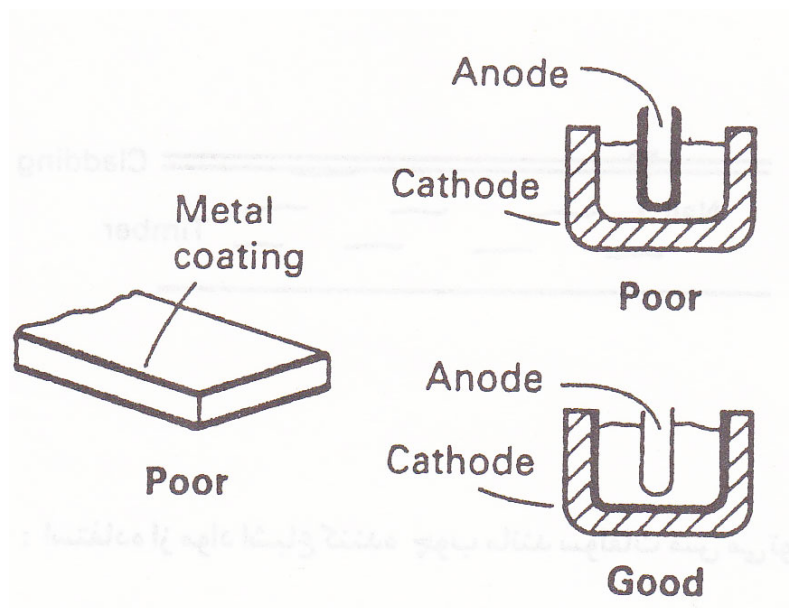
ناشی از عمل کندانه شدن دچار خوردگی می گردد .

b) طرح بهتری برای همان سازه .

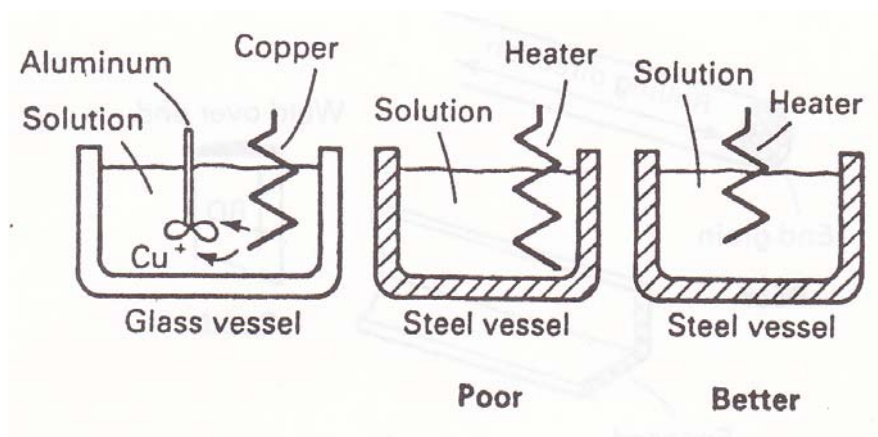


شکل : ۱۶-۳۴ : آسیب ها و صدمات موضعی می تواند به دلیل برش عرضی قطعات سنگین (کار سرد و گرم) به

وجود آید . انتهای دانه ها می بایست از قرار گرفتن در معرض با محیط خورنده مصون باشد .

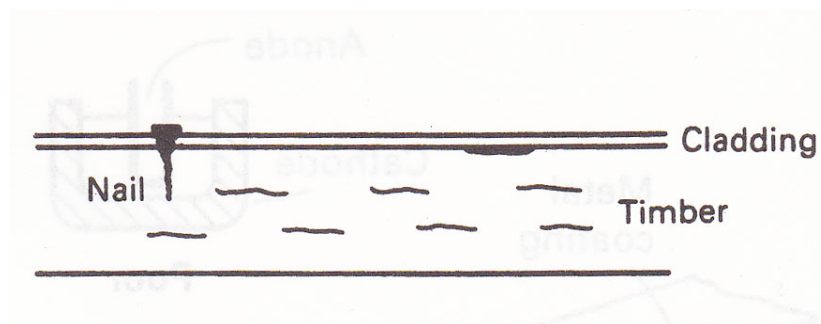


شکل ۳۵-۱۶: در اثر بریدن اجزاء پوشش داده احتمال وقوع خوردگی گالوانیکی وجود دارد. در صورت نیاز اجزاء کاتدی از هر دو جزء متصل به هم باید پوشش داده شوند.

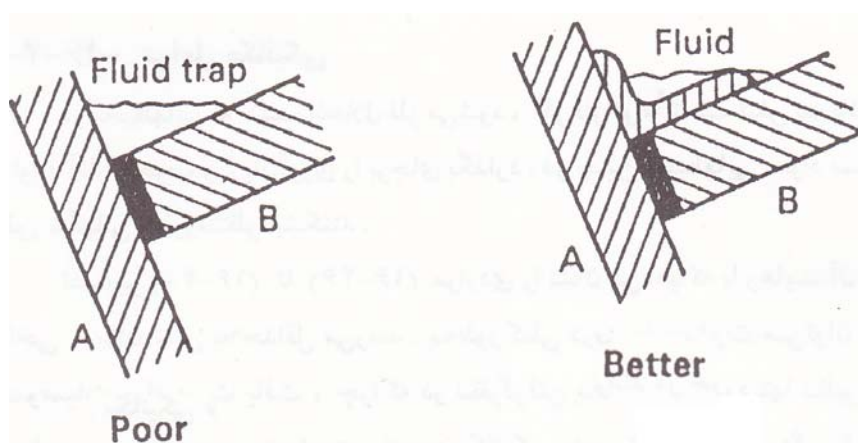


شکل ۳۶-۱۶: انتقال یون از درون مایعات می تواند منجر به خوردگی گالوانیکی فلزات فعال تر گردد. در مثال نشان داده شده در قسمت چپ، یون های Cu^{+} از گرم کننده مسی بر روی همزن آلومینیوم^۱ رسوب می کنند. از این رو استفاده از هم زنهای غیر فلزی در این موارد ضروری است. در تصویر سمت راستی، فاصله گرم کن تا دیواره مخزن به منظور به حداقل رسانیدن انتقال یون ها، افزایش یابد

^۱ Aluminum stirrer



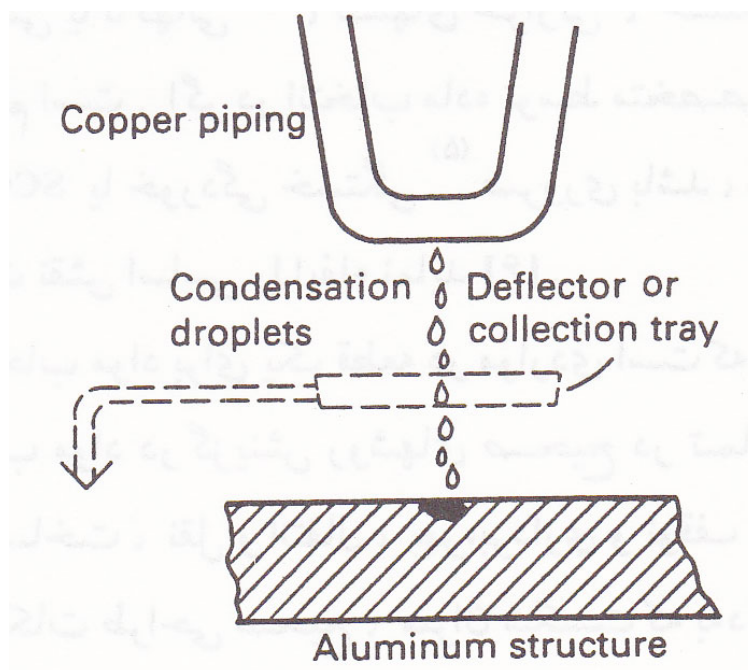
شکل ۳۷-۱۶: استفاده از مواد اشیاع کننده چوب مانند سولفات مس می تواند برای میخها محیط خورنده ای را ایجاد کند ، زیرا اختلاف پتانسیل زیادی بین میخ و مواد مسی وجود دارد. همچنین روکش آلومینیمی^۱ در این طراحی خطرناک می باشد .



شکل ۳۸-۱۶: از تماس بین دو فلز در محیطی حاوی مایعات محبوس می توان با استفاده از گسترش آب بندها ، اعمال بتونه^۲ یا با یک پوشش جلوگیری کرد.

^۱ Aluminum cladding

^۲ Mastic



شکل ۱۶-۳۹: می توان با به کارگیری سینی های جمع کننده یا منحرف کننده ها از برخورد قطرات کندانس شده با سازه زیرین (از جنس آلومینیومی) پیشگیری کرد.

۳-۲-۱۶- عوامل مکانیکی

در محیط هایی که سبب انحلال فلز می شود، اگر فلز تواماً تحت تنش نیز باشد، تنش می تواند آثار مخرب و زیان آوری را بر جای بگذارد. در چنین محیط هایی، مواد ممکن است به طور ناگهانی و غیر منتظره بشکنند.

تصاویر (۱۶-۴۰) تا (۱۶-۴۶) مواردی را نشان می دهد که با رعایت آن موارد در طراحی، میزان تنش به حداقل می رسد. به طور کلی در عمل بندرت می توان به تمام خصوصیات مواد دست یافت، چرا که در نظر گرفتن برخی محدودیتها نظیر خواص شیمیایی و مکانیکی ضروری است. عیوب مکانیکی نیز می توانند در خوردگی مؤثر بوده و سبب شروع خوردگی شوند و یا اینکه منجر به شکست مکانیکی قطعه گردند. کنترل کیفیت می تواند در

این زمینه مؤثر باشد . در طرحهایی که به صورت موضعی سبب تمرکز تنش یا ایجاد تنشهای پس از ساخت می گردد ، باید نهایت دقت را مبذول داشت . از مهمترین مسائلی که می بایست در طراحی در نظر گرفته شود ، میزان تنش انتخاب شده برای مواد می باشد . تأثیر تنشهای کششی ، فشاری یا برشی^۱ ، تنشهای دوره ای (سیکلی)^۲ ، بار گذاری های ارتعاشی یا ناگهانی^۳ ، تنش های حرارتی ، خستگی و سایش^۴ (فرسایش ، اصطکاک) نیز مهم است . اگر در انتخاب ماده توسط متخصصین ، استفاده از مواد مستعد به شکست ناشی از SCC یا خوردگی خستگی^۵ ضروری باشد ، در این صورت تنش می تواند در خوردگی قطعات نقش اساسی را ایفاء نماید [۶].

اهمیت انتخاب مواد برای یک قطعه در مواردی است که قطعه از اجزاء مهم و بحرانی سازه باشد . انتخاب مواد در گزینش روش های صحیح در تمام مراحل عملکرد مواد و تجهیزات ، شامل ساخت ، نقل و انتقال ، بهره برداری و توقف واحد حائز اهمیت است . با رعایت نکات طراحی صحیح ، میزان شکست که به دلایل ارتعاش ناشی از حمل و نقل ، پرداخت سطحی ضعیف و یا غیر یکنواختی پوششهای سطحی و غیره به وقوع می پیوندد به میزان زیادی کاهش می یابد .

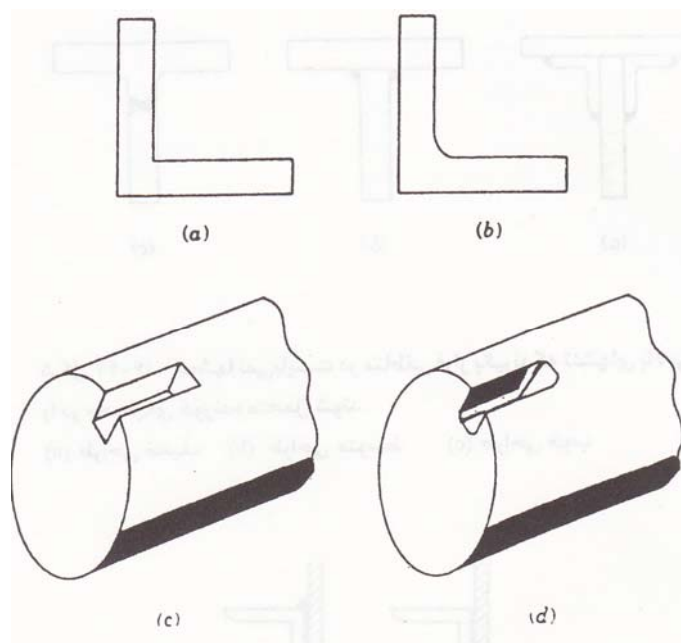
^۱ Shear stresses

^۲ Alternative stresses

^۳ Vibration or shock loading

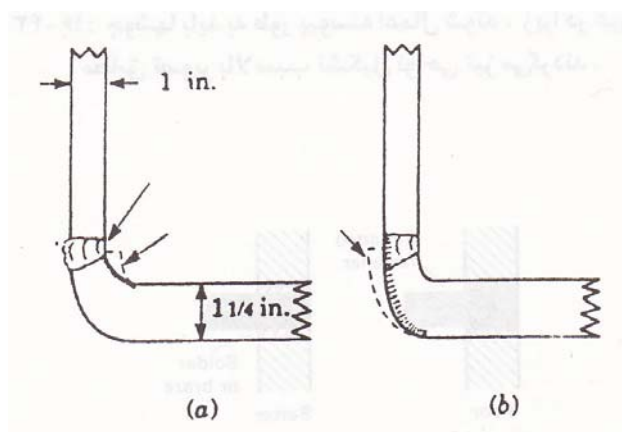
^۴ Fatigue and wear

^۵ Corrosion fatigue

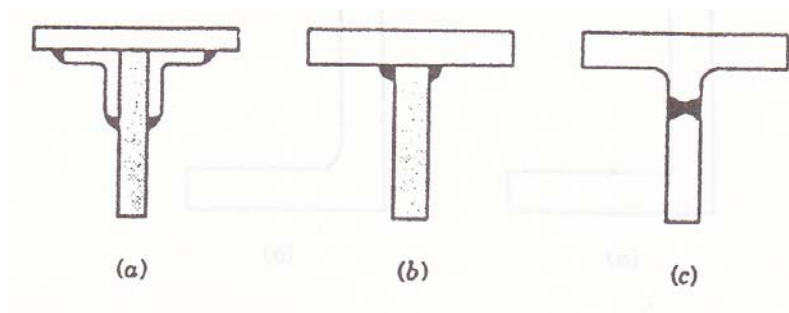


شکل ۴۰-۱۶: در طراحی باید از نواحی تمرکز تنش نظیر گوشه ها و شیارهای تیز اجتناب کرد ، زیرا این نواحی سبب خوردگی تنشی می گردد.

(a) و (c) طراحی نادرست (b) و (d) طراحی درست

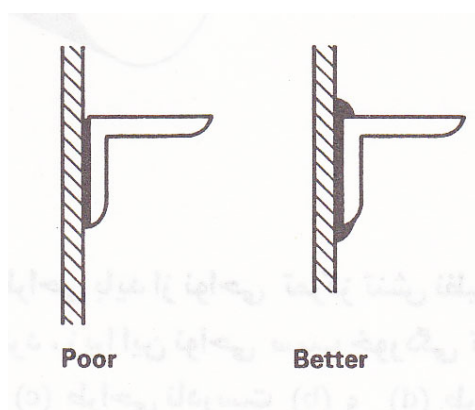


شکل ۴۱-۱۶: عمل سنباده یا سوهان زدن می تواند سبب ایجاد پیلهای موضعی ناشی از تنش در داخل مخزن شود ، در حالی که در خارج مخزن چنین مسأله ای وجود ندارد .



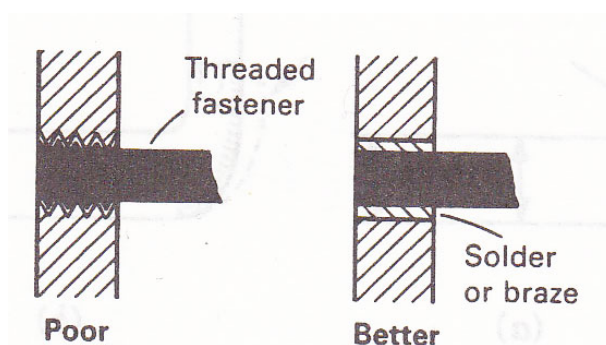
شکل ۱۶-۴۲: جوشها نمی بایست در مناطقی قرار بگیرند که تنشهای بالایی را در محیط های خورنده متحمل شوند .

(a) طراحی ضعیف (b) طراحی متوسط (c) طراحی خوب



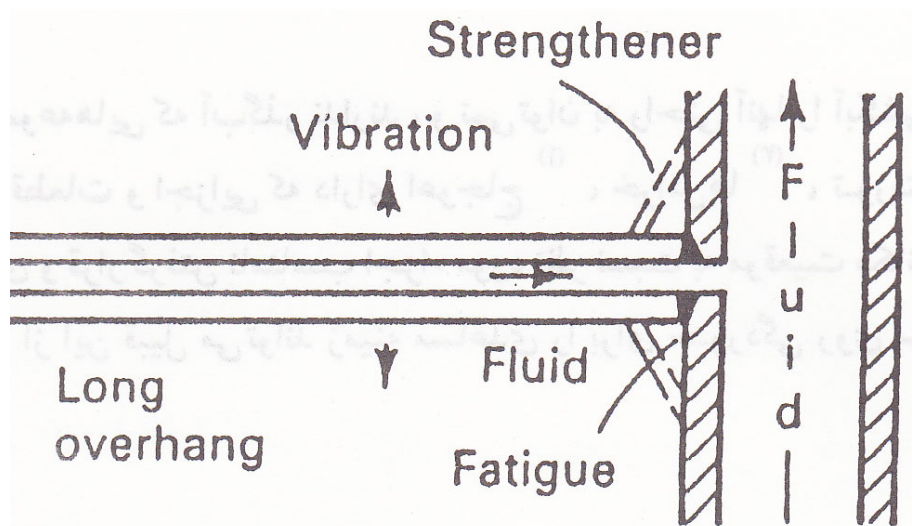
شکل ۱۶-۴۳: جوشها باید به طور پیوسته اعمال شوند ، زیرا در غیر این صورت مطابق تصویر بالا

سبب تشکیل نواحی تیز می گردند .

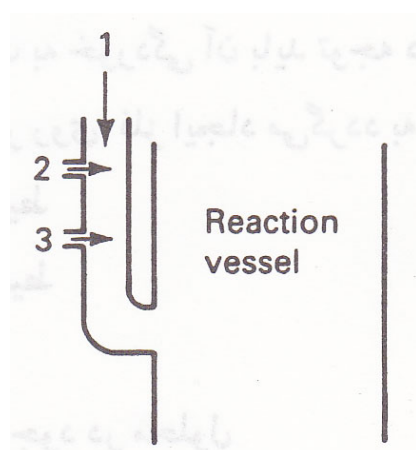


شکل ۱۶-۴۴: در اتصالات قلاویز شده می توان با استفاده از سیستم های اتصال دائم نظیر لحیم یا جوش زرد از

ایجاد مقاطع تیز اجتناب کرد .



شکل ۴۵-۱۶: اجزاء یک سرگیردار و آویزان اگر از لحاظ طولی بلند باشند و تکیه گاهی نیز نداشته باشند این امر می تواند منجر به خستگی در محل اتصال این اجزاء شود. لوله لاستیکی قابل انعطاف^۱ می تواند در کاهش این مسأله نقش بسزایی داشته باشد.



شکل ۴۶-۱۶: تجهیزات جانبی سیستمهایی نظیر مخزن واکنش باید مقاومت خوبی در برابر شوک حرارتی ناشی از برهم کنش بین هوا و عواملی نظیر فشار، بخار، و آب سرد داشته باشند.

^۱ Flexible hose

خوردگی یا از بین رفتن پوششهای محافظی که بر روی فلز ایجاد می گردد به عوامل زیر بستگی دارد:

(الف) رطوبت نسبی محیط

(ب) درجه حرارت محیط

(ج) PH محلول

(د) غلظت اکسیژن موجود در محلول

(ه) مواد آلوده کننده جامد یا غیر قابل حل^۱

(و) غلظت الکترولیت

(ز) سرعت الکترولیت

این تغییرات در محیط تا حد امکان در مرحله طراحی باید تشخیص داده شوند . همانطور که واضح است شرایط جهت جلوگیری از خوردگی باید تحت کنترل قرار گیرد ، اما در حین یک فرآیند ویژه و پرخطر ممکن است به طور موقت در مراحل تولید ، حمل و نقل و انبار کردن حفاظت مخصوص نیاز باشد .

لعبه هایی از قیر مصنوعی^۲ و پوششهای قیر طبیعی اغلب جهت کنترل خوردگی لوله های فولادی که در زمین قرار می گیرند ، استفاده می شود . لوله ها قبل از دفن ، در حین انبار یا حمل اگر در معرض محیط آفتابی و روشن قرار بگیرند ، کیفیت پوشش تقلیل پیدا کرده و عمر پیش بینی شده آن کاهش می یابد . جهت جلوگیری از این تخریب ، پوشش را ممکن

^۱ Solid or dissolved pollutants

^۲ Coal tar enamel

است ضخیم تر اعمال کرد و از مواد غلیظ تر استفاده کرد ؛ ولی این کار برای لوله های دفن شونده امری زائد است .

خوردگی در حین توقف واحد^۱ یک مشکل عمومی است . این خوردگی به علت شرایط محیط های بسته واقع در کیسه های بسته بندی و سالنهای انبار ایجاد می شود و یا در سیستم هایی مانند قسمت های آب خنک کن^۲ موتورهای بنزینی یا موتورهای دیزلی یا در دیگهای بخار^۳ و مبرد (چگالنده)^۴ واحد تولید نیرو در حین توقف و خاموش بودن واحد اتفاق می افتد .

این نوع خوردگی در تجهیزات موجود در انبار که هوای آزاد در آنجا جریان دارد نیز ایجاد می شود . تغییر طبیعی شرایط آب و هوایی در انبار ها (که حرارت در آن کنترل نمی شود و کنترل کننده های رطوبتی در آن وجود ندارد) می تواند مشکل آفرین باشد . همچنین ترکیبات فرار موجود در چوب خطرات ویژه ای را برای فلزات جاسازی شده در محفظه های چوبی ایجاد می کند ؛ تأکید می شود که تمام جعبه های چوبی بسته شده ، جهت حفظ مواد ذخیره شده در آنها باید در مقابل لایه اسیدی دقیقاً درزگیری شوند . بنابراین شرایط محیطی و آگاهی از این شرایط در طراحی نقش بسیار مهمی دارد و می تواند متخصصان را در طراحی بهتر یاری نماید . در بررسی عوامل محیطی می توان به مواردی مانند تخلیه و تهویه ناکافی ، عایق کاری گرمایی و صوتی (مواد جاذب رطوبت) و جریانهای سرگردان

^۱ Shut down

^۲ Water cooling

^۳ Boilers

^۴ Condenser

اشاره نمود. توجه به هر یک از این موارد در تقلیل خوردگی محیط موثر بوده و در نهایت نقش بسیار مهمی در طراحی ایفا می کند [۸].

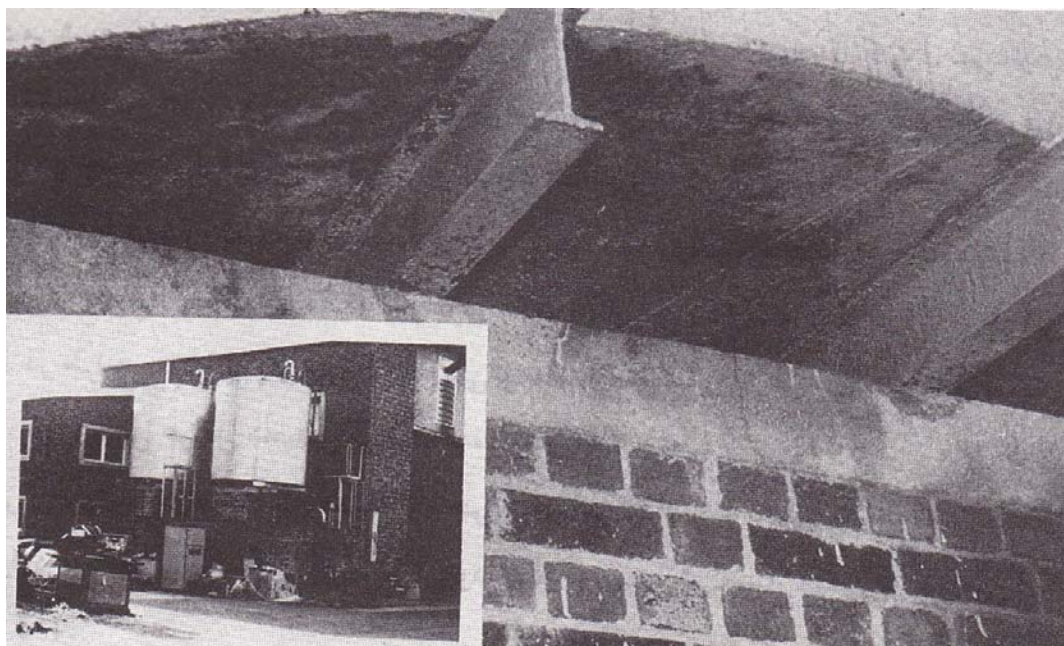
۱-۵-۲-۱۶- تخلیه و تهویه ناکافی

اگر باران ملایم و به صورت قطرات به سطح یک قطیه فولادی بدون حفاظت برخورد کند، پس از تبخیر آب حلقه هایی از زنگ آهن بر جای خواهد ماند. هر قطره آب به عنوان یک پیل اختلاف دمشی عمل می کند؛ حلقه زنگ زدگی در جایی که یونهای آهن دوظرفیتی از آند، با یونهای هیدروکسیل^۱ تشکیل شده در کاتد برخورد خواهند داشت، گسترش می یابد. اگر سطح خود به خود خشک شود و یا تهویه کافی برای خشک کردن سریع قطعات آب موجود باشد، اثر تخریبی خوردگی پایین آمده و محدود خواهد شد. حتی روی سطوح رنگ شده نیز، اگر قطرات آب برای مدت طولانی باقی بماند، باز خطر تخریب وجود خواهد داشت. این مسأله سبب می شود که خطر تخریب رنگ در زیر قطرات افزایش یافته و به دنبال آن احتمال خوردگی حفره ای^۲ نیز به وجود آید [۱۰].

همچنان که قبلاً نیز اشاره شد اغلب در سطوح زیرین سازه ها، جایی که اثر تهویه کم است، تخریب بیشتری مشاهده می شود (شکل ۴۷-۱۶).

^۱ Hydroxy ions

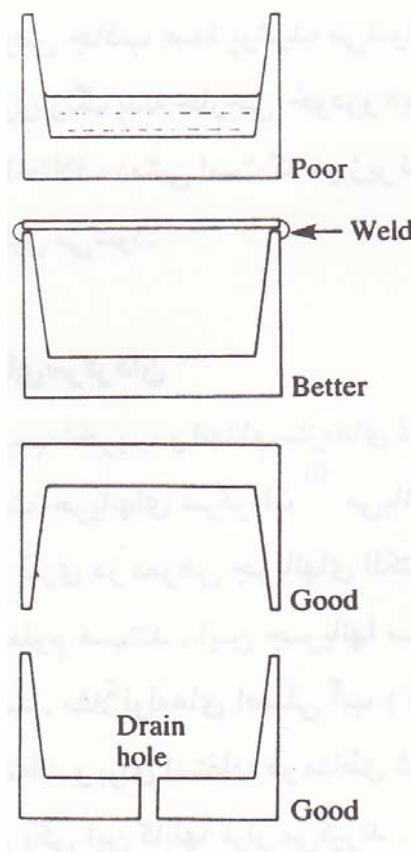
^۲ Pitting corrosion



شکل ۴۷-۱۶: تهویه ناکافی سبب افزایش بخارات آب موجود در فضای یک انبار گردیده است. این امر باعث خوردگی تیر آهن های سقفی انبار شده است.

تمامی کانالها و مقاطع بایستی خود به خود خشک گردند، به نحوی که آبی در گوشه و کنار آنها باقی نماند. سطوح داخلی و لبه های سوراخهای زه کشی و تخلیه نیز باید با پوششهای محافظ طویل العمر^۱ پوشانده شود. تهویه نیز، در طول مقاطع به وسیله خشک نگه داشتن سطوح، کمک شایان و مؤثری خواهد کرد. اگر یک کانال پس از اعمال پوششش محافظ به وسیله جوش بسته شود، هرگونه صدمه به پوشش چه داخلی و چه خارجی باید ترمیم گردد [۸].

^۱ Long – lasting barrier coatings



شکل ۴۸-۱۶: اصلاح زه کشی و تهویه به منظور کاهش خطر خوردگی در کانالها و قابها

۲-۵-۲-۱۶- عایق کاری گرمایی و صوتی با مواد که جاذب رطوبت هستند

مواد متخلخل^۱ اغلب برای جذب صوت و کاهش سروصدا مزاحم به کار می روند . آنها ممکن است گاهی به عنوان اسفنج نیز عمل کرده و عمل جذب آب را انجام دهند . اختلاف اکسیژن در آبی که درون اسفنج موجود است سبب ایجاد پیلهای اختلاف دمشی روی سطوح فلز می گردد ؛ صفحات لاستیکی فوم مانند در انتهای مقلع جعبه ای اتومبیلها به کار گرفته می شوند تا صدایی که بر اثر حرکت اتومبیل پدید می آید ، جذب کنند . پاشش و

^۱ Porous materials

وجود آب در جاده ها ، باعث خیس شدن لاستیک و نهایتاً بدنه خودروها می شود . این امر می تواند سبب خوردگی بدنه شود ؛ مثال زیر مؤید این مطلب است .

درهای بعضی از خودروها از ورقه نازک آهن ساخته شده است . طبیعتاً زمانی که درها بسته می شوند ، ایجاد صدایی ناخوشایند می کند . به منظور ایجاد صدایی متناسب با طبیعت خودرو ، درها با فوم مخصوص جاذب صدا پوشیده می شوند . تنها پس از دو یا سه سال استفاده ، ردیفهایی از تاول ، روی رنگ بدنه خارجی خودرو دیده شده است . این تاولها ناشی از خوردگی حاصل از پیلهای اختلاف دمی است که در زیر نوارهای فوم جاذب صدا در قسمت داخلی درب خودرو تشکیل می شود .

۳-۵-۲-۱۶- خوردگی جریانهای سرگردان

از دیگر عوامل محیطی که سبب تخریب و انهدام سازه های فلزی می شود و در طراحی باید به آن توجه فراوانی مبذول داشت جریانهای سرگردان^۱ می باشد [۶] .

بدون تردید اغلب سازه های فلزی در معرض جریانهای الکتریکی قرار دارند و حامل جریانهای الکتریکی پراکنده و نامعلوم هستند . این جریانها ممکن است از رساناهای الکتریکی مجاور سازه القا شده باشد . مثلاً لوله های اصلی آب (از جنس چدن) که در نزدیکی کابلهای فشار قوی قرار گرفته اند و برای استفاده در مناطق شهری در زیر خاک مدفون شده اند تحت تأثیر جریانهای الکتریکی این کابلها قرار می گیرند . این جریانها ، زمانی که مسیری با مقاومت کمتر از مسیر تعیین شده در طراحی را بیابند ، ظاهر شده و

^۱ Stray currents

افزایش می یابند . این جریان نظیر نشت جریان از سازه های مدفون فلزی (به عنوان رسانای زمینی) در سیستمهای توزیع برق^۱ در زیر زمین ، در حین جوشکاری یا در هنگام ساخت^۲ و تعمیر سازه ها نیز به وجود می آید .

در سیستمهای طویل ، نظیر خطوط لوله به طول بیش از دهها کیلومتر ، این جریان می تواند در اثر میدان مغناطیسی ناشی از حرکت دورانی زمین ایجاد شود . این نوع جریان اصطلاحاً جریان سرگردان نامیده می شود .

اگر لازم باشد که این جریانها از سازه های فلزی به یک الکترولیت جریان یابند ، تخریب و خوردگی شدیدی در نقطه ای که جریان از سازه خارج می شود پدید خواهد آمد . همچنان که قبلاً بیان شد آنها مواضعی روی سطح فلز هستند که در زمان وقوع خوردگی الکترون از آنها آزاد شده و در فلز پراکنده می گردد و از طرفی یونها جریان را در الکترولیت برقرار می سازند . طبق تعریف ، جریان الکتریکی در خلاف جهت حرکت الکترونها جاری می شود . بر اساس این اصل ، در محلی که جریان قطعه را ترک می کند الکترون به آن وارد می شود و بنابراین چنین مکانی یک آند خواهد بود . اثر جریانهای سرگردان در شکل (a-۴۹-۱۶) قابل مشاهده است . بر خلاف خوردگی معمولی که در آن اختلاف انرژی بین آند و کاتد مولد پتانسیل و برقرار کننده جریان است در این نوع خوردگی جریان از منبعی خارجی تولید می شود و لذا سرعت و میزان خوردگی تابع این جریان تحمیل شده است .

از این رو ذکر دو نکته مهم ضروری است :

^۱ Electrical distribution systems

^۲ Fabrication

الف - بر خلاف خوردگیهای معمولی که در آن سرعت اکسیژن دهی به کاتد یک عامل تعیین کننده سرعت خوردگی است ، در اینجا این عامل اهمیتی ندارد [۶] .

ب - هر چند پوششها ، می توانند میزان خوردگی منطقه پوشش داده شده را کاهش دهند ، ولی هر ناپیوستگی و شکستگی در سطح پوشش ، چگالی جریان و در نتیجه میزان خوردگی در آن ناحیه را به شدت افزایش می دهد .

در این نوع سیستمهای خوردگی به خاطر فاصله زیاد بین آند و کاتد ، محصولات خوردگی عموماً ایجاد لایه محافظ نکرده و خاصیت مهار کنندگی خوردگی وجود ندارد . اما کلرید ها، نیترات ها و ستیر آنیونها موجود در خاک اغلب به سوی آند رفته و ایجاد محصولاتی می کنند که به طور عادی در سیستمهای خوردگی پیامهای معمولی یافت نمی گردد . واکنشهای کاتدی در محلی انجام می گیرد که جریان از الکترو لیت وارد فلز می شود و در نتیجه مواد قلیایی حاصله می توانند سطوح فلزی یا پوششهای محافظ را تخریب کنند . الکترو لیت این پیل می تواند آب آزاد، نظیر آب رودخانه یا دریا و یا آب موجود در خاک باشد برای سازه های مدفون میزان و محل خوردگی با شرایط آب و هوایی تفاوت خواهد کرد . در هوای خشک ، خوردگی ممکن است قطع گردد و با بارش اولین باران مجدداً آغاز شود . تغییرات رسانایی خاک به خاطر یونهای محلول در آن نیز می تواند شدت خوردگی را دچار تغییر نماید .

در گذشته ، وجود ترامواها (راه آهن های شهری) در شهرها سبب ایجاد جریانهای الکتریکی بسیار بزرگی در تجهیزات فلزی حامل آب و نظایر آن می شد . در اوایل قرن

نوزدهم در بروکلین یم جریان هفتاد آمپری در یک شاه لوله چدنی آب دیده شد . امروزه ، این جریانها حداکثر در حد چند آمپر هستند ، هر چند که در هنگام رعد و برق امواج نسبتاً بزرگ و شدیدی ایجاد می شود . در زیر مواردی از اثر جریانهای سرگردان ذکر شده است [۴] .

چند خط لوله به طول ۶۵ کیلومتر از زیر چهار ریل راه آهن که با ولتاژ ۷۵۰ ولت مستقیم تغذیه می قدرت دیود توجه داشت . شوند ، به طور عرضی عبور می کند ؛ خطوط لوله به وسیله حفاظت کاتدی از نوع جریان خارجی توسط چهار ایستگاه محافظت می شوند . پس از قرار دادن آخرین لوله ، حفاظت کاتدی دیگر قادر به جلوگیری از خوردگی ناشی از جریان سرگردانی که از لوله ها به ریل (رسانای منفی) به وسیله خاک اطراف لوله تراش می شود ، نمی باشد . برای پیشگیری از تخریب ، لوله ها و ریل منفی باید به یکدیگر متصل شوند تا جریان از هیچ نقطه ای سطح فلز را ترک نکند و این امر دو اثر جالب ایجاد می کند :

(۱) در مواقعی ، جریان بر خلاف معمول (از طریق اتصال موجود) از خط آهن به لوله جاری می گردد و باعث خوردگی در سوی دیگر می شود ؛ بنابراین یک دیود^۱ به قدرت ۱۵۰ آمپر در مسیر قرار داده می شود تا اطمینان حاصل گردد که جریان تنها از لوله ها به سوی خط آهن می رود ؛ البته باید به

^۱ Diode

۲) به وسیله قرار دادن مقاومتهای مناسب در محلهای اتصال از هر لوله ، پتانسیل لوله بین ۲/۵ تا ۰/۸۵ ولت محدود می گردد ، در واقع نوعی «حفاظت کاتدی» خود به خودی^۱ در سراسر طول ۶۵ کیلومتر لوله به دست می آید .

مثال دیگر یک لوله زیرزمینی از فولاد زنگ نزن می باشد که از نوع لبه دار و پیچ و مهره ای است . این لوله به خاطر وجود نشت در اتصالات بین لوله ها ، با یک خط لوله جوشکاری شده تعویض گردیده است . در طول شب در اثر بارندگی ، لوله هایی که قبلاً در گودال قرار داشته و اطرافشان هنوز محکم نشده بود ، شناور می شوند . صبح روز بعد ، جریانهای سرگردان حاصل از دستگاه جوشکاری هزاران سوراخ در دیواره لوله های غوطه ور ایجاد می کند .

مشکلات مشابهی نیز برای کشتی هایی که به وسیله جوش تعمیر می شوند پدید می آید ، این مشکل زمانی رخ می دهد که جریان مستقیم لازم برای جوشکاری از یک مولد ساحلی دریافت می شود . اگر جریان ، مسیر برگشتی آسانتر از بدنه پیدا کند (مثل آبی که کشتی در آن شناور می باشد و یا مسیری که اتصال زمین ترمینال مولد به آن وصل است) بدنه کشتی دچار خوردگی عمومی و کاهش ضخامت خواهد شد . در حالت شدیدتر بدنه کشتی سوراخ شده و کشتی در همان اسکله غرق می شود شکل (a-۴۹-۱۶) .

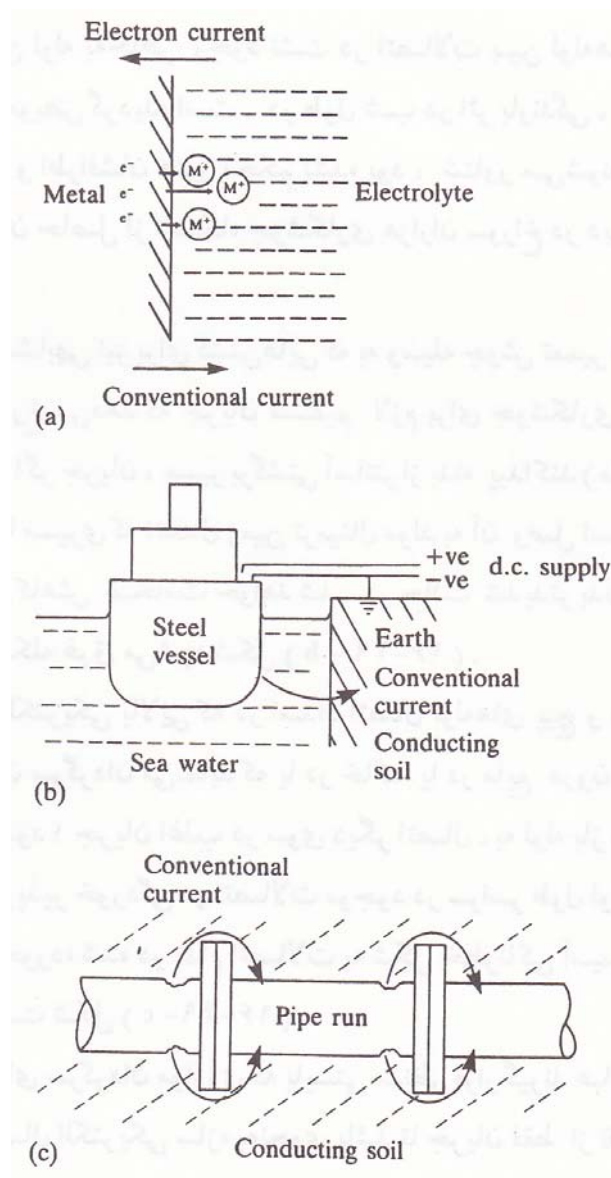
مقاومت الکتریکی بالایی که در امتداد اتصال لوله های پیچ و مهره ای لبه دار وجود دارد ، تولید جریان سرگردان می نماید که یا در خاک یا در مایع درون لوله (اگر مایع رسانا باشد

^۱ Own cathodic protection

(جاری می شود ؛ جریان اغلب در سوی دیگر اتصال ، به لوله باز می گردد . مهندسین از یافتن الگوی تکرار پذیر خوردگی در اتصالات موجود در سراسر طول لوله شگفت زده شده اند ، زیرا همان سمت خورده شده در تمام اتصالات به شکل خطرناکی آسیب دیده و سمت دیگر سالم باقی مانده است شکل (C-۴۹-۱۶) .

در جریانهای سرگردان مواردی که بایستی مد نظر قرار گیرند عبارتند از :

- ۱) اتصال الکتریکی سازه به نحوی باشد تا جریان فقط از نقاط تعیین شده خارج شود .
- ۲) خوردگی جریانهای سرگردان در هر دو نوع حفاظت کاتدی (هم آند فداشونده و هم جریان اعمالی) می تواند اتفاق بیافتد .
- ۳) قرار دادن قطعات فلزی قربانی شونده در مسیر سازه های مدفون و در « اتصال با سازه ها » در مکانهایی که جریان از قطعه خارج می شود که جریان به خوبی از سازه دفع شود . قطعات فلزی قربانی شونده باید به طور مرتب بازرسی و در صورت لزوم تعویض شوند .



شکل ۴۹-۱۶: خوردگی ناشی از جریان سرگردان

- (a) نموداری از جهت جریان الکترون و جهت جریان قرار دادی در یک پیل خوردگی .
- (b) خوردگی ایجاد شده در بدنه یک کشتی . زمانی که جریان مسیر غیر صحیح را طی می نماید .
- (c) وجود اتصالات در خطوط لوله و مقاومت الکتریکی بالای آن سبب ایجاد جریان سرگردان در کناره های اتصالات می شود .

۳-۱۶- طراحی به منظور پیشگیری از خوردگی در ساختمان^۱ و سازه ها^۲

اولین قدم در پیشگیری از خوردگی سازه ها ، طراحی مناسب آنها است ؛ برای دستیابی به بهترین وضعیت می بایست از پوششهای محافظ و مواد قابل دسترس مقاوم به خوردگی بهره جست . به علاوه در مرحله طراحی بایستی توجه خاصی به جزئیات طراحی و شکل هندسی سازه شود تا اینکه هم در به کارگیری پوششهای محافظ تداخل و مشکلی ایجاد نگردد و هم نگهداری و حفظ آنها به سهولت امکان پذیر باشد . ملاحظات نیز باید برای مواد به کار رفته ، روشهای حفاظت ، ساخت ، مونتاژ و شرایط کاری آنها در نظر گرفته شود .

خوردگی قطعات فلزی موجود در ساختمانها به دلایل زیر از اهمیت و ارزش زیادی برخوردار می باشد :

- ۱ - تحت تأثیر قرار دادن سلامت مکانیکی اجزاء سازه مورد نظر .
- ۲ - در نواحی که قطعات به طور کامل و یا صرفاً قسمتی از آنها در درون ماده دیگر قرار گرفته است ، رشد محصولات خوردگی بر روی سطح فلز و قطعه مورد نظر سبب اعوجاج و یا ترک دار شدن ماده می گردد . زمانی که فلز در تماس با مواد ساختمانی بوده ، اگر چه در درون آنها قرار نگرفته باشد ، باز هم مشکلاتی را می آفریند .
- ۳ - شکست قطعات و اجزاء ، سبب ورود و نشت آب به درون ساختمان می گردد .
- ۴ - در اثر خوردگی ، سطوح ناخوشایند و ظاهر بدمنظره ای پدید می آید .

^۱ Buildings

^۲ Structures

۵ - تنشهای حاصله در حین ساخت و به کارگیری قطعات مورد نظر منجر به خوردگی تنش‌ی شکافی (SCC) می‌گردد [۱۱].

۱-۳-۱۶ - محیط خوردنده^۱

شرایطی که یک فلز می‌تواند در آن شرایط قرار بگیرد، متغیر است. اما می‌توان انواع محیطهایی را که یک فلز در معرض آنها قرار می‌گیرد به شکل زیر تقسیم بندی نمود:

۱ - اتمسفرهای خارجی^۲: در این محیط سرعت و میزان خوردگی اساساً به نوع فلز یا آلیاژ، ریزش باران، دما، درصد و میزان آلودگی اتمسفر و همچنین زاویه و وسعت و مساحت ماده‌ای که در معرض محیط قرار می‌گیرد (جهت تعیین میزان تأثیر اثر باد و باران) بستگی دارد.

۲ - اتمسفرهای داخلی: اتمسفرهای داخلی موجود در ساختمانها متفاوت بوده که گاهی اوقات محیط گرم و توأم با بخار نظیر آشپزخانه یا حمام شرایط حادثری را نسبت به بقیه اتاقها و مکانها ایجاد می‌کند. پدیده کندانسه شدن^۳ را می‌توان در نواحی بامها و حفرات دیوارها مشاهده کرد. ایستگاههای سوخت مجاور ساختمانها یا در واقع داخل آنها به دلیل ایجاد محیطی مملو از گازها و بخارات ناشی از احتراق مواد مختلف سوختی سبب به وجود آمدن محیطی خوردنده شده و شدیداً به اجزاء ساختمانها آسیب می‌رساند.

^۱ Corrosive environment
^۲ Internal atmospheres
^۳ Condensation

۳- جاسازی^۱ قطعات در مواد مختلف ساختمانی یا در تماس با آنها . قطعات و اجزاء فلزی ممکن است در ملاتهای ساختمانی ، گچ کاریها ، بتون و یا هر ترکیب دیگری جاسازی شوند ؛ به طور مشابه این قطعات می توانند در تماس با موادی نظیر فلزات دیگر ، چوب و ... نیز قرار داشته باشند .

۴- تماس قطعات مورد نظر با محیطهای آبی و یا با آبهای حاوی اسیدها ، بازها یا نمکهای حل شده در آنها [۱۱] .

اکثر طراحیهای صورت پذیرفته در ساخت بناها ، اجازه ورود و تماس آب باران را به درون ساختمان داده و سبب حبس آب باران در شکافها و شیارهای موجود در سطح فلز یا بین دو سطح فلز و یا بین سطوح فلزی و سطوح مواد دیگر می گردد . آب ممکن است بر روی سطح فلز نیز چکه کند . شرایط مذکور خطر بیشتری را نسبت به زمانی که فلز به صورت عادی در معرض اتمسفر قرار می گیرد ، فراهم می کند . این خطر زمانی شدت بیشتری به خود می گیرد که آب مورد نظر به دلیل تماس با اتمسفر یا مواد دیگر حاوی اسید ، باز یا نمک حل شده ، باشد . آبهای معمولی نیز سبب خوردگی می شوند .

۵ - تماس فلزات نا مشابه^۲ با یکدیگر : اثر گالوانیکی زمانی روی می دهد که دو فلز لخت متفاوت به همراه رطوبت در تماس با یکدیگر قرار گیرند که نتیجه این اثر گالوانیکی خوردگی ترجیحی یکی از آن دو فلز می باشد [۱۲] .

^۱ Embedment

^۲ Dissimilar metals

با توجه به بحث بالا مهم است که تمام اتمسفرهایی که مواد در معرض آنها قرار می گیرند بررسی شوند . اگر بخواهیم ساختمانی پایا ، با دوام و با ظاهری خوب داشته باشیم می بایست توجه ویژه ای به امر طراحی ، مخصوصاً فلزات درگیر ، مبذول داشت و دقت زیادی در مورد خوردگی آنها به کار برد ؛ زیرا غالباً شکست به دلیل در معرض قرار گرفتن کامل قطعات در برابر اتمسفر خارجی نبوده ، بلکه شکست اکثراً در قطعات موجود در ساختمان و یا بخشی از ساختمان رخ می دهد. برای روشن شدن مطلب ، خوردگی فلزات مختلف موجود در ساختمان ها را بحث می کنیم .

۲-۳-۱۶- فلزات آهنی^۱ موجود در ساختمان ها و سازه ها

طراحی ناقص شکل هندسی ، عامل عمده خوردگی فلزات آهنی است . یک طراحی ممکن است از دیدگاه معماری و به لحاظ زیبایی سالم و بی عیب به نظر آید ، اما از دیدگاه خوردگی سبب ایجاد و افزایش هزینه های غیر ضروری نگهداری و یا منجر به شکست زود هنگام قطعه گردد . برخی از مهمترین نکاتی که باید در طراحی رعایت گردد ، در ذیل به آن اشاره شده است [۱۱] .

۱- شکل هندسی اجزاء مورد نظر بایستی به گونه ای طراحی شوند که هیچگونه رطوبت و ماده آلوده کننده ای را در خود حبس نکنند . در مکانهایی که این مساله عملی نیست بایستی منافذی با قطر مناسب به عنوان آبگذر طراحی کرده ، به طوری که تمامی آب یا رطوبت را بتوان خارج ساخت .

^۱ Ferrous metals

۲- از وجود هر گونه شکاف و شیار در طراحی بایستی اجتناب گردد . شیار ها سبب تجمع رطوبت یا آب و مواد آلوده کننده شده و نهایتاً باعث افزایش میزان خوردگی می گردند . اگر وجود شیارها و شکافها اجتناب ناپذیر باشد ، باید این شکافها توسط جوشکاری یا با استفاده از یک ماده پرکننده^۱ نظیر بتونه^۲ پر شوند.

۳- اتصالات و قید و بستها می بایست به گونه ای مرتب شوند که خطوط تمیز و پیوسته ای ایجاد کنند . معمولاً جوشها نسبت به اتصالات پیچ شده ترجیح داده می شوند و همچنین در بین جوشها ، جوش لب به لب^۳ بر جوش روی هم^۴ برتری دارد . اگر استفاده از اتصالات (جوشهای) روی هم اجتناب ناپذیر باشد، به کارگیری جوش با یک پرکننده مناسب جهت جلوگیری از محبوس شدن رطوبت و مواد آلوده کننده ضروری است .

۴- مشکل محبوس شدن رطوبت هوا و کندانسه شدن باید به واسطه گردش آزادانه هوا یا توسط محیطی مناسب مرتفع گردد. مخازن ذخیره^۵ نیز می بایست مقداری از زمین فاصله داشته باشند تا اینکه هم گردش هوا آزادانه صورت پذیرد و هم تعمیر و نگهداری آنها به سهولت انجام گرفته و بتوان آبگذاری در قسمت تحتانی این مخازن تعبیه نمود .

۵- تمامی اجزاء می بایست به گونه ای قرار گرفته و نصب شوند تا بتوان جهت تعمیر به راحتی به آنها دسترسی پیدا کرد یا به گونه ای از آنها محافظت کرد که نیازی به هیچگونه تعمیر و ترمیمی نداشته باشند .

^۱ Filler
^۲ Mastic
^۳ Butt welds
^۴ Lap welds
^۵ Storage tanks

۶- در عمل گوشه های مدور نسبت به نوع تیز و زاویه دار ترجیح داده می شوند . گوشه های زاویه دار و تیز در معرض خطر آسیب مکانیکی قرار داشته و اعمال پوشش بر روی آنها به سختی صورت می پذیرد . غالباً مقاطع توخالی و لوله مانند به دلیل مزیتی که دارند جایگزین مقاطع I یا H شکل می شوند.

۷- پدیده خوردگی غالباً در نواحی مرده و فضاهای بسته که رطوبت نمی تواند به راحتی خارج شود به وجود می آید . از ایجاد اینگونه نواحی یا باید پرهیز شود و یا به سازه مورد نظر حفاظتی اضافی اعمال گردد .

۸- فولاد نمی بایست در تماس با مواد جاذب رطوبت^۱ قرار گیرد و دقت کافی را در به کارگیری فولاد در تماس با چوب نیز باید به کار برد . چوب به عنوان ماده جاذب رطوبت عمل کرده ، ضمن آنکه بخارات حاصله از آن سبب خوردگی فولاد در فضاهای بسته می گردد .

۹- ناحیه سپری شکل تیر آهنهای بزرگ باید توسط جوشکاری بسته شود . این کار باید در امتداد قسمت بالایی تیر آهن ، نزدیک انتها صورت گیرد . همچنین جوشکاری باید به نحوی صورت گیرد که فضای خالی^۲ یا انقباضی در قسمت سپری شکل وجود نداشته باشد .

۱۰- از طرحهایی که اجازه چکیدن آب را بر روی قسمت های دیگر سازه می دهد ، باید پرهیز شود و در این مورد بایستی سوراخی به عنوان آبگذر در نظر گرفته شود .

^۱ Water absorbent materials

^۲ Gaps

۱۱- در مکانهایی که اجزاء فولادی از زمینه بتنی بیرون آمده اند یا در موقعیت مشابه قرار دارند ، باید توجه خاصی را نسبت به فصل مشترکها و مرزهای موجود بین بتن و فولاد مبذول داشت تا از رسیدن آب به فولاد جلوگیری گردد .

۱۲- زمانی که سطوح بر روی یکدیگر پیچ می شوند ، سوراخهای موجود در سطوح باید بر هم منطبق شده و پیچها در سوراخهایی که قطر آنها مناسب بوده (کمتر از قطر پیچ نباشند) فرو برده شوند . در غیر اینصورت پیچ تولید تنش کرده و ممکن است منجر به شکست ناشی از خوردگی تنشی گردد .

۱۳ - خوردگی چهار چوب پنجره هایی از جنس فولاد نرم کم رنگ آمیزی نیز شده است سبب وقوع مشکلاتی می شود (مخصوصاً اجزاء افقی آنها که تمایل زیادی به تجمع درطوبت داشته و رطوبت و نم بیشتری بر روی آنها وجود دارد) . این مشکل را می توان با شیب دار ساختن لبه های چهارچوب پنجره توسط بتونه کاری (پیش از رنگ زدن) تا حدودی مرتفع کرد . با این وجود ، ترجیح داده می شود که برای ساخت چهارچوب پنجره ها از مواد مقاومتری نظیر فولاد گالوانیزه^۱ ، فولاد زنگ نزن با آلومینیوم استفاده گردد .

۱-۲-۳-۱۶- فولادها

سه گروه بزرگ فولاد به عنوان ماده ساختمانی وجود دارد [۱۴] :

۱ - فولادهای نرم که در آنها صرفاً مقادیر جزئی از عناصر آلیاژی نظیر منگنز افزوده می شود .

^۱ Galvanized steel

- ۲- فولادهای کم آلیاژی^۱ که در آنها کمتر از ۵ درصد عناصر آلیاژی افزوده می شود.
- ۳- فولادهای پر آلیاژ^۲ که حاوی بیش از ۵ درصد عناصر آلیاژی است ، نظیر فولادهای زنگ نزن که حاوی ۲۰-۱۲٪ کرم و گاهی اوقات تا ۱۰٪ نیکل و ۳٪ مولیبدن می باشد .

۱- فولادهای نرم

اکثر فولادها ، از مقاطع حجیم و بزرگ سازه ای تا ورقهای نازک در این دسته قرار دارند و تغییرات جزئی در ترکیب شیمیایی فولادها اثر قابل ملاحظه ای بر مقاومت خوردگی آنها نمی گذارد . به طور کلی این مسأله چندان مهم نیست ، زیرا چنین فولادهایی معمولاً با پوششهایی که برای شرایط کاری معینی تعریف می گردد ، محافظت می شود [۲] .

وقتی طراحی جهت استفاده از این نوع فولاد ریخته می شود ، بایستی در هنگام طراحی و استفاده از این فولادها ، نوع پوشش و رنگ آمیزی آن مد نظر قرار گیرد ، ضمن آنکه نحوه اجرای پوشش و آماده سازی آن نیز با توجه به شکل هندسی و طراحی آن باید مورد توجه واقع شود . روشهای خودکار اعمال پوشش ، اقتصادی تر بوده و کارآیی بیشتری دارند ؛ زیرا در روشهای خودکار^۳ نسبت به روشهای دستی^۴ راحت تر به یک پوشش همواره و یکنواخت می توان رسید ؛ به عبارت دیگر ، سطوح یزرگ با روشهای پاششی راحت تر پوشش داده می شوند ، در حالی که برای بعضی از سازه ها ، ایجاد پوشش قبل از نصب با

^۱ Low – alloy steel

^۲ High alloy steel

^۳ Automatic

^۴ Manual methods

استفاده از روشهای غوطه وری^۱ مناسب تر است . پوششی که اعمال می شود باید حداقل ضخامتی را که برای شرایط کاری و عمر مورد نظر مناسب و کافی است داشته باشد .

آماده سازی سطح^۲ از مهمترین مراحل است ، به طوری که عملکرد بهینه پوششهای محافظ جدید صرفاً زمانی به دست می آید که سطح فولاد به طور کامل آماده شود . روش آماده سازی سطح بستگی به شکل و اندازه سازه یا جزء مورد نظر دارد . بنابراین گاهی اوقات برای تمیز کردن یک سازه فولادی روباز ترجیح داده می شود از روشهای دستی استفاده شود ؛ زیرا تمیزکاری به صورت خودکار بر روی چنین سازه هایی باعث برخوردهای شدید و زیاد مواد ساینده با خود ماشین می گردد .

فولاد ، خواه به شکل سازه^۳ ، خواه به عنوان ورق^۴ ، می تواند با اکثر سیستمهای پوششی متفاوت نظیر رنگ ، مواد پلاستیکی ، بتن و فلزات دیگر محافظت شود . این عمل را می توان به صورت یک پوشش ساده یا به شکل ترکیبی (نظیر پوشش فلزی به همراه رنگ یا پوشش پلاستیک) انجام داد .

۲ - فولادهای کم آلیاژ

فولادهای کم آلیاژ معمولاً حاوی مقادیر جزیی از عناصر آلیاژی نظیر مس ، کرم و نیکل (در کل به مقدار کمتر از ۵ درصد) می باشد . آنها تحت شرایط مساعد و نامناسب ، وقتی آزادانه در معرض هوا قرار گیرند، تمایل کمتری به خوردگی نسبت به فولادهای کربنی^۵

^۱ Dipping methods

^۲ Surface preparation

^۳ Structure form

^۴ Sheet

^۵ Carbon steels

معمولی از خود نشان می دهند . تحت شرایط مرده وساکن ، یا در شکافها ، ممکن است با سرعتی معادل سرعت خوردگی فولادهای نرم خورنده شوند .

زمانی که فولادهای کم آلیاژ به صورت لخت (بدون پوشش) در معرض محیط قرار گیرند، ظاهر اولیه زنگ حاصل شده شبیه حالتی است که در فولاد نرم دیده می شود ، با گذشت زمان زنگ تیره تر شده و حالت متراکم تر و بافت هموارتر و یکنواخت تری نسبت به زنگهای معمولی به خود می گیرد[۱۳] .

در کاربرد فولادهای کم آلیاژ در شرایط لخت^۱ (بدون پوشش) باید در شکافها و نواحی مرده و ساکن نهایت دقت را انجام داد . همچنین ظاهر و عملکرد آنها بایستی برای شرایط مشخص کاری قابل قبول باشد به طوری که از آلوده نشدن بتن و سنگ کاریهای مجاور به لکه های قهوه ای رنگ ناشی از چکیدن رطوبت از فولادهای زنگ زده اطمینان حاصل کرد . توجه به طراحی ، جاسازی دقیق سیستم آب گذار آب باران ، رنگ زدن بتون و چندین روش دیگر باعث جلوگیری از به وجود آمدن این مشکلات می شود .

فولادهای کم آلیاژی می توانند به صورت مقاطع ساختمانی و یا به شکل ورق باشند و بایستی قبل از اینکه در معرض محیط قرار گیرند به منظور زدودن پوسته های اکسیدی عملیات تمیزکاری (ماسه پاشی یا عملیات دیگر) بر روی آنها صورت پذیرد . چنین موادی به شکل وسیع در آمریکای شمالی بر روی پل بزرگراهها و برای اهداف معماری^۲ مورد استفاده قرار می گیرند ؛ همچنین در برخی موارد در انگلستان و اروپا نیز از آنها استفاده

^۱ Bare condition

^۲ Architectural purposes

می شود . پس از آماده سازی مناسب ، سطح فولاد کم آلیاژی بایستی با رنگها یا پاشیدن فلزات ، پوشش داده شوند . مشاهدات نشان می دهد که پوشش فولادهای کم آلیاژی نسبت به فولاد نرم (در شرایط یکسان محیطی) با دوام تر است [۱۵و۱۶] .

۳ - فولادهای زنگ نزن

برخی از فولادهای زنگ نزن را می توان در ساختمانها وسازه های مختلف به کار برد ، بعضی از آنها واقعاً تحت شرایط اتمسفر معمولی خورده نمی شوند . مقاومت آنها نسبت به خوردگی ، ناشی از تشکیل لایه محافظ اکسیدی بر روی سطحشان می باشد که این لایه اکسیدی معمولاً «خود ترمیم^۱» نیز می باشد . با وجود این ، تحت شرایط احیایی ، یا در شرایطی که از رسیدن اکسیژن جلوگیری شود ، این لایه قابل ترمیم نخواهد بود و در نتیجه خوردگی به وقوع می پیوندد . به دلیل اینکه فولادهای زنگ نزن معمولاً محافظ نمی شوند ، نکات طراحی که پیش از این بحث شد ، برای اینگونه فولادها نیز قابل کاربرد است و از هر گونه شرایطی نظیر شکافها بایستی پرهیز شود [۱۶] .

توصیه می شود جهت انتخاب یک نوع فولاد زنگ نزن مورد نیاز ، مشورت صورت گیرد در شرایط شدید و بسیار خورنده ضروری است که از نوع $Fe-18Cr-10Ni-3Mo$ استفاده شود . اما در شرایط خورنده متوسط رده های ضعیف تری نظیر فولاد $Fe-13Cr$ رضایت بخش و مطلوب است . غالباً عامل تصمیم گیری در این موارد قیمت نوع فولاد خواهد بود ، زیرا به طور کلی هرچه درصد عناصر آلیاژی در فولاد بیشتر شود (

^۱ Self – repairing

مخصوصاً Ni و Mo) هزینه و قیمت آن افزایش می یابد. در استفاده از این فولادها نکات زیر باید مورد توجه قرار گیرد:

- ۱- محیطی که فولاد در معرض آن قرار می گیرد.
 - ۲- انواع و غلظت محلولهایی که در تماس با فولاد می باشد. این مسأله مخصوصاً در جایی اهمیت پیدا می کند که شکست، ناشی از غلظتهای موضعی محلولهای رقیق شده. به عنوان نمونه، مقدار جزیی یون کلر در آب شیر^۱ بعید به نظر می رسد که سبب بروز مشکلات گردد؛ اما اگر غلظت یون کلر در آب به واسطه حرارت دیدن و تبخیر افزایش یابد ممکن است خوردگی رخ دهد.
 - ۳- درجه حرارتها و فشارهای کاری.
 - ۴- خواص مکانیکی مورد نیاز.
 - ۵- کاری که بر روی فولاد انجام می گیرد.
 - ۶- روشهای ساخت، تهیه و نوع عملیات جوشکاری که به کار می رود. در مورد جوشکاری باید تأکید شود که در انتخاب صحیح و مناسب نوع فولاد و الکتروود یا ماده پرکننده دقت شود.
- معمولاً فولاد زنگ نزن در اندازه های بزرگ آن گونه که برای فولادهای ارزان قیمت مطرح است. تهیه و ساخته نمی شود، اما بعضی از مقاطع، لوله هل، میله ها و ورقها از جنس فولاد زنگ نزن قابل دستیابی اند. اگر زمانی در استفاده از فولاد محدودیت ضخامت و

^۱ Tap Water

وزن و قیمت در طراحی مطرح نباشد به دلیل مقاومت به خوردگی بهتر ، فولاد زنگ نزن قابل استفاده است . اگر استحکام تجهیزات به گونه ای باشد که استفاده از معمولی بهینه سازی ، از فولاد زنگ نزن به شکل مواد روکشی نیز می توان استفاده کرد .

همچنین فولاد زنگ نزن اغلب به عنوان روکش برای چهارچوبهای پنجره ، درها و غیره به کار می رود . همچنین این فولاد در ساختمانهای مجلل نیز استفاده می شود [۱۷] .

۲-۲-۳-۱۶- ورق فولادی پوششی دار^۱

شاید معروفترین ورقهای فولادی پوشش داده شده که در همه جا تقریباً یافت می شود ورقهای شیربانی موجدار گالوانیزه^۲ و ورقهای روکش دار^۳ باشند که برای سالهای زیادی مخصوصاً برای ساختمانها و به صورت رنگ زده شده یا بدون رنگ استفاده شده است . علاوه بر فلز روی ، از سایر پوششهای دیگر فلزی نظیر آلومینیوم اندود شده داغ^۴ و یا آلیاژهای آلومینیوم - روی^۵ اندوده شده برای مصارف فوق استفاده می شود . امروزه ورق های فولادی پوشش داده شده با روی ، خواه به صورت پیوسته گالوانیزه شده باشد خواه با آبکاری الکتریکی^۶ ، هر دو می تواند مورد استفاده قرار گیرد . ضمن آن که بر روی آنها پوشش های مناسب و یا رنگ اعمال می شود ؛ برخی از موارد کاربرد چنین فولادهایی عبارت است از : روکش سقف ، پوشش کف ، صفحات جدایش ، وسایل خانگی و صنعتی و اسباب خانه . شکل پذیری این گونه مواد عالی بوده و اتصال آنها ، بدون هیچگونه مشکلی

^۱ Coated steel sheet

^۲ Ubiquitous galvanized corrugated roofing sheets

^۳ Cladding sheets

^۴ Hot dip aluminium

^۵ Hot dip aluminium - Zinc alloys

^۶ Continuously galvanized or electroplated

انجام می گیرد ضخامت پوشش با توجه به مواد به کاررفته و شرایط کاری که محصول نهایی بایستی داشته باشد می تواند متفاوت و متغیر باشد .

۳-۲-۳-۱۶- پوشش های محافظ فولاد^۱

روی ، آلومینیم ، آلیاژهای آلومینیم - روی و مواد دیگری نظیر رنگها و پوشش های پلاستیکی اغلب به عنوان پوششهای محافظ برای فولاد به کار می رود .

این گونه فلزات تنها به عنوان یک مانع عمل نمی کنند ، بلکه اگر شکستی در این گونه پوشش ها رخ دهد ، در اکثر شرایط ، خوردگی به شکل ترجیحی اتفاق افتاده و در نتیجه فلز پوشش داده شده ، به صورت فداشونده از فولاد زیرین خود محافظت می کند .

آلومینیم نجیب تر از روی می باشد ، ولی از این فلز ، به عنوان آندفداشونده^۲ ، به دلیل حفاظت کافی و کاملی که در صنایع و محیط های دریایی فراهم می کند ، استفاده بیشتری می شود . حفاظت حاصله از پوششهای آلیاژی آلومینیم - روی بین میزان حفاظت آلومینیم و روی به تنهایی می باشد . دو نوع آلیاژی که غالباً به کار می رود عبارتست از : آلیاژی از روی با ۵٪ آلومینیم که خواصی شبیه به روی داشته و یا آلیاژی از روی با ۵۵٪ آلومینیم که خواص آن به خواص آلومینیم نزدیکتر است پیش بینی عمر پوششهای فلزی بستگی به وزن پوشش داشته که معمولاً مترادف ضخامت پوشش است .

^۱ Protective coatings

^۲ Sacrificial anode

پوشش های ضخیم به وسیله عملیات غوطه وری^۱ یا پاشش^۲ تولید می شوند ؛ پوششهای نازکتر توسط فرآیند نفوذی تهیه شده و پوشش روی نیز به وسیله آبکاری الکتریکی تهیه می شود .

در پاشش فلزات که از روی یا آلومینیوم به عنوان پوشش محافظ استفاده می شود ، معمولاً این عملیات همراه با یک برنامه رنگ زدن^۳ نیز می باشد . انتخاب فلز پاشیده شده و برنامه رنگ زدن بستگی به شرایط کاری دارد ؛ معمولاً این نوع سیستم بر روی ساختمانهای مجلل استفاده می شود ؛ به عبارت دیگر در جاهایی که طولانی بودن عمر سازه مهمتری مسأله بوده و بخواهیم تجهیزات نگهداری و حفاظت از آن را به حداقل برسانیم از این روش بهره می گیریم [۱۹] .

رنگ به لحاظ کاربرد از گسترده ترین پوششهای محافظتی است که برای سازه های فولادی به کار رفته و معمولاً به عنوان مانعی بین فلز و محیط عمل می کند . انتخاب نوع رنگ و ضخامت نهایی مورد نیاز بستگی به شرایط کاری داشته و هرچه شرایط خوردگی محیط شدیدتر باشد ، ضخامت بیشتر و لایه مقاوم تری از رنگ مورد نیاز است . همچنین آماده سازی سطح مسأله سیستم رنگی را پیچیده تر می کند [۲۰] .

اغلب اجزاء فولادی پیش از اینکه در سازه ها به کار روند ، رنگ زده می شوند . این مسأله وقتی که سازه ها مجدداً رنگ آمیزی شوند ، مشکلاتی را می تواند به وجود آورد . تیر آهنهای I شکل می تواند در کارگاه رنگ زده شود ، اما وقتی در سازه به کار می رود ،

^۱ Dipping

^۲ Spraying

^۳ Paint scheme

میزان دسترسی به آنها جهت تعمیر اغلب غیر ممکن می باشد که برای رفع آن باید یا فاصله t افزایش یابد یا فاصله آنقدر کم شود که دیگر نیازی به تعمیر نباشد. یک نمونه واقعی شکست ناشی از همین مسأله، تیرکهای فولادی نورد شده سقف یک اطاقک سرماساز می باشد که مجاور یکدیگر قرار گرفته اند و امکان دسترسی به آنها جهت رنگ زدن وجود نداشته باشد. تراکم زیاد سبب ایجاد رنگ آن در سطوح داخلی تیرکها شده و در نتیجه مجبور به تعویض زود هنگام اجزاء فولادی شده اند تصاویر (۵۰-۱۶) و (۵۱-۱۶) نمونه هایی از طراحی صحیح جهت دسترسی به قطع برای تعمیر مجدد را نشان می دهند.

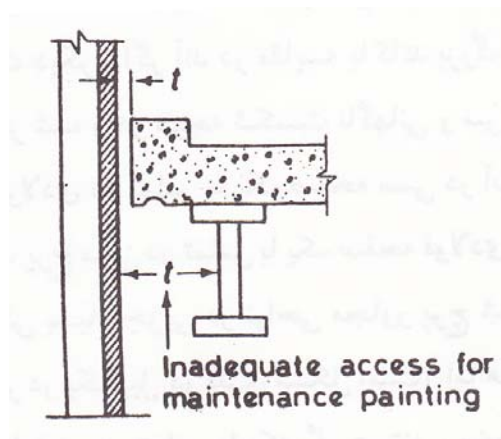
طراح باید همیشه مسأله بازرسی و تعمیر تمامی قطعات یک سازه که امکان خورده شدن برای آنها وجود دارد را در نظر گرفته و همچنین امکان دسترسی کافی را برای این گونه اهداف فراهم کند.

انتخاب سیستم حفاظتی به چندین عامل بستگی دارد. این عوامل عبارتند از: اهمیت سازه، محیط و عمر پیشنهادی. داشتن یک سیستم مناسب و مطلوب مستلزم این است که تجهیزات لازم جهت بازرسی کامل به طور دقیق مشخص شده باشد و بیشترین همکاری بین تهیه کننده، پیمانکار، معماران و تمامی عناصری که به نحوی در ارتباط اند، وجود داشته باشد.

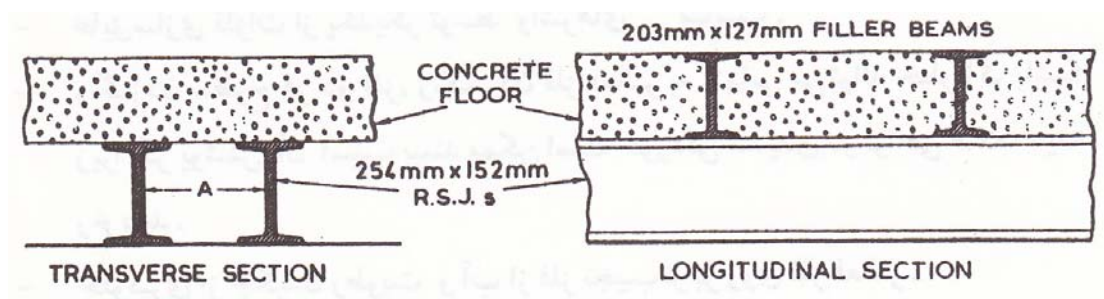
عمر یک پوشش تنها به نوع ماده بستگی نداشته، بلکه همچنین به عوامل دیگری نظیر آماده سازی سطح و بکارگیری پوشش که بتواند ضخامت مورد نیاز را تأمین کند وابسته است.

یک پوشش دوتایی^۱ شامل یک پوشش کاتدی^۲ و یک پوشش آلی ممکن است طول عمر

بیشتری از مجموع طول عمر هر دو نوع پوشش را به تنهایی داشته باشد [۱۹ و ۲۰]



شکل ۵۰-۱۶: امکان دسترسی کافی برای تعمیر و رنگ قطعه



شکل ۵۱-۱۶: طرحی از بستر بتنی تقویت شده در تیر آهن های قدیمی فاصله بین تیرکها in بوده است

که در تیر آهنهای جدید این فاصله به in ۱۸ افزایش یافته است .

^۱ Duplex coating
^۲ Cathodic coating

۴-۲-۳-۱۶- خوردگی دو فلزی (گالوانیک)

زمانی که فلزات دیگری در تماس با فولاد به کار روند ، باید ملاحظات در رابطه با امکان وقوع پدیده خوردگی گالوانیکی صورت پذیرد . سرعت و میزان خوردگی و خسارت فلز فعال تر بستگی به اندازه های نسبی نواحی آندی (فلز در حال خورده شدن) و کاتدی دارد . آند کوچک و کاتدی بزرگ شرایط نامساعدی را به وجود می آورد و سبب خوردگی شدید نواحی آندی می گردد . به عبارت دیگر ، اگر آند در مقایسه با کاتد بزرگ انتخاب شود ، خوردگی نواحی آندی یکنواخت تر شده و در نتیجه شکست ناگهانی و سریع رخ نمی دهد [۲۱] . به عنوان مثال ، یک پرچ فولادی در تماس با یک صفحه مسی در آب دریا بسیار سریع خورده می شود ، در حالی که یک پرچ مسی در تماس با یک صفحه فولادی ممکن است سبب افزایش خوردگی فولاد و خوردگی بسیار جزیی در نواحی مجاور پرچ شود . پیش نینی سرعت و میزان خوردگی فلز فعالتر در یک پیل دو فلزی مشکل است ، اما همیشه امکان خطرات جدید در مکانهایی که فلزات نامشابه در تماس با یکدیگر هستند ، مخصوصاً در شرایط غوطه ور شده ، وجود دارد . مطمئن ترین راه برای اجتناب از این نوع خوردگی این است که فلزات نامشابه در تماس با یکدیگر نباشند . اگر این مورد عملی نباشد ، راههای زیر جهت کاهش یا متوقف کردن خوردگی به ما کمک می کند :

۱ - استفاده از فلزات نجیب تر برای قید و بستها^۱

۲ - عایق سازی فلزات از یکدیگر توسط واشرهای^۲ مناسب .

^۱ Fastenings

^۲ Gaskets

۳ - رنگ زدن سطوح هر دو فلز ، رنگ زدن فلز فعالتر به تنهایی می تواند خطرناک باشد ؛ زیرا اگر پوشش آن آسیب ببیند ممکن است خوردگی شدیدی در نواحی صدمه دیده رخ دهد .

۴ - جلوگیری از چکیدن رطوبت و آب از فلز نجیب تر بر روی فلز فعالتر .
با توجه به پتانسیل برگشت پذیر روی^۱ ، انتظار می رود زمانی که روی با اکثر فلزات دیگری که در ساختمانها به کار می رود ، زوج شود ، خوردگی تسریع شود . پتانسیل برگشت پذیر آلومینیم کمی کاتدی تر از فلز روی می باشد . وقتی این دو فلز به یکدیگر زوج شوند آلومینیم محافظت می شود (مانند وقتی که ورق آلومینیمی با میخهای گالوانیزه ثابت نگه داشته شود) [۲۲] .

در عمل اگر چه انتظار می رود که سرعت خوردگی روی در تماس با فلز دیگر کمی تسریع شود ، اما معمولاً صرفاً وقتی که روی در تماس با مس قرار می گیرد این اثر بسیار شدید است . به عنوان نمونه ، آنجایی که ناودانیهای روی و آلومینیمی یا روی و چدنی به یکدیگر متصل می شوند ، خوردگی فلز روی بسیار جزیی تشدید می شود . همچنین برنج با ۴۰-۳۰٪ روی ، بسیار نجیب تر از مس بوده و پیچها و واشرهای برنجی می توانند با روی به کار رفته و در این صورت خوردگی آن به صورت بسیار جزئی تشدید می شود و یا اینکه اصلاً تسریع نمی گردد . با وجود این در اتصال روی با مس ، خوردگی شدیدی خواهیم داشت [۲۳] .

^۱ Reversible potential of zinc

۳-۳-۱۶- فلزات غیر آهنی^۱ و پلاستیک ها

زمانی که خواص استحکامی و انعطاف پذیری فولاد شرط لازم نباشد ، استفاده از فلزات یا مواد دیگر (به خصوص زمانی که به جزء مورد نظر نیرو اعمال نگردد) مفید می باشد . برخی از فلزات غیر آهنی و مواد پلاستیکی در این موارد ، بسیار مفید می باشند . مخصوصاً با توجه به اینکه این مواد خواص مقاومت به خوردگی عالی داشته و به راحتی شکل می گیرند .

از فلزات غیر آهنی به شکل ورق غالباً به عنوان پوشش سقف و بام استفاده می شود . در چنین مواردی این فلزات در معرض پدیده متراکم شدن قرار می گیرند . متراکم شدن می تواند ناشی از پمپ شدن حرارتی^۲ (گرمایشی) یا شرایط داخلی باشد . در شرایطی که عمل متراکم شدن می تواند روی دهد ، مس معمولاً خورده نمی شود اما روی ، سرب و آلومینیم ممکن است از داخل ساختمان به سمت بیرون خورده شود . در ذیل به برخی از مهمترین فلزات مورد استفاده در ساختمانها اشاره می شود :

- مس

اگر چه مس تحت شرایط عادی وقتی در معرض محیط قرار می گیرد ، مقاوم است ، ولی پیش بینیهایی خاصی به منظور اجتناب از خطر شکست ناگهانی و زود هنگام آن صورت می پذیرد . برای نمونه ، مسی که در معرض جریانی از سوخته های گازی با غلظت بالا قرار می گیرد (مانند دودکشهای خروجی گازها) ممکن است در مدت زمان نسبتاً کوتاهی خورده

^۱ Non – ferrous metals

^۲ Thermal pumping

شود . به منظور اجتناب از وقوع این مسأله ، دودکش باید در ارتفاع قابل قبولی از بالای بام ساخته شود . به دلایل مشابه ، هواکشها نیز نباید در مکانی که بخارات سولفوری وجود دارد از جنس مس تهیه شوند . استفاده از موادی که به صورت بالقوه خورنده اند به عنوان زیر لایه برای سقفها و بامهای مسی نیز سبب شکست می گردد . زیر سقفهای مسی(به صورت لخت) وقتی در معرض محیط قرار می گیرند به آرامی تیره (کدر) می شوند . با وجود این می توان از لاکهای شفاف جهت حفظ براقیت سطح بدون اینکه نیاز به تمیز کاری مجدد باشد استفاده کرد . مس و هر آلیاژ دیگر مسی بدون نگهداری و پوشش سطح براقیت خود را نمی تواند حفظ کند [۲۴]

- سرب

خوردگی و در معرض هوا قرار گرفتن ناودانهای سربی معمولاً به بامهای سنگی و چوبی مربوط می شود که بر روی آنها انواع موجودات نظیر جلبک^۱ ، خزه^۲ یا گل‌سنگ^۳ رشد یافته اند . این مواد تولید اسیدهای آلی و دی اکسید کربن کرده که شدیداً اسیدیته آب بارانی را که از سقف می ریزد افزایش می دهند . توفالهای چوب درخت سرو شامل اسیدهایی است که به آرامی توسط باران شسته شده و در نتیجه خوردگی ناشی از رشد موجودات گیاهی روی بام را تشدید می کند . احتمالاً ساده ترین راه برای جلوگیری از این نوع پدیده ، محافظت سرب با پوششهای ضخیم قیری است که تا زیر لبه بام ادامه دارد .

^۱ Algae
^۲ Moss
^۳ Lichen

-سرب در مکانهایی که بخارات اسید استیک^۱ حضور داشته باشد به سهولت خورده می شود و تحت چنین شرایطی یا سرب نبایستی به کار رود یا اگر به کار می رود باید به طور کامل و مؤثر حفاظت گردد. معمولاً هر گونه تماس بین سرب و مواد آلی حاوی اسید یا تولید کننده اسید سبب خوردگی می شود.

برای نمونه از چوب مرطوب می توان نام برد. در این مورد استفاده از چوبهایی که به خوبی خشک شده اند یا نگهداری آنها در شرایط خشک و یا جدا کردن سرب از چوب به وسیله قیر یا رنگ می تواند در پیشگیری از وقوع این پدیده مفید باشد. همچنین سرب توسط آهک نیز خورده می شود؛ مخصوصاً توسط سیمان پرتلند، ملات و بتن؛ اما می تواند به وسیله یک پوشش ضخیم قیری حفاظت شود. سرب در جایی که حفاظت نشود و در ملات^۲ نم دار و متصل به یک دیوار آجری قرار گیرد، ممکن است شدیداً خورده شود؛ این خوردگی به خصوص در مکانی که اجزاء آجری در معرض محیط قرار داشته و محیط شدیداً مرطوب می باشد، با شدت بیشتری به وقوع می پیوندد [۲۵].

- آلومینیم

مقاومت آلومینیم و آلیاژهای مشخصی از آن به خوردگی اتمسفری نسبتاً بالا است با وجود این، خوردگی می تواند در زیر سطوح و در نواحی مرده رخ دهد، معمولاً در محیطهای ساده، فلز می تواند واکنش خوردگی را متوقف کرده و سرعت خوردگی را به مقادیر پایینی کاهش دهد. با این حال خوردگی اتمسفری ممکن است منجر به خوردگی

^۱ Asetic acid fumes

^۲ Mortar

شدیدی شود و خوردگی زیر لایه ای اتفاق افتد. از این جهت توجه به مواد، طراحی و حفاظت حائز اهمیت است. از تماس بین فلزی، شکافها و شرایط خوردگی شکافی، سطوح افقی و غیره باید اجتناب شود. موادی که برای مقاطع، صفحات و ورقها مورد استفاده قرار می گیرد (یعنی در جاهایی که استحکام حائز اهمیت است) باید به چند نوع آلیاژ عمده محدود شود. تمامی آلیاژهای عملیات حرارتی شده بایستی رنگ شوند؛ رنگ کردن باید به این صورت باشد که در ابتدا از یک رنگ اولیه کرماتی حاوی بیشتر از ۲۰٪ رنگدانه^۱ (ماده رنگی) کرمات روی یا یک رنگ کرماتی معادل استفاده شود. شکافهای موجود باید توسط ترکیب شیمیایی مناسبی نظیر ترکیبات کرماتی یا نوارهای اشباع^۲ شده پر شود. با توجه به رعایت این نکات، فلز آلومینیم رفتار رضایت بخشی را از خود نشان می دهد.

- روی

سطوح فلزی روی در محیط های شهری و روستایی بسیار آهسته تر از اتمسفرهای دریایی یا نواحی صنعتی که آلودگی عمده آنها اکسیدهای گوگرد بوده، خورده می شود. همچنین فلز روی نسبت به مواد ساختمانی دیگر نیز دارای سرعت خوردگی کمتری است. گوگرد و ترکیباتش در هوا به اسیدسولفوریک اکسید شده و تشکیل سولفات روی قابل حل می دهد که توسط باران شسته می شود [۲۶].

^۱ Pigment

^۲ Impregnated tape

در چه خلوص روی در تعیین طول عمر آن نقش مهمی ندارد . طول عمر فلز در هر شرایط محیطی مشخصی تقریباً متناسب با ضخامت آن می باشد . در نواحی بسیار آلوده صنعتی ، بهترین نتایج زمانی حاصل می شود که روی توسط پوششی از رنگ محافظت گردد . امروزه بسیاری از آسترها و رنگهای مناسب وجود دارد که بسیار مفید بوده و در محیطهای خورنده سبب افزایش عمر کاری قطعه می گردد . آسترهایی که عموماً به کار می روند شامل پلمبات کلسیم^۱ ، سرب فلزی ، فسفات روی و آسترهای اچی بر پایه پلی وینیل بوتیرال^۲ می باشد . به خصوص در محیطهای دریایی ، زیر آسترهای کرمات روی^۳ به کار می رود . فلز روی به طور وسیعی به عنوان ماده روکش سقف استفاده می شود ، اما طول عمر آن به خصوص در نواحی صنعتی ، تا حدی بستگی به گام^۴ یا شیب سقف دارد . هرچه شیب آبگذار سقف تندتر باشد ، سقف سریعتر خشک شده و در نتیجه عمر آن طولانی تر می گردد . قسمت خارجی (بیرونی) فلز روی ممکن است به دلیل طراحی نا مناسب یا عیوب موجود در نصب ، به طور ناگهانی بشکند . علت اکثر شکستها ، ترکیبی از دلایل مکانیکی محض و آثار خوردگی (اکسید سفید) می باشد . با وجود این ، با اعمال عملیات کروماته کردن خطر وقوع شکست کاهش می یابد . زمانی که از پوششهای روی در داخل کارخانه ها استفاده می شود ، این پوششها در برابر اکثر گازها و

^۱ Calsium Plumbate

^۲ Polyvinyl butyral

^۳ Under Zinc chromate primers

^۴ Pitch

بخارات صنعتی موجود در کارخانه ، مقاومت خوردگی خوبی را از خود نشان می دهند .

حفاظت اجزاء فولادی به واسطه پوشش گالوانیزه ، سبب

می شود تا مقاطع فولادی با اطمینان کامل در بتن به کار روند [۲۶] .

– روی در تماس با چوب

معمولاً روی در تماس با چوب خشک^۱ ، تحت تأثیر قرار نمی گیرد . اما چوب بلوط^۲ و به

خصوص چوب درخت سدر قرمز غربی^۳ می تواند سبب خوردگی فلز روی شود و در

نتیجه آب حاصله از اینگونه چوبها نباید بر روی سطوح فلز روی ریخته شود . موادی که

در حین خشک شدن چوبها از گره ها و غدد چوبهای نرم مرطوب خارج می شوند نیز بر

فلز روی تأثیر می گذارند . در استفاده از روی یا فولاد گالوانیزه که در تماس با چوبهای

اشباع^۴ و چوبهایی که آغشته به مواد ضد حریق^۵ می باشند باید احتیاط لازم به عمل آید .

مواد اشباع کننده چوب معمولاً باید از نوع پایه حلالی^۶ باشد . ممانعت کننده های پایه حلالی

(جهت جلوگیری از فساد چوب) معمولاً برای روی خورنده نبوده ، اما ممانعت کننده های

آبی^۷ حاوی نمکی با ترکیبی از مس – کرم – آرسنیک (CCA) سبب تشدید مواد و تسریع

خوردگی روی در شرایط مرطوب می گردد . چنین ممانعت کننده هایی شامل سولفات مس

و دی کرمات سدیم می باشند . همچنین زمانی که مس ، کرم و آرسنیک جذب چوب می

^۱ Seasoned wood

^۲ Oak

^۳ Western red cedar

^۴ Preservative

^۵ Fired – retardant – treated

^۶ Solvent – based preservatives

^۷ Water – based preservatives

شوند، سولفات سدیم آزاد باقی مانده و در شرایط مرطوب، الکترولیتی خورنده برای فلز روی فراهم می کند. همچنین مواد خاموش کننده آتش غالباً پایه هالوژنی دارند که مرطوب بوده و می تواند سبب خوردگی روی گردد [۲۸].

آلیاژهای ریختگی (تحت فشار) روی به کار رفته در زیر سقف^۱

اتصالاتی که از جنس آلیاژهای روی بوده و در اثر ریخته گری تحت فشار تولید می شوند دارای مقاومت خوبی نسبت به خوردگی هستند. به طور کلی چنین آلیاژهای ریخته شده ای، بدون اینکه نیازی به محافظت بیشتر توسط رنگ داشته باشد در بناها و ساختمانها به کار می روند. اما بهتر است که این آلیاژها (به خصوص در شرایط رطوبت دائمی) ابتدا کروماته یا فسفاته شده و سپس لعاب داده شوند یا با یک آستری اولیه ناهموار کننده سطح^۲ پوشش داده شوند (این نوع آستری حاوی رنگدانه کرمات روی و رزین پلی وینیل بوتیرال می باشد) و سپس پس از نصب، سازه رنگ زده شود. در مکانهایی که از پوشش کرم استفاده می شود، به کارگیری یک زیر لایه مناسب از مس و نیکل آبکاری شده، ضروری است.

سولفاتها و کلریدهای موجود در اجزایی نظیر آجر، گچ و دیگر موادی که در ساخت دیوار به کار می روند می توانند تحت شرایط مرطوب، خطرات بسیار جدی را به لحاظ خوردگی به وجود آورند. تحت چنین شرایط محیطی، یا درجایی که اتصالات از جنس روی یا آلیاژهای

^۱ Zince – alloy diecasting used indoors

^۲ Etch primers

روی در تماس با بتن یا ملات خاکستر سیاه^۱ (ساخته شده از خاکسترهای خاکی) به کار روند، محافظت از فلز باید به وسیله دو پوشش از جنس زود خشک شونده^۲ (قیر طبیعی که سریع خشک می‌شود) صورت پذیرد [۲۹].

– روی به عنوان یک پوشش محافظ برای اجزاء ساختمانی

شاید مهمترین استفاده از روی در ساختمانها، به عنوان پوشش محافظی است که بر روی فولاد داده می‌شود. با وجود اینکه هزینه اولیه پوشش روی (یا آلومینیوم) بالا است، اما اغلب اوقات، هزینه‌های ناشی از خوردگی را نخواهیم داشت. به طور کلی، اعتقاد براین است که کارایی پوشش بستگی به وزن پوشش روی داشته و به روش بکارگیری آن کمتر وابسته است.

۴-۳-۱۶- فلزات در تماس با بتن

اطلاعات اندکی درباره خوردگی فلزات در بتن در دسترس است؛ اگرچه به نظر می‌رسد حتماً تمام انواع سیمانها اعم از سیمان پرتلند، سیمان سرباره^۳ و سیمان پرآلومینا^۴ (با آلومینای زیاد) رفتاری مشابه داشته باشند. بتن محیطی قلیایی فراهم کرده و تحت شرایط مطلوب، فلزاتی نظیر روی، سرب و آلومینیوم در بتن واکنش داده و خورده می‌شوند. فلز مس تمایلی به واکنش از خود نشان نمی‌دهد، در حالی که آهن توسط بتن محافظت و روپین می‌شود. [۲۷].

^۱ Black ash mortar

^۲ Hard drying bitumen paint

^۳ Slag cement

^۴ High – alumina cement

آلومینیم به شدت با مخلوط بتنی که به تازگی تهیه شده و مرطوب است واکنش می‌دهد. با وجود این، وقتی بتن سفت و محکم می‌شود تمایل به انجام واکنش در آن کاهش می‌یابد. میزان خوردگی آلومینیم بستگی به نوع آلیاژ دارد.

ضمن اینکه خوردگی ممکن است استحکام مکانیکی آلومینیم را کاهش ندهد، اما تشکیل محصولات پرحجم خوردگی منجر به ترک‌دار شدن و پوسته پوسته شدن^۱ بتن می‌گردد.

روی همراه با آزاد شدن هیدروژن در برخی سیمانها با مواد پایه سیمان واکنش می‌دهد. این واکنش با حضور کرمات قابل حل که یا در سیمان^۲ (بیشتر از ۷۰ppm) موجود است و یا به عنوان رویین کننده سطح روی به کار می‌رود، می‌تواند کنترل گردد. بنابراین روی می‌تواند به منظور حفاظت اضافی برای فولاد در بتن به کار رود. این مسأله در بتنهای حاوی کربنات نسبت به بتنهای حاوی یون کلرید مؤثر بوده و کارآیی بیشتری دارد [۳۰].

سرب در بتن از این جهت که معمولاً در مراحل اولیه که بتن مرطوب است، واکنش سریعی رخ نمی‌دهد، رفتاری متفاوت نسبت به فلزات آلومینیم و روی دارد. با وجود این، واکنش در شرایط مرطوب، حالتی افزایشی (تصاعدی) داشته و این مسأله نیز از این حقیقت ناشی می‌شود که بتن از تشکیل لایه محافظ کربنات سدیم بر روی سطح سرب جلوگیری می‌کند.

اطلاعات اندکی درباره عملکرد مس و آلیاژهای آن در تماس با بتن در دسترس است، اما گاهی اوقات که بتن حاوی آمونیاک باشد، سبب وقوع خوردگی تنشی شکافی لوله‌های مسی

^۱ Spalling
^۲ Cement

می‌گردد. آمونیاک ممکن است از مواد کف‌ساز نیتروژنی که جهت تولید بتن عایق کننده سبک به کار می‌رود، به وجود آید.

رفتار خوردگی آهن و فولاد در بتن بسیار مهم است. این مسأله نه فقط به دلیل مقدار فلزی است که به کار می‌رود، بلکه به خاطر این است که فلز دائماً تحت تأثیر نیرو قرار داشته و پایداری و مقاومت سازه بستگی به کنترل خوردگی آن دارد. واکنش قلیایی در مجاورت فلز ممکن است سبب تخریب رنگهای حساس شود و نهایتاً رنگها خاصیت حفاظت کنندگی خود را از دست دهند. خوردگی بتنهای مسلح در ذیل بحث می‌شود [۳۱].

۱-۴-۳-۱۶- اثر ترکیب شیمیایی بتن بر خوردگی بتن‌های مسلح

بتن از سیمان پرتلند^۱ معمولی تهیه شده که یک ماده قلیایی بوده و PH آن در محدوده ۱۲/۶-۱۳/۵ می‌باشد. فولاد در چنین محیطی روپین خواهد شد. با وجود این، شبیه اکثر مواد قلیایی، بتن نیز با گازهای اسیدی موجود در اتمسفر یعنی دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید کربن وارد واکنش شده و سبب کاهش قلیاییت خود می‌گردد. دی‌اکسید کربن با تغییر شیمیایی محیط بتن و کاهش PH به حدی که دیگر فولاد روپین نشود، اثر خود را می‌گذارد. این فرآیند به نام کربناته شدن^۲ شناخته می‌شود. این فرآیند از سطح خارجی بتن شروع شده و به سمت داخل گسترش می‌یابد و وقتی کربنات به فولاد برسد، فولاد را در خطر خوردگی قرار خواهد داد. سرعت این فرآیند به تخلخل^۳، نفوذپذیری^۴، مقدار سیمان،

^۱ Portland cement

^۲ Carbonation

^۳ Porosity

^۴ Permability

نسبت آب به سیمان و عوامل دیگر بستگی دارد. عمق (ضخامت) پوشش بتنی فولاد اثر مهمی را بر رفتار حفاظت از خوردگی فولاد خواهد داشت. به طور کلی هرچه پوشش ضخیم‌تر شود، حفاظت بهتری از فولاد خواهیم داشت. متأسفانه حفاظت فراهم شده توسط بتن تحت تأثیر یون کلر موجود در آن نیز قرار دارد. یون کلر به عنوان یک ناخالصی از اجزاء سازنده بتن وارد بتن می‌شود؛ درصد بسیار زیادی از آن (در حدود ۹۰٪) در زمینه سیمانی موجود است و صرفاً درصد جزیی از آن در محلولهای موجود در منافذ به صورت آزاد وجود دارد. دستورالعملهای موجود، استفاده از افزودنیهای حاوی یون کلر را ممنوع کرده و مقدار یون کلر موجود در بتن را محدود کرده است. معمولاً برای بتنهای مسلح ساخته شده از سیمان پرتلند عادی نباید مقدار وزن یون کلر با توجه به نسبت وزن سیمان بیشتر از ۰/۴٪ باشد [۳۰].

وقتی بتن به عمل آمده به یون کلر آلوده شود (به طور مثال در تماس با نمک ضدیخ قرار گیرد)، شیمی سیمان پیچیده‌تر شده و بنابراین، این امر می‌تواند بسیار مشکل‌آفرین و خطرناک باشد. وقتی فولادهای موجود در بتن خورده شوند محصولات پرحجمی تولید می‌شود که به بتن فشار وارد کرده، سبب ترک‌دار شدن و پوسته پوسته شدن بتن می‌گردد. هیچگونه ایراد و اشکالی در استفاده از توده‌های سرباره^۱ برای تهیه سیمان مسلح وجود ندارد. سرباره دارای مقادیر مختلفی سولفور می‌باشد، اگرچه ادعا شده است که وجود سولفور در سرباره کوره بلند مضر و خطرناک نیست، ولی ملاحظات را باید در مورد

^۱ Slag aggregates

توده‌های سبک وزن به کاربرد. به عبارت دیگر استفاده از، توده‌های کلینکر^۱ (تفاله کوره بلند) در انگلستان مجاز نیست، زیرا سبب خوردگی اجزاء تقویت کننده می‌گردد. خصوصیت خوردگی کلینکر و سرباره احتمالاً ناشی از مقدار سولفور بالای آنها می‌باشد [۲۹].

۲-۴-۳-۱۶- خوردگی اجزاء تقویت کننده فولادی در بتن

۱-۲-۴-۳-۱۶- تقویت کننده‌های معمولی^۲

در اواسط قرن اخیر، خواص کششی بتن توسط فولاد بهبود یافت. این مسأله پیشرفت زیادی پیدا کرد تا اینکه هم اکنون بتن با تقویت کننده فولادی یکی از مواد اصلی ساختمان به شمار می‌آید. به طور کلی پایداری خوب سازه‌های ساخته شده و شرایط رضایت‌بخش فراهم شده توسط بتن مسلح ثابت شده است.

معمولاً بتن با فولاد ساده کربنی تقویت می‌شود، اما در شرایطی که فرآیند کربناته شدن سریع^۳ رخ دهد یا خطر وجود یون کلر وجود داشته باشد، استفاده از فولادهای تقویت کننده دیگری با مقاومت به خوردگی بالاتر ضروری است. سه نوع میله تقویت کننده فولادی که مقاومت به خوردگی خوبی داشته و متداول نیز می‌باشد، عبارت است از:

^۱ Clinker aggregate

^۲ Normal reinforcement

^۳ Rapid Carbonation

۱- فولاد گالوانیزه^۱ که مقاومت به خوردگی بالایی را در بتن های کربناتی فراهم می کند. در

بتنی که با توجه به مقدار سیمان آن، متجاوز ۴/۰٪ یون کلر وجود دارد، خطر خوردگی

افزایش یافته و در غلظتهای بالای یون کلر، سرعت خوردگی به سرعت خوردگی فولاد

ساده کربنی نزدیک می شود. در شرایط آزمایشی، سرعت خوردگی در حضور کلرید سدیم

بیشتر از کلرید کلسیم می باشد [۳۲ و ۳۳].

۲- فولاد پوشش داده شده با اپوکسی^۲ عملکرد خوبی در بتنی که حاوی یون کلر (تقریباً تا

۳/۹٪ یون کلر) باشد از خود نشان می دهد [۳۳].

۳- فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارای مقاومت به خوردگی بالاتری در غلظتهای بالای یون

کلر (بیشتر از آنچه که برای فولادهای پوشش داده با اپوکسی ذکر شد) می باشد [۳۳].

۲-۲-۴-۳-۱۶- تقویت کننده پیش تنیده^۳

برای ساخت بتن با تقویت کننده پیش تنیده، یا از سیمهای فولادی با استحکام کششی بالای

یا گاهی اوقات از میله های فولاد آلیاژی حاوی منگنز و سیلیس استفاده می شود. سیمهای

گالوانیزه نیز ممکن است به کار روند، اما توصیه می شود پیش از آن که سیمهای گالوانیزه

مورد استفاده قرار گیرند، کروماته شوند.

در بتنهای مسلح معمولی، تنش کششی در فولاد نسبتاً پایین بوده، اما در بتن با تقویت

کننده فولادی پیش تنیده، فولاد به طور دائم در تنش کششی تقریباً معادل ۶۵٪ بار

شکستش نگهداری می شود. بنابراین در بتنهای پیش تنیده ضروری است که امکان وقوع

^۱ Galvanized steel

^۲ Fusion – bonded epoxy

^۳ Prestressed reinforcement

خوردگی تنش‌ی بررسی و در نظر گرفته شود. زنگ زدگی سطحی یا خوردگی سیمهای پیش تنیده بر سطح مقطع کاری تقویت‌کننده‌ها (میله‌ها) م‌ثر می‌باشد و حفره‌دار شدن که ممکن است برای میله‌های ۱۲mm چندان مهم نباشد، می‌تواند سبب شکست سیمهای تنش‌دار با قطر ۲/۵mm شود. تعداد شکست‌های ناشی از شکست تقویت‌کننده‌ها در بتنهای پیش تنیده بسیار کم گزارش شده است به طور کلی رفتار فولاد در بتنهای تنیده از مواد با سد مقطع باریک استفاده می‌شود. این مواد تنشهای کاری بالاتری را نسبت به موادی که در بتنهای مسطح معمولی به کار می‌رود، تحمل می‌کنند. بتن نیز با این موارد دارای کیفیت بالاتری می‌باشد. براساس تحقیقاتی که صورت پذیرفته ، عمده عوامل مؤثر بر خوردگی سیمهای فولادی پیش تنیده در بتن عبارت‌است از [۳۱].

- (۱) حضور یون کلر؛
- (۲) ترکیب شیمیایی بتن؛
- (۳) درجه کربناته شدن بتن؛
- (۴) درجه تراکم (فشرده‌گی) بتن موجود در پیرامون سیم و اطمینان از عدم حفره و تخلخل؛
- (۵) یون کلر سبب خوردگی حفره‌ای شده که در نتیجه منجر به شکست می‌شود ولی خوردگی تنش‌ی شکافی در فولاد پیش تنیده ایجاد نمی‌کند [۳۵].

گیل چست^۱ معتقد بود که شکست فولادهای پیش تنیده ممکن است یا توسط شکست هیدروژن یا مسیرهای فعال خوردگی رخ دهد. این امر بستگی به شرایط کاری داشته و در اکثر شرایط، شکست، ناشی از ترک برداشتن هیدروژنی بوده است.

فولاد پیش تنیده در بتن با رعایت موارد زیر می‌تواند با دوام‌تر و پایدارتر شود:

بتن باید دارای خصوصیات نظیر فشردگی، عدم نفوذپذیری و یکنواختی بوده و عاری از یون کلر در اطراف فولاد باشد؛ همچنین باید یک عمق کافی از بتن برای فولاد در نظر گرفته شود [۳۴].

۵-۳-۱۶- موارد به کار رفته در سیستم‌های تأمین آب^۲

مهمترین فلزات غیرآهنی مورد استفاده در انتقال آب، سرب، مس و روی می‌باشند. مخصوصاً روی که به عنوان پوششی محافظ بر روی فولاد یا به صورت آلیاژی با مس (برنج) به کار می‌رود [۳۶].

انتخاب مواد برای اکثر کاربردهای خانگی سیستم‌های آبی تحت تأثیر ملاحظات نظیر خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی قرار دارند. اما در انتخاب نهایی مواد، علاوه بر خواص مکانیکی و خوردگی عواملی نظیر مسائل بهداشتی، هزینه، زیبایی ظاهری و سهولت نصب نیز در نظر گرفته می‌شود.

^۱ Gilchrist

^۲ Materials in water – supply systems

اکثر مواد پلاستیکی نیز هم اکنون در سیستمهای آب خانگی به صورت لوله و زانو و اتصالات^۱ به کار می‌رود. خصوصیات و نکاتی که باید تمامی مواد (مخصوصاً فلزات آهنی) در محیطهای آبی رعایت شود عبارت‌است از:

۱- توجه به شکاف‌ها: رسوبات در شکاف‌ها تجمع کرده و باعث کمبود اکسیژن در این مناطق می‌شود و نهایتاً سبب پیشرفت خوردگی می‌گردد؛ در این نواحی پیل‌های خوردگی به وجود آمده و مناطقی که دارای اکسیژن کمتری می‌باشد با سرعت بیشتری خورده می‌شوند.

۲- در نظر گرفتن ناگهانی و شدید در جهت حرکت سیار. از این گونه تغییرات به خصوص در مکانهایی که مایعات با سرعت بالایی در حال حرکتند بایستی پرهیز شود. از زوایای درون رو و مقعر و نواحی مرده و شرایط ساکن نیز می‌بایست اجتناب گردد. این مسائل زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که از ممانعت کننده‌ها نیز استفاده شده باشد.

شیرهای تنظیم کننده^۲ و سفت کننده‌های^۳ داخل مغازه می‌بایست به گونه‌ای باشند که به آب اجازه خروج آزادانه داده و زهکشی مناسب را در قسمت تحتانی مخزن بدهند. بخش تحتانی مخازن باید دارای شیبی به سمت پایین و گوشه‌های گرد باشد. شیرهای آب گذر یا توپیها باید در قسمت تحتانی مغازه جاسازی شوند.

^۱ Fitments
^۲ Battles
^۳ Stitteners

تا آنجایی که مقدور نباید فلزات غیرهمجنس در یک سیستم به یکدیگر متصل شوند. اگر استفاده از فلزات مختلف ضروری باشد، باید از یکدیگر عایق شده و فلزات با پتانسیل مثبت‌تر، یعنی فلزات کاتدی^۱ در پایین دست فلزات آندی^۲ قرار گیرند [۳۷].

– لوله‌های فولادی گالوانیزه:

لوله‌های شیاردار از جنس فولاد نرم^۳ از ارزان‌ترین مواد جهت لوله‌های حمل آب می‌باشد؛ اما معمولاً از آنها به خاطر مقدار زنگ آهنی که در آب به دلیل خوردگی ایجاد می‌کنند، استفاده نمی‌شوند. لوله‌های گالوانیزه از جنس فولاد نرم این مشکل را مرتفع کرده و تقریباً برای تمام آبهای سخت به کار می‌روند؛ اما این لوله‌ها برای آبهای نرم و یا آبهایی که دارای مقادیر بالایی از دی‌اکسیدکربن آزاد باشند رضایت‌بخش نمی‌باشد. بنابراین وقتی از فولادگالوانیزه استفاده می‌شود توانایی آب را جهت تشکیل پوسته محافظ باید در نظر گرفته باشد اندیس لانگلیز راهنمای مفیدی برای این مسأله می‌باشد، اما این اندیس تقریبی است. پوسته‌های رسوب یافته می‌توانند یا به صورت کره‌هایی^۴ سطح نسبتاً کوچکی از فلزات بپوشانند. یا به صورت یک لایه نازک، ناحیه بزرگی را پوشش دهند. رسوباتی که متخلخل نباشند تأثیرات زیادی در ایجاد لایه محافظ و کاهش خوردگی دارند. آبهای مشتق شده از رودخانه‌ها نسبت به آبهای چاه تمایل بیشتری به تشکیل پوسته‌های مفید دارند. لوله‌های فولادی گالوانیزه ارزان‌تر از لوله‌های سربی یا مسی می‌باشند، اما هزینه نصب بیشتری

^۱ Cathodic metals

^۲ Anodic metal

^۳ Threaded mild- steel tube

^۴ Nodules

نیاز دارند؛ زیرا این لوله‌ها نمی‌توانند بدون اینکه آسیبی به پوشش گالوانیزه آنها وارد شود، خم شوند. اجزاء خم شده (به شکل T و غیره) بسیار زیادی وجود دارد، اما برش لوله‌ها به اجزاء کوچکتر، رزوه کردن انتهای لوله‌ها و قلاویز کردن و به صورت مارپیچ درآوردن اتصالات، فرآیندهای آهسته و وقت‌گیری می‌باشند، در نتیجه نصب فولاد گالوانیزه برای یک خط لوله مستقیم ارزان بوده، اما برای سیستمهای پیچیده به دلیل هزینه بالای نصب آنها، گرانتر از مس می‌باشند [۳۸].

-لوله‌های سربی:

معمولاً مقاومت به خوردگی سرب عالی است، اما سرب نیز توسط برخی آبهای معین خورده می‌شود. این مسأله معمولاً تاکنون کمتر سبب تخریب لوله شده است از طرفی دیگر سرب یک ماده سمی بوده و برای سلامتی مضر است و لذا حتی مقادیر جزئی از آن نیز در مدت زمانهای طولانی تولید سم سربی می‌کند. به این دلیل استفاده از سرب برای حمل آبهای قابل شرب محدود و ممنوع شده است [۳۸].

-لوله‌های مسی:

برای لوله‌کشی بالاتراز سطح زمین، لوله‌های مسی به هردو صورت نیمه سخت^۱ (نیمه ضخیم) و سخت (ضخیم) به کار می‌رود این لوله‌ها استحکام کافی را داشته و صرفاً تعداد کمی تکیه‌گاه (پایه) برای نگهداری آنها مورد نیاز است و می‌تواند در اندازه‌ها و ابعاد کوچک خم شود. این عمل با دست یا با ماشین قابل حمل و نقل خمکاری صورت می‌پذیرد. مس

^۱ Half – hard condition

کاملاً نرم و باریک جهت تهیه سیم‌پیچ‌ها و قراردادن و به کارگیری آنها در زیرزمین و در تجهیزات و قطعات گرمایشی به کار می‌رود. لوله‌های مسی با قطر کم با جوشکاری خودکار یا جوش زرد، جوش داده می‌شوند. این فرآیندها که تولید اتصالات (جوشهای) محکم و تمیزی می‌کنند، معمولاً برای لوله‌هایی با اندازه‌های بزرگتر نیز به کار می‌روند. معمولاً از اتصالات تحت فشار و یا اتصالات لحیمی- مویی^۱ برای لوله‌های آب شهری (خانگی) استفاده می‌شود.

در لوله‌های مسی امکان وقوع دو نوع خوردگی وجود دارد:

نوع اول: انحلال یکنواخت مس از سطح لوله؛ در برخی از آب‌ها استفاده توأم از مخازن گالوانیزه آب گرم و لوله‌های مسی خطرناک است. در سیستمهای آب خانگی، مخازن گالوانیزه آب گرم متصل به لوله‌های دوار مسی در اثر خوردگی حفره‌ای فولاد گالوانیزه (به واسطه وجود تقریباً بیشتر از ۰/۱ppm مس در آب) به طور سریع زوا یافته و از کار افتاده‌اند. زوال مخازن گالوانیزه آب سرد به دلیل وجود مس در آب است که غالباً نتیجه گردش برگشتی آب داغ حاوی مس به سیستمهایی است که طراحی مناسبی نشده‌اند در مناطقی که مخزن آب سرد در مجاورت استوانه آب گرم نصب شده است، این اتفاق ممکن است رخ دهد. گاهی اوقات نیز ورود آب گرم به درون مخزن آب سرد از طریق لوله‌های انبساطی در هنگامی که آب می‌جوشد می‌تواند مؤثر باشد.

^۱ Capillary – solder fittings

نوع دوم: تحت شرایط خاصی فلز مس دچار خوردگی حفره‌ای شدیدی می‌شود که در برخی موارد این خوردگی در مدت زمان کوتاهی منجر به سوراخ کردن لوله‌ها می‌گردد. این نوع خوردگی عمومیت نداشته و بستگی به شرایط محیطی دارند و تحت شرایط غیرعادی ایجاد می‌شود. یکی از این موارد، تشکیل لایه یا پوسته نسبتاً (نه کاملاً) پیوسته‌ای است که نسبت به لوله‌های مسی، کاتدی بوده و سبب خوردگی آندی کوچکی می‌گردد این نقاط آندی از ترکها و عیوب موجود در پوسته ناشی می‌شود. لایه‌های کربنی^۱ از این نوعند. از سال ۱۹۵۰ که اهمیت و اثر لایه‌های کربنی برای اولین بار کشف شد، سازنده‌ها ملاحظاتی را جهت پرهیز از به کارگیری لوله‌های ایجاد کننده این گونه لایه‌ها به کاربرند.

– لوله‌های آلومینیمی:

فلز آلومینیم اگر بتواند در مقابل خوردگی حفره‌ای مقاوم باشد، یک ماده حیاتی و مهم برای انتقال آب به شمار می‌آید. سازگاری مواد معمولی مورد استفاده در ساخت لوله با آبهای بسیار نرم دشوار بوده و به همین دلیل در موقع استفاده از آلومینیم باید دقت زیادی به کار برده شود؛ لذا امکان استفاده از فلز آلومینیم برای لوله‌های حمل آب خانگی بستگی به دو عامل دارد:

۱- یافتن ممانعت کننده ای ارزان و موثر که بتواند به آب افزوده شود.

^۱ Carbon film

۲- استفاده از لوله هایی که سطوح داخلی آنها روکش دار^۱ باشند مانند آلیاژ $AL-1/25Mn$ که با آلیاژی آندی تری نظیر $AL-1Zn$ روکش شده است. چنین لوله هایی در حال حاضر اساساً برای اهداف و مصارف آبیاری استفاده می شوند

- فولادهای زنگ زن

لوله های زنگ زن جداره نازک ($Fe-18Cr-8Ni$) هم اکنون به جای لوله های مسی برای تأسیسات خانگی استفاده می شود. با وجود این، ملاحظات در طراحی تجهیزاتی از جنس فولاد زنگ زن جهت استفاده در آبهای حاوی یون کلر بالا و یا در مکانهایی که غلظت یون کلر افزایش می یابد باید صورت پذیرد، زیرا خطر خوردگی حفره ای وجود دارد. تحت شرایط خاصی فولادهای زنگ زن به خوردگی تنشی مستعد هستند.

- لوله های پلاستیکی: لوله های پلاستیکی نظیر p.v.c سخت، پلی تن^۲، ABS, GRP هم اکنون به طور وسیعی برای انتقال آبهای سردخانگی، آبهای هرزه و آب باران استفاده می شوند. اتصالات مربوطه با توجه به قطر لوله و شرایط کار متغیر می باشد [۴۱].

- لوله های مدفون شده^۳: لوله هایی که در زیر خاک مدفون شده اند، باید هم قسمت داخلی و هم قسمت بیرونی آن نسبت به خوردگی مقاوم باشد. خاک های سبک شنی^۴، رسوبات یا گچ معمولاً اثر قابل ملاحظه ای بر لوله ها نداشته، اما خاکی که حاوی مقدار زیادی شلاکه^۵ باشد (مانند خاک رس با سولفات بالا) استثنائاً خورنده است. شرایط اخیر، محیط مناسبی

^۱ Internally clad tube

^۲ Polythene

^۳ Buried pipes

^۴ Light sandy soil

^۵ Cinders

را برای رشد باکتری‌های احیا کننده سولفات فراهم کرده، که در شرایط غیرهوازی، سولفاتهای موجود در خاک را به سولفید هیدروژن احیاء کرده و سبب خوردگی شدیدی، مخصوصاً بر روی فولادها، می‌گردد. اعتقاد بر این است که آلومینیم مستعد به این نوع خوردگی نبوده، اما مس یا فولاد گالوانیزه شدیداً توسط شلاکه‌ها و خاکسترها خورده می‌شوند. نمکزارهای مرطوب، اگرچه اثر ناچیزی بر مس و سرب داشته (بر روی سرب کمی بیشتر)، ولی سبب خوردگی شدید فولاد گالوانیزه یا آلومینیم می‌گردد. ضمناً این مواد در بعضی از انواع خاک رس به شدت خورده می‌شوند که احتمالاً از مس می‌توان به تنهایی و بدون پوشش در چنین محیط‌های استفاده کرد.

وقتی لوله‌ها یا ستون‌هایی از جنس فلزات آهنی در زمین دفن می‌شوند، تقریباً در تمام موارد بهتر است که از پوشش نیز استفاده شود. هرچند که این پوشش از یک غوطه‌وری ساده در محلول غیر^۱ ایجاد شده باشد. با وجود این، از خاک خورنده بود یا جزء مورد نظر حیاتی و غیرقابل تعویض باشد از پوشش‌های مقاوم‌تری باید استفاده شود و ملاحظات نیز باید برای به کارگیری حفاظت کاتدی اعمال شود. پوشش به کار رفته می‌تواند یک نوع اپوکسی یا گاهی اوقات چیزی شبیه به آن یا یک پوشش پلاستیکی باشد که بر روی دیواره لوله پیچانده و یا کشیده می‌شود [۳۹].

لوله یا سازه‌های گالوانیزه در خاک بهتر از فولاد معمولی عمل کرده و نسبت به خوردگی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. البته این مطلب زمانی درست است که خاک دارای

^۱ Bituminous

PH بیشتر ۹/۴ و کمتر از ۲/۶ نباشد. عبارت فوق در شرایطی است که خاکهایی به مقدار کمی هوادهی شده‌اند برای روی خورنده بوده، اگر چه لزومی ندارد که سبب خوردگی حفره‌ای شوند. با وجود این، خاکهای هوادهی شده و حاوی غلظتهای بالای یون کلر و سولفات، سبب حفره دار شدن می‌گردند. آهن لخت که در خاکهایی که به خوبی هوادهی شده‌اند و دارای نمک‌های قابل حل کمی می‌باشند یا در خاکهایی که به طور ناچیزی هوادهی شده‌اند با سرعتی ۵ برابر روی خورده می‌شود و اگر خاک قلیایی‌تر و شامل نمک‌های قابل حل بیشتری باشد، سرعت خوردگی باز هم بیشتر خواهد شد؛ صرفاً در خاکهایی با سولفید بالا، آهن با سرعت کمتری نسبت به روی خورده می‌شود [۳۷].

- گچ و بتن: لوله‌های خانگی حامل آب اغلب در تماس با گچ و بتن می‌باشند. مس در کنار موادی نظیر سیمان، مکلات و بتن که شرایط قلیایی ایجاد می‌کنند تحت تأثیر قرار نگرفته، اما در تماس اکسی کلرید منیزیم^۱ مورد مصرف در بام‌ها یا مواد سریع سخت شونده^۲ نظیر سیمان کینز^۳ که اسیدی می‌باشد، می‌بایست محافظت شود. مواد حاوی آمونیاک سبب ترک‌دار شدن لوله‌های برنجی یا مسی در نواحی خم لوله‌ها یا دیگر مناطق تحت تنش می‌گردد. برخی از سیمان‌های لاتکس مورد مصرف در بام‌ها نیز در این گروه قرار گرفته و از تماس لوله‌های برنجی با آنها باید جلوگیری شود. سرب تحت تأثیر آهک قرار نگرفته، اما باید در مقابل ملات سیمان تازه و بتن محافظت شود. به این صورت که یا توسط موادی پوشانده شود یا اطراف سرب ملات کهنه و فشرده و دیگر مواد خنثی قرار گیرد.

^۱ Magnesium oxychloride

^۲ Quick – Setting

^۳ Keens cement

پوششهای گالوانیزه معمولاً در مقابل آهک یا ملات‌های سیمان آسیب‌پذیر نبوده، آمونیوم حتی پس از سفت شدن بتن مرطوب یا گچ نیز مستعد به خوردگی می‌باشد [۴۲].

۱-۵-۳-۱۶- مواد مورد استفاده در ساخت مخازن آب

- مخازن مسی آب داغ (گرم): این مخازن معمولاً به صورت استوانه‌ای با سر و ته مدور و گنبدی شکل ساخته می‌شوند؛ زیرا می‌توان از ورقه‌هایی با ضخامت کم (نازک) مخازن محکمی تولید کرد. این مخازن معمولاً به جز در برخی موارد که در درزها نشتی‌هایی مشاهده شده است دارای مشکلی نمی‌باشند. لبه‌های این درزها بر روی یکدیگر قرار گرفته و سپس زرد جوش^۱ می‌شوند. برنجهای به کار رفته در زردجوش حاوی ۵۰-۴۰٪ روی می‌باشد که اغلب عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد. اما برخی از آنها مستعد به خوردگی انتخابی روی (زدایش روی) می‌باشند. از وقوع زدایش روی که اکثر آذر آبهای اسیدی یا آبهای حاوی یون کلر بالا روی می‌دهد می‌توان با جایگزینی و تعویض برنجهای زردجوش با آلیاژی نظیر (Cu-۱۴Ag-۵p) پیشگیری کرد. این آلیاژ گران‌تر بوده، اما نسبتاً انعطاف‌پذیر می‌باشد و اگر در ابعاد ظریف و باریک به کار رود بسیار اقتصادی خواهد بود. در آبهایی که در آن مخازن مسی در معرض خوردگی حفره‌ای قرار دارند بهتر است از میله آلومینیمی در مخزن استفاده شود. این میله به صورت فداشونده در چند ماه ابتدای کار خورده شده و در طول این مدت فرصت تشکیل لایه محافظ را بر روی سطح مس ایجاد می‌کند [۳۷].

^۱ Brazed

– مخازن فولادی گالوانیزه آب داغ (گرم):

این مخازن به هردو صورت استوانه‌ای یا مستطیلی وجود داشته، که از مخازن مستطیلی در مکانهایی که محدود فضا وجود دارد، استفاده می‌شود.

مخازن فولادی گالوانیزه آب داغ، به همراه لوله‌های دوار گالوانیزه و دیگ‌های بخار چدنی، در آبهای سخت یا نسبتاً سخت، معمولاً بدون اشغال بوده، اما گاهی اوقات زوال، به دلیل حفره‌دار شدن اتفاق می‌افتد. در برخی موارد، این مسأله مربوط به عوامل خارجی زایدی است که در هنگام نصب، وارد مخزن شده‌اند. ذرات آهن ناشی از سوهان زدن یا رسوبات مواد خنثی در کف مخزن از مواردی هستند که در فرآیند تشکیل پیوسته محافظ توسط آب اختلال ایجاد کرده و می‌توانند سبب وقوع شکست در مخزن شوند.

یکی دیگر از مواردی که سبب ایجاد اشکال در سیستم می‌شود بیش از حد گرم شدن^۱ مخزن می‌باشد. این مسأله به خصوص در مواردی که از تانک برای مدت‌زمان زیادی استفاده شده است، رخ می‌دهد. در بالاتر از دمای 70°C عمل معکوس شدن قطبیت اتفاق افتاده و روی نسبت به آهن حالت کاتدی پیدا خواهد کرد. بالاتر از این درجه حرارت، آهن حفاظت نمی‌شود. کاهش درجه حرارت به اندازه $5-10^{\circ}\text{C}$ می‌تواند سبب افزایش عمر مخزن گردد. دیده شده است که گرم‌کننده‌های غوطه‌ور شده با ظرفیت بالا^۲ که به صورت منقطع کار می‌کنند بهتر از گرم‌کننده‌های با ظرفیت پایینی است که به صورت پیوسته عمل می‌کنند. این نوع گرم‌کننده‌ها سبب افزایش عمر مخزن نیز می‌شوند.

^۱ Over heating

^۲ Large – capacity immersion heater

آندهای منیزیمی معلق در داخل یک مخزن گالوانیزه آب داغ که در تماس الکتریکی با مخزن هستند سبب حفاظت کاتدی، لایه آلیاژی و فولاد در درجه حرارت‌های بالا و پایین می‌گردند. منیزیم مصرف می‌شود، اما با تشکیل پوسته محافظ و خوب برروی سطوح داخل مخزن دیگر ضرورتی جهت استفاده از آن منیزیم وجود ندارد. با وجود این، یکی از مشکلات این روش مخصوصاً در آبهای با هدایت کم، حفظ توزیع یکنواخت جریان در داخل مخزن است که بتواند تمامی سطح را به طور یکنواخت محافظت کند. بنابراین بعید به نظر می‌آید این روش در آبهای نرم قابل استفاده باشد [۴۱].

– مخازن نگهداری آب سرد:

معمولاً مخازن خانگی آبهای سرد از فولاد گالوانیزه ساخته می‌شود. همانگونه که در مبحث مخازن آب گرم ذکر شد، باید از ورود ذرات ریز فلزی ناشی از سوهان زدن و اشیاء زائد به درون مخزن، مخزن مورد نظر به وسیله ماده‌ای پوشانیده شود. در اکثر آبها، مخازن گالوانیزه آب سرد عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد، به این صورت که وقتی پوشش روی از آهن محافظت می‌کنند، پوسته محافظی برروی سطح مخزن شکل می‌گیرد. با وجود این در آبهای بسیار نرم یا در آبهای حاوی دی‌اکسیدکربن آزاد بالا، تشکیل پوسته بسیار سخت بوده و از این جهت ممکن است مشکلاتی ایجاد کند. مخازن فولادی و فولاد گالوانیزه برای استفاده در چنین آبهایی می‌توانند با پوششهایی نظیر رنگهای قیری، یا پلاستیکی‌های

تقویت شده^۱ پوشانیده شوند. برای مخازن بزرگ ذخیره کننده آب سرد از مقاطع فولادی یا مخازن چدنی با پوشش‌هایی نظیر پوشش‌های قیری که به شکل سرد یا گرم اعمال شده باشد یا رنگهای قیری استفاده می‌شود. با وجود این، اطمینان از عدم وجود پوسته‌های اکسیدی، آلودگی... پیش از به کارگیری پوشش محافظ، بسیار حائز اهمیت است. از فولادهای زنگ‌زن در این موارد نیز می‌توان استفاده کرد.

مخازن آب سرد از جنس پلی‌تن یا GRP مخصوصاً در اندازه‌های مصارف خانگی وجود دارند که هم اکنون از آنها اغلب در مصارف خانگی استفاده می‌شود [۴۲].

۲-۵-۳-۱۶- اتصالات آبی^۲

اتصالات برنجی در تماس با آب هیچگونه مشکلی ایجاد نکرده، جز اینکه در آبهای اسیدی یا آبهای حاوی یون کلر بالا (به خصوص اگر آب داغ باشد) مشکل خوردگی انتخابی روی (زدایش رویی) را خواهیم داشت. علائم سه‌گانه این پدیده عبارتند از: اولاً تبدیل برنج به مس متخلخل که سبب نشتی آب از اتصالات مربوطه می‌گردد. ثانیاً روی حاصله و حل شده از برنج، تشکیل محصولات بسیار سخت و پرحجم ناشی از خوردگی داده و سبب مسدود شدن مسیر آب می‌گردد. این مورد غالباً در آبهای نرم و داغ به وقوع می‌پیوندد. ثالثاً مهمترین مورد این است که خواص مکانیکی برنج شدیداً افت پیدا می‌کند؛ به عنوان نمونه می‌توان به تخریب یک اتصال پیچ شده برنجی در هنگام بازکردن پیچ و یا خوردگی سایشی یک نوار زدایش روی شده یا نشیمنگاه شیر ساچمه‌ای توسط آب اشاره کرد.

^۱ Reinforced plastics

^۲ Water fittings

معمولاً اتصالات برنجی در تماس با آب در گذشته از برنج دوفازی بود که تحت تنش نیز قرار داشته‌اند. متأسفانه این ماده نسبت به پدیده زدایش روی در برخی آبها آسیب‌پذیر می‌باشد. در مناطقی که اتصالات با فشار جاسازی می‌شدند (تحت فشار قرار می‌گرفتند) شدت آسیب‌پذیری بیشتر بود. بنابراین امروز اتصالات را از جنس برنجهای تک فازی حاوی ۳/۰٪ آرسنیک یا آلیاژهای دیگری که به زدایش روی حساس نیستند تهیه می‌کنند.

امروزه اتصالات و متعلقات پلاستیکی از نوارها گرفته تا مخازن دستشویی معمولاً در مصارف خانگی، مخصوصاً در مکانهایی که عمل کندانسه شدن سبب محصولات خوردگی بدمنظره و ناخوشایندی گردد، جایگزین نوع فلزی آنها شده‌اند [۴۳].

فصل هفدهم

مطالعات موردی

مورد ۱۰۱۰۱

صنعت : مواد غذایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سیستم خنک کننده یکبارگذر

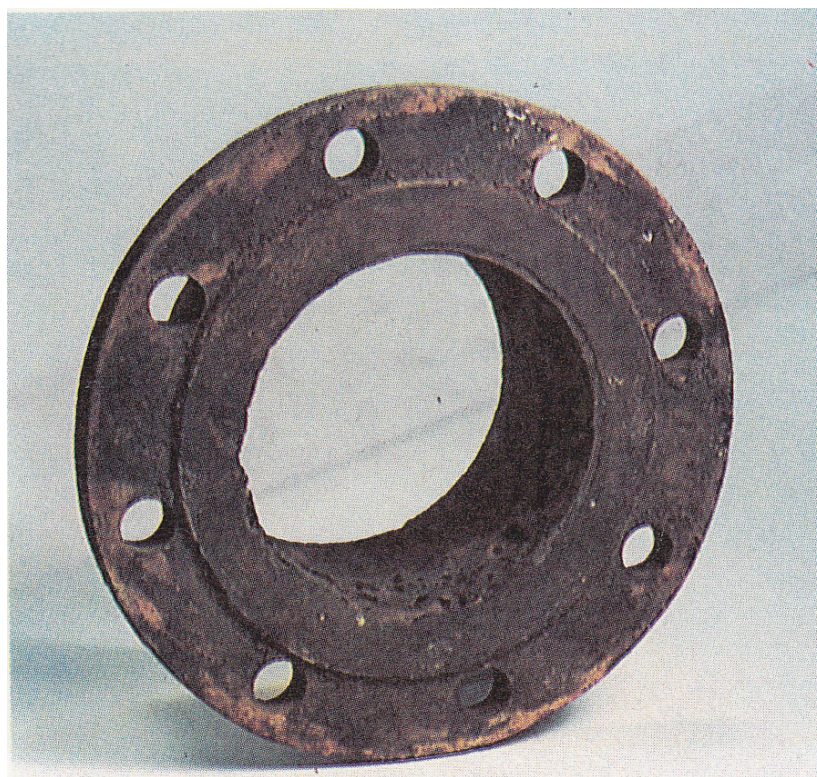
قسمت : فلانچ خط انتقال

پدیده : خوردگی میکروبی

مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی شدیدی روی نمونه صورت گرفته است .

محیط : آب چاه که میزان سولفات . فسفات آمونیم مواد آلی و اکسیژن آن زیاد است .



علت پدیده : در زیر رسوبات . باکتریهای غیر هوازی احیاء کننده سولفات (SRB) با تبدیل سولفات به

سولفید . پدیده خوردگی را تشدید می کنند (سولفید در محصولات خوردگی قابل تشخیص است) .

روش اصلاح : با توجه به اینکه شستشوی شیمیایی لوله ها سبب ایجاد SH_2 می شود و این گاز می تواند

در یک کارخانه مواد غذایی مشکل ساز و زیان آور باشد . شستشوی شیمیایی آن توصیه نمی شود . بلکه

بهتر است مداوای شیمیایی آن بهبود یافته و یا از لوله های پلاستیکی برای انتقال آب استفاده شود .

مورد ۱۰۱۰۲

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : آب خنک کننده مدار باز

قسمت: کوپن خوردگی

مدت کار کرد : ۲ ماه

پدیده: خوردگی میکروبی

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای با عمق کم روی نمونه کوپن صورت گرفته است که به شکل پولک در آمده است .

محیط : آب خنک کننده با شرایط شیمیایی $PH = 8.5 - 9$ ، هدایت 200 mS/m ، غلظت کلرور در محیط 200 ppm سولفات 250 ppm ، سختی کلسیم $400 - 480 \text{ ppm}$ (CaCO_3) و حاوی بازدارنده آلی ،



علت پدیده : رشد باکتریهای احیاء کننده سولفات (SRB) در زیر رسوبات سبب می شود که فولاد توسط سولفید ایجاد شده از باکتری مورد حمله خوردگی قرار گیرد . وجود باکتری DRB توسط آزمایش API تایید شده است . همچنین تشکیل سولفید آهن سیاه رنگ حاکی از وجود SRB است .
روش اصلاح : تزریق مداوم مواد میکروب کش نظیر گاز کلر و همچنین مواد پخش کننده رسوب می تواند از این مشکل جلوگیری کند .

مورد ۱۰۱۰۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد غیر آلیاژی (unalloyed steel)

سیستم : برج جذب CO_2

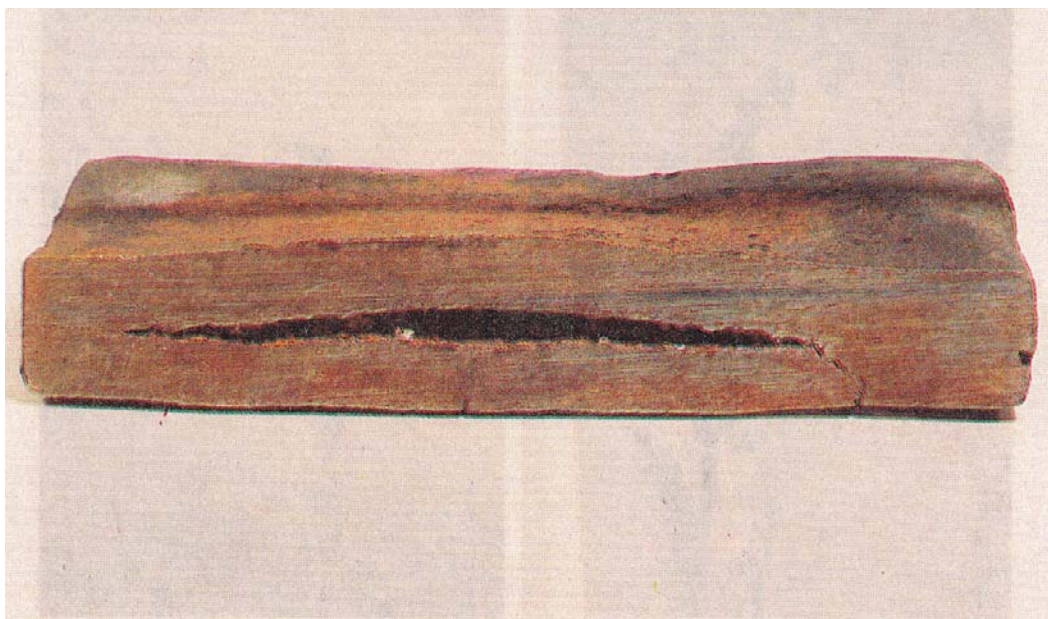
قسمت : دیواره برج

پدیده : حمله هیدروژن سرد

مدت کارکرد: چند سال

ظاهر نمونه : حفره هایی (cavities) در فولاد ایجاد شده است .

محیط : آب حاوی CO_2



علت پدیده : هیدروژن اتمی می تواند به داخل فولاد نفوذ کند در داخل فولاد هیدروژن اتمی به هیدروژن

H_2 تبدیل می شود . فشار ایجاد شده سبب زوال فولاد می شود .

روش اصلاح : تغییر فرآیند سیستم (در صورت امکان) و یا استفاده از آلیاژ بهتر (فولاد خالص تر) .

مورد ۱۰۱۰۴

صنعت : دیگ بخار کارخانه

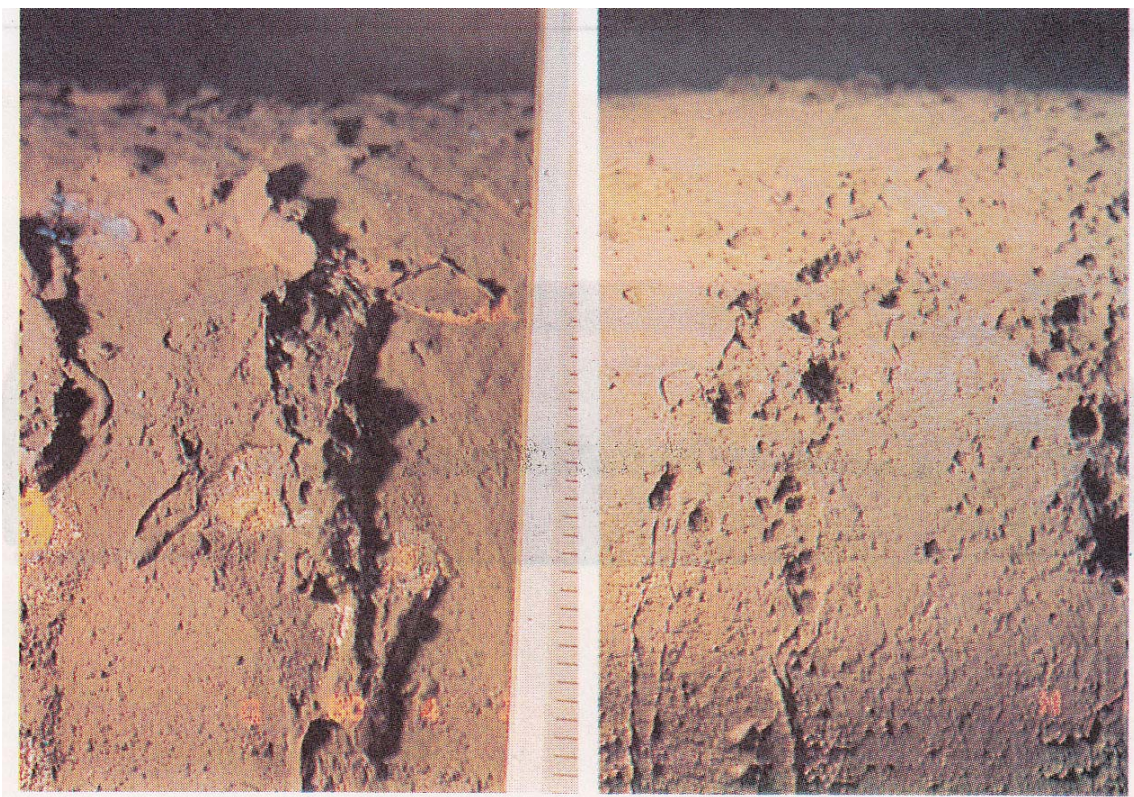
جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دیگ بخار (با فشار ۱۲ بار) قسمت : لوله

پدیده : خوردگی اکسیژن مدت کار کرد : ۱۳ سال

ظاهر نمونه : حفره ها همواره با تاولهایی روی نمونه به قطر حدود ۲mm .

محیط : آب دیگ بخار با شرایط شیمیایی نا مطلوب .



علت پدیده : عدم استفاده از مواد اکسیژن گیر ، و همچنین استفاده نکردن از دستگاه هوازدا سبب

خوردگی اکسیژن شده است .

روش اصلاح : استفاده از مواد جاذب اکسیژن نظیر سولفیت و بهبود کیفیت آب .

مورد ۱۰۱۰۵

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دیگ بخار

قسمت : لوله های دیگ بخار (دیواره پشتی)

پدیده : خوردگی قلیائی (تردی قلیائی) مدت کار کرد: ۶ سال

ظاهر نمونه : صدمات متعدد قلیائی روی لوله های دیواره پشتی سیکلون فایر دیگ بخار قابل مشاهده

است لایه های سخت سیاه رنگ بلورین از محصولات خوردگی در ناحیه صدمه دیده وجود دارد .

محیط : آب دیگ که با روش هماهنگ فسفات PH/ کنترل شده است . فشار دیگ بخار ۱۵۰۰ Psi .



علت پدیده : آزمایشات ریز ساختاری نشان دهنده گرمای بیش حد به صورت ملایم در ناحیه صدمه دیده

می باشد . علت صدمه قلیائی مربوط به تشکیل و پدیده دی پارچرنوکلئیت بویلینگ است .

روش اصلاح : با کنترل شیمیایی آب دیگ بخار و پایین نگهداشتن مقدار سود در آب بویلر و همچنین

کاهش اثرات گرمایی (بیش از حد گرم شدن) می توان از این مشکل جلوگیری نمود .

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دیگ بخار شکننده کاتالیزوری (Catalytic Cracker)

قسمت : لوله سرد کننده کوئینچ

پدیده : خوردگی ناشی از قلیائیت بالا مدت کار کرد : نا معین

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواختی همراه با ترک روی قطعه صورت گرفته است .

محیط : در اطراف لوله ها ، آب قلیایی دیگ بخار موجود است . گازهای حاصل از کراکینگ با دمای

$^{\circ}\text{C}$ ۹۰۰-۴۰۰ از داخل لوله ها عبور می کند .



علت پدیده : به علت نامناسب بودن درمان آب ، رسوباتی روی لوله ها تشکیل می شود . در زیر این

رسوبات آب دیگ بخار تغلیظ شده که نهایتاً قلیائیت به طور موضعی بالا می رود . افزایش قلیائیت سبب

خوردگی قلیایی می شود و فولاد در pH بالا حل می شود .

روش اصلاح : با بهبود درمان شیمیایی آب دیگ بخار و کنترل مداوم آن می توان از بروز چنین مشکلی

جلوگیری نمود .

مورد ۱۰۱۰۷

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : آب خنک کننده یک بار گذر

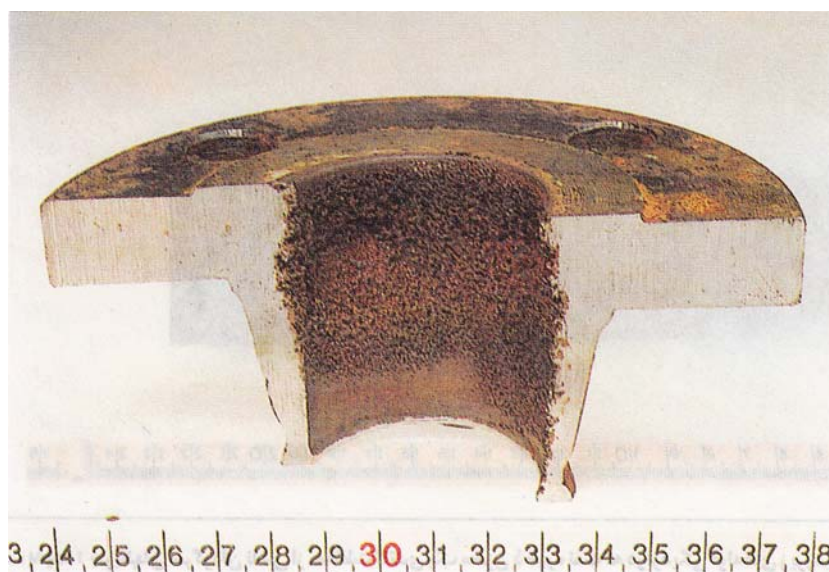
قسمت : لبه پایینی شیر کنترل

پدیده : حفره دار شدن (Cavitation)

مدت کارکرد: ۲ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای موضعی در قطعه صورت گرفته است .

محیط : آب رودخانه با ماکزیمم دمای 40°C .



علت پدیده : سرعت قطع و وصل شیر کنترل زیاد و زمانی که شیر به سرعت بسته می شود خلاء در

قسمت پایین دست جریان شیر ایجاد می شود . خلاء ایجاد شده سبب ضربه زدن آب می شود .

روش اصلاح : اگر شیر کنترل آهسته تر بسته شود . به این معنی که یک صفحه تنظیم کننده در خط هوای

فشرده به شیر کنترل وصل شود و یا یک موتور کنترل کننده به شیر متصل شود ، مشکل برطرف خواهد

شد .

مورد ۱۰۱۰۸

صنعت : آب و فاضلاب (لوله کشی آب شهری)

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : لوله زیرزمینی

سیستم : لوله آب گرم

مدت کارکرد: نامعین

پدیده : خوردگی جریان سرگردان

ظاهر نمونه : حملات شدیدی در برخی قسمتهای لوله صورت گرفته است .

محیط : آب زیرزمینی



علت پدیده : جریانهای سرگردان ناشی از حفاظت کاتدی یک مخزن ذخیره نفت که در نزدیکی لوله های زیرزمینی قرار دارند . سبب می شود که در قسمتهایی که این جریانها ، خط لوله زیرزمینی را ترک می کنند خوردگی صورت پذیرد .

روش اصلاح : بایستی به نحو مطلوب با اتصال سیم مسی به مخزن ذخیره ، جریانهای سرگردان را تخلیه نمود . ضمناً می توان با وارد نمودن یک مقاومت از ایجاد جریان اضافی در مخزن جلوگیری نمود . استفاده از حفاظت کاتدی نیز برای حفاظت لوله ها مفید می باشد.

مورد ۱۰۱۰۹

صنعت: تصفیه آب

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : لوله ها

سیستم : آب سرد شهری

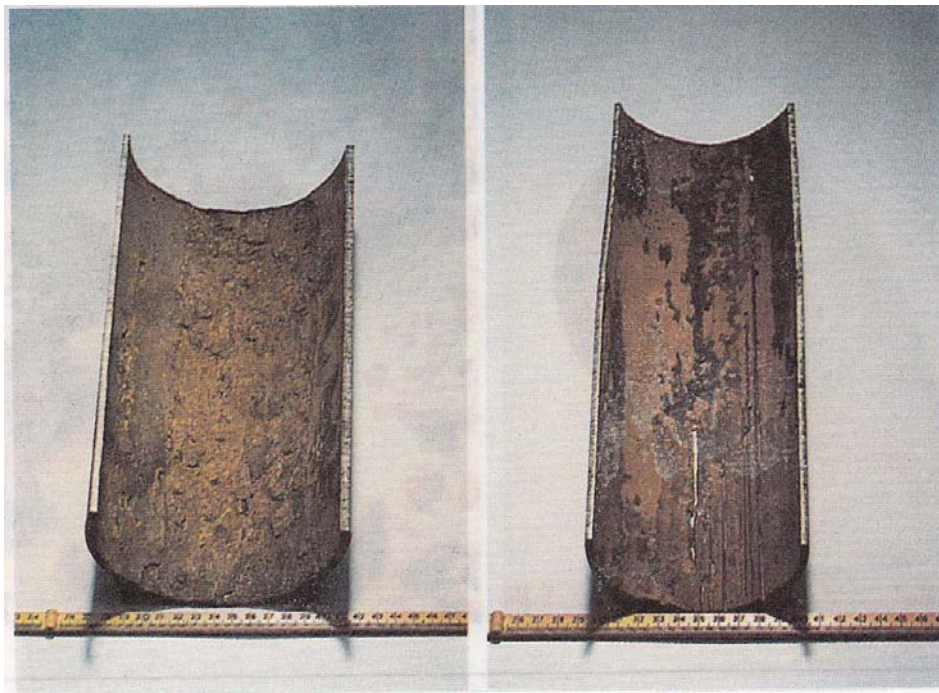
مدت کارکرد : تقریباً ۵ سال

پدیده : خوردگی ناشی از اسیدکربنیک

ظاهر نمونه : خوردگی شدیدی در نواحی وسیعی از نمونه قابل مشاهده است که حاکی از موضعی بودن

خوردگی می باشد .

محیط : آب خورنده چاه می باشد که هوازدایی و تصفیه نشده است . درجه حرارت آب 15°C است .



علت پدیده : دی اکسید کربن موجود در آب ، خوردگی شدیدی بر روی فولاد دارد .

روش اصلاح : بهتر است لوله از جنس پلاستیک و یا فولاد پوشش داده شده باشد .

مورد ۱۰۱۰۱۰

صنعت : تصفیه آب

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : لوله ها

سیستم : آب گرم خانگی

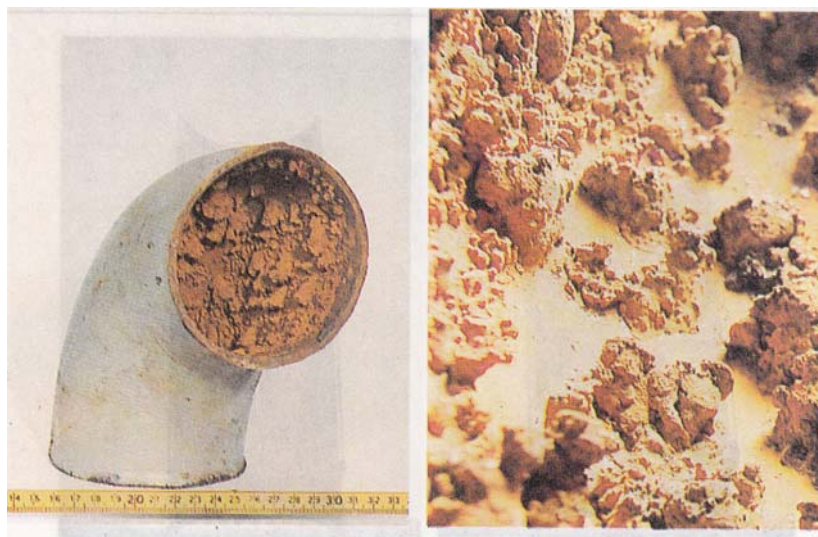
مدت کارکرد : یک سال و نیم

پدیده : حمله اکسیژن

ظاهر نمونه : نشت رسوبات مگنتیت در روی شیر

محیط : آب چاه حاوی اکسیژن زیاد . با شرایط بی کربنات (HCO_3^-) با غلظت (20 ppm CaCO_3)

و دمای حدود 45°C .



علت پدیده : دلیل پایین بودن قلیائیت (سختی بی کربناتی) ، آب مورد نظر قادر نیست تا رسوب محافظ

کربنات کلسیم را در روی سطح ایجاد نماید . ضمن آنکه مقدار اکسیژن بالا در سیستم سبب تشدید

خوردگی می شود . مقدار حداقل قلیائیت و کلسیم آب بایستی به ترتیب 100 mg/lit و 50 mg/lit باشد تا

رسوب محافظ کربنات کلسیم در روی سطح لوله های آب تشکیل شود .

روش اصلاح : اگر انتخاب مواد اولیه به صورت صحیح انجام شود . این مشکلات مرتفع می شود . باید

لوله های آب از جنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶ یا پلاستیک انتخاب شوند .

مورد ۱۰۱۰۱۱

صنعت : دیگ بخار کارخانه

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دیگ بخار با فشار ۱۲ بار قسمت : لوله دود (Smoke tube)

پدیده : خوردگی اسیدی

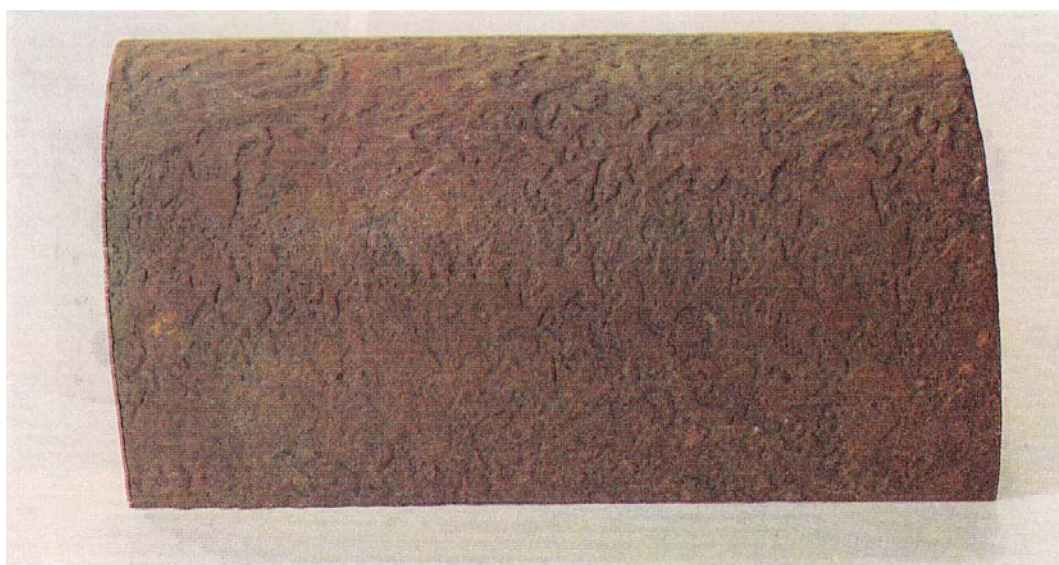
مدت کارکرد : در مدت زمان ۳ ساعت خوردگی رخ داده است .

ظاهر نمونه: خوردگی شیاری روی سطح داخلی قطعه صورت گرفته است .

محیط: به منظور حذف اکسید آنه و رسوبات سخت چسبیده موجود در داخل لوله های دیگ بخار ،

عملیات اسید شویی انجام گرفت . محلول اسید شویی حاوی باز دارنده و ۹/۵٪ HCl ، (در درجه حرارت

۹۵ °C)



علت پدیده : اگر تمیز کاری شیمیایی تحت کنترل نباشد ، یعنی هر گونه عدم انتخاب بازدارنده مناسب یا

کمبود آن ، مدت زمان بیش از حد ضرورت ، افزایش بیش از حد درجه حرارت و یا غلظت نامناسب اسید

سبب خوردگی شدید می شود .

روش اصلاح : لوله های آسیب دیده باید تعویض و جایگزین شوند .

مورد ۱۰۱۰۱۲

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : لوله های گرم کننده هوا

سیستم : کندانسور بخاری

مدت کارکرد: ۸ سال

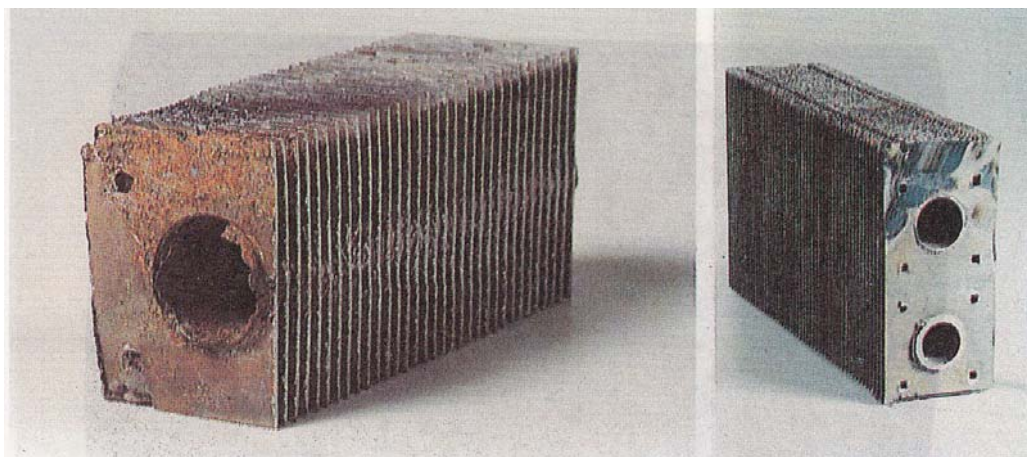
پدیده : خوردگی سایشی

ظاهر نمونه : حمله به صورت ترجیحی به یکی از لوله ها صورت گرفته است . این حمله به صورت

یکنواخت روی تمام سطح و تا ابتدای ۲۰Cm لوله واقع شده است .

محیط: بخار چگالش یافته ، میزان خوردگی به علت استفاده از آب مقطر هوازدایی شده نسبتاً کم است .

دما حدود 130°C است .



علت پدیده : بالا بودن سرعت سیال بخار و همچنین چگالش آن ، سبب خوردگی سایشی می شود .

روش اصلاح : با بهبود در سیستم توزیع بخار و همچنین تخلیه آب های ایجاد شده از بخار در مقاطع

صحیح ، از این پدیده جلوگیری می نمایند .

مورد ۱۰۱۰۱۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : کارخانه آلکلی کردن اسید هیدروفلوریک

قسمت : دیواره

پدیده : حمله هیدروژنی سرد

مدت کارکرد: ۱۰ سال

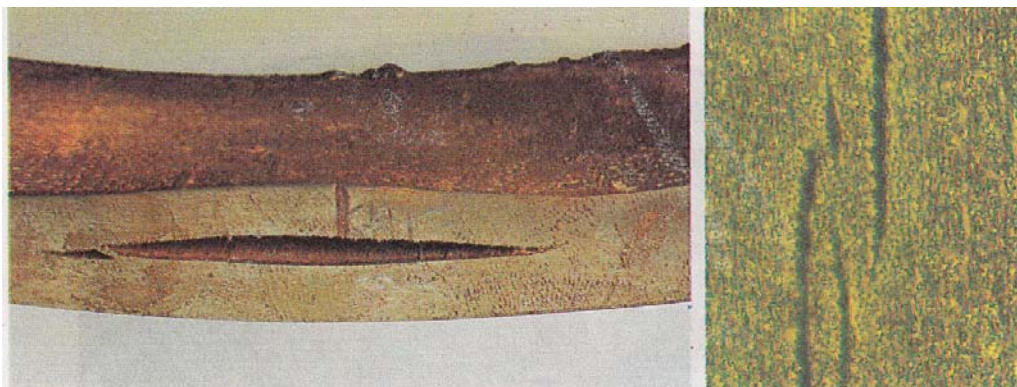
ظاهر نمونه : تاولهایی (Blistering) روی نمونه قابل مشاهده است .

محیط : محیط شامل هیدروکربنها و بخارات اسید فلوریدریک و دما حدود 60°C است .

علت پدیده : اتم های هیدروژن توسط خوردگی الکترو شیمیایی اسید آزاد می شوند . اتمهای هیدروژن با

نفوذ به داخل فولاد و تشکیل مولکول هیدروژن سبب افزایش فشار داخلی شده و نهایتاً سبب زوال و

شکست فلز می شوند .



روش اصلاح : با بکار بردن آلیاژ بهتر مشکل برطرف می شود .

مورد ۱۰۱۰۱۴

صنعت : نفت (سکوی دریایی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : Ballast

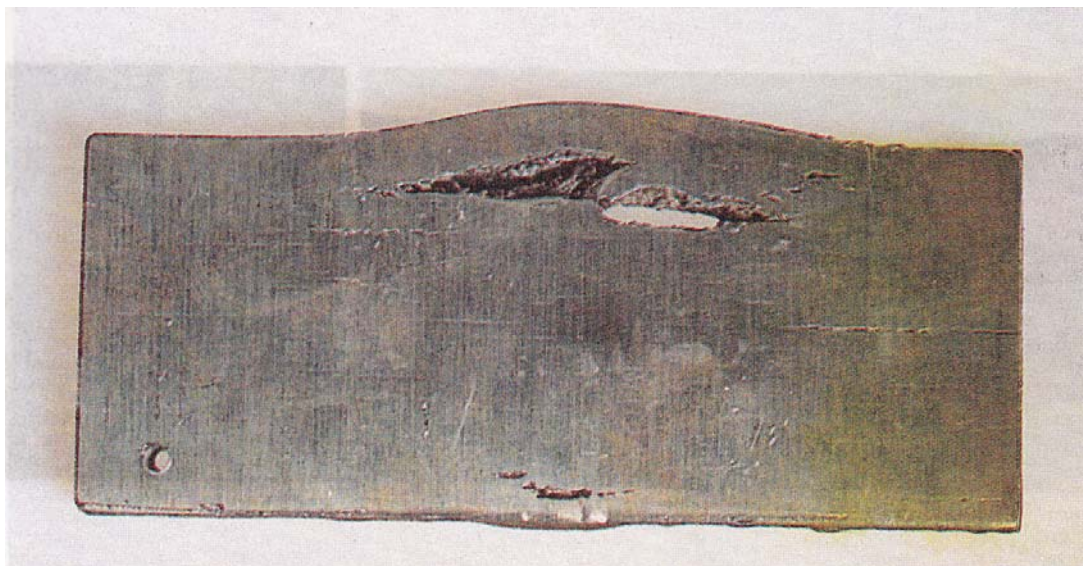
سیستم : استخراج نفت و گاز

مدت کارکرد: ۲ سال

پدیده : حمله هیدروژن داغ (کربن ردائی)

ظاهر نمونه : تاو لهایی روی نمونه قابل مشاهده است .

محیط : محیط شامل نفت (بنزین) و گاز هیدروژن بوده و دما حدود 50°C است .



علت پدیده : اتم های هیدروژن در فلز نفوذ می کند و در آنجا تشکیل متان می دهد یعنی با کربن ناشی از

کاربیدهای ناپایدار وارد واکنش می شود . فشار حاصل سبب ترک برداشتن و زوال فلز می شود .

روش اصلاح : با بکار بردن فولاد کم آلیاژ (مقاوم در برابر هیدروژن) این مشکل مرتفع می شود .

(Low – alloyed steel)

مورد ۱۰۱۰۱۵

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دستگاه حذف گوگرد

قسمت : لوله ۶ اینچی ورودی به کوره

پدیده : حمله هیدروژن داغ

مدت کارکرد : ۶ سال

ظاهر نمونه : ترکهایی در کنار نواحی جوش بوجود آمده است .

محیط : محیط شامل هیدروکربونها و هیدروژن است ، دما حدود 300°C است . فشار جزیی هیدروژن

۲۵-۳۰ بار است .



علت پدیده : تکانهای بیجا در نقاط تزریق هیدروژن سبب این مشکل می شود و این امر سبب می شود که

سیستم لوله فولاد کربنی در معرض هیدروژن داغ قرار گیرد و در نتیجه ناحیه متأثر از جو

(heat-affected zone) به صورت ترجیحی خورده شود .

روش اصلاح : استفاده از مواد مقاوم در مقابل هیدروژن مانند فولاد کم آلیاژ شامل Cr و Mo

(Low – alloyed Cr – Mo steel)

مورد ۱۰۱۰۱۶

صنعت: برق (سیکل ترکیبی)

جنس نمونه: فولاد کربنی

قسمت: لوله متصل به پیش گرمکن

سیستم: سیکل ترکیبی (دود خروجی از توربین گاز، سبب گرم شدن لوله های یک بویلر می شود)

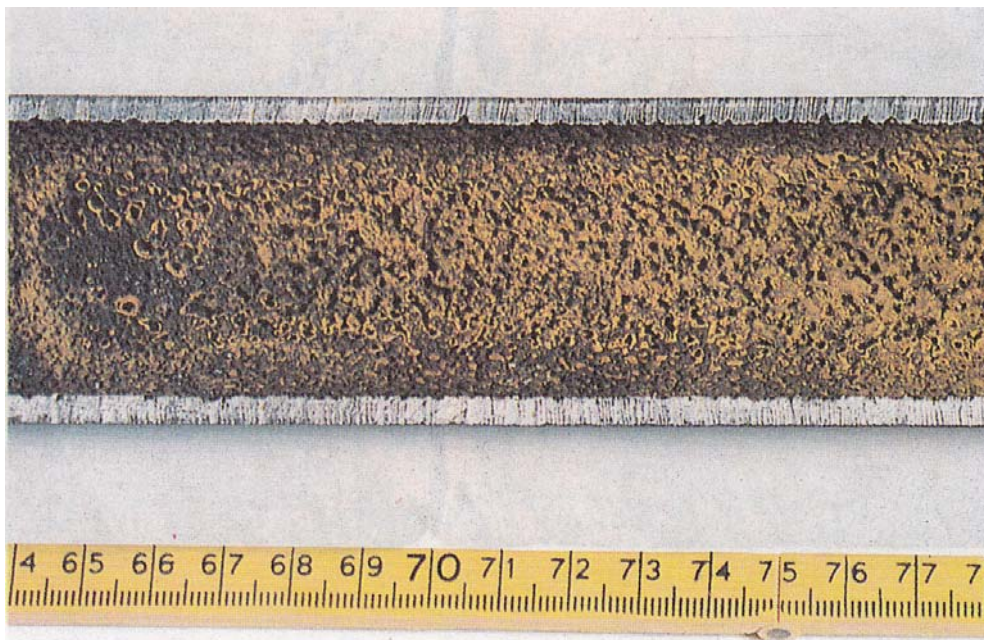
پدیده: حفره دار شدن (cavitation)

مدت کارکرد: حدود ۳ سال

ظاهر نمونه: حفره هایی روی نمونه بوجود آمده است.

محیط: آب تغذیه دیگ بخار حاوی اکسیژن و اسید کربنیک می باشد. دما از حدود 60°C به 141°C

تغییر می کند.



علت پدیده: باز و بسته شدن غیر صحیح شیر کنترل سبب ایجاد خلاء در پیش گرمکن ها (preheater)

می شود. این امر سبب ایجاد تلاطم در بخار شده و نهایتاً سبب حفره دار شدن لوله ها می شود.

روش اصلاح: با قرار دادن شیرهای کنترل در خط تخلیه می توان از تشکیل خلاء جلوگیری نمود و مشکل

حفره دار شدن را بر طرف کرد.

مورد ۱۰۱۰۱۷

صنعت : نفت (پالایشگاه)

جنس نمونه : پیچ ها از جنس فولاد کربنی و صفحه از جنس فولاد آلیاژی ۱۲٪ گرم است .

سیستم : ستون تقطیر

قسمت : گیره ی سینی ستون تقطیر

پدیده : خوردگی گالوانیک

مدت کارکرد: نا معلوم

ظاهر نمونه : حملات خوردگی شدیدی در کل سطح پیچ و مهره صورت گرفته است .

محیط : هیدروکربن هایی که با مقدار نا چیزی از نمکها آلوده شده اند .



علت پدیده: وجود دو فولاد مختلف (از لحاظ ترکیب) و هدایت بالای محیط ، سبب ایجاد خوردگی

گالوانیکی در فولاد فعالتر می شود .

روش اصلاح : اگر پیچها نیز از جنس فولاد ۱۲٪ کرم باشند مشکلی به وجود نخواهد آمد.

مورد ۱۰۱۰۱۸

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربن

قسمت : لوله تخلیه تحتانی

سیستم : ستون تقطیر

مدت کارکرد : ۶ سال

پدیده : خوردگی گوگردی

ظاهر نمونه : ضخامت دیواره لوله به صورت موضعی کاهش یافته و شکست خورده است.

محیط : هیدروکربنها و مواد نفتی گوگردی که از گوگرد موجود در نفت خام بوجود آمده . دمای 390°C

و فشار سیستم برابر ۲۵ بار .



علت پدیده : دیواره به صورت موضعی و به صورت نازک می شود. این امر ناشی از اغتشاش در سیستم

و خوردگی سولفوری سریع یافته است . با تغییر وضعیت سیستم یعنی در دمای بالاتر ، خوردگی سولفور

شدت یافته و در نتیجه زمان کارکرد سیستم به طور قابل توجهی کاهش می یابد . شکست لوله می تواند

منجر به آتش سوزی و تخریب کارخانه شود .

روش اصلاح : بهبود در وضعیت فرآیند (در صورت امکان) ، انتخاب مواد اولیه صحیح می تواند در رفع

مشکل مؤثر باشد . اگر لوله از جنس فولاد ۱۹ Cr Mo ۱۲ ساخته شود . بهتر خواهد بود .

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سیستم آب گرم خانگی (Hot tapwater) قسمت : منطقه لوله ها

پدیده : حمله رسوبی (Deposit attack) مدت کارکرد : ۲/۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی که در نهایت منجر به نشت کردن گردیده است .

محیط : آب شیر که بوسیله دیگ بخار تا 85°C گرم می شود . لوله های دیگ بخار از جنس مس می باشد

که بخار از درون آن عبور می کند ، و بدنه دیگ فولادی می باشد . به منظور کاهش خوردگی بدنه فولادی

با استفاده از آندهای آلومینیم ، سیستم حفاظت کاتدی می شود .



علت پدیده : رسوب هیدرواکسید آلومینیم (تولید شده از آندها) در لوله ها باعث ایجاد خوردگی می گردد .

این رسوب باعث به وجود آمدن پیل اختلاف دمشی می گردد.

روش اصلاح :

- تمیز کردن سیستم و قرار دادن آندهای تیتانیوم پوشش داده شده با پلاتین

(Platinum – coated titanium)

- استفاده از آندهای قربانی شونده آلومینیمی باعث روی زدایی بستهای برنجی و آلودگی آب دیگ بخار

می گردد . همچنین وارد شدن بیش از حد آلومینیم در آب آشامیدنی خطرناک است و برای سلامتی

انسان مضر باشد .

مورد ۱۰۱۰۲۰

صنعت : نفت (پالایشگاه)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : مخزن ذخیره نفت خام

قسمت : صفحه جوش انتهایی مخزن

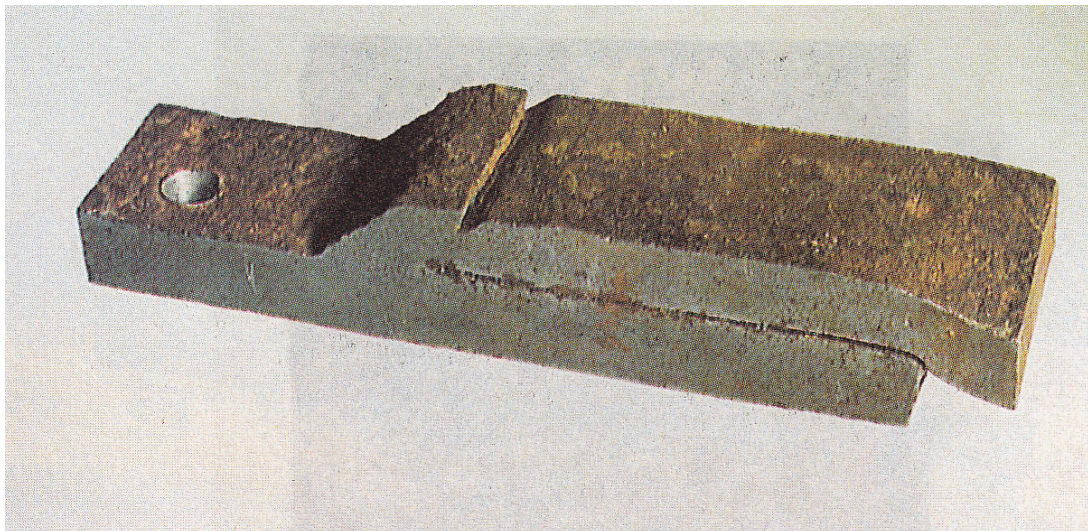
پدیده : پدیده خوردگی توسط آب خورنده

مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : شیارهای تیزی نزدیک مناطق جوش (شبیه خوردگی شیاری چاقویی) در فولاد زنگ نزن

پایدار بوجود آمده است .

محیط : حاوی نفت خام می باشد که ناخالصی آب آن در ته مخزن جمع می شود .



علت پدیده : صفحه جوش انتهایی مخزن توسط آب خورنده خورده می شود ، علت آن این است که جنس

این فلز از فلز اصلی مخزن فعالتر می باشد و لذا سریع تر خورده می شود .

روش اصلاح : با بکار بردن یک پوشش محافظ در قسمت انتهایی مخزن مشکل مرتفع می شود .

مورد ۱۰۱۰۲۱

صنعت : مولد بخار

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : کندانسور بخاری

قسمت : پایه عمودی گرم کننده هوا

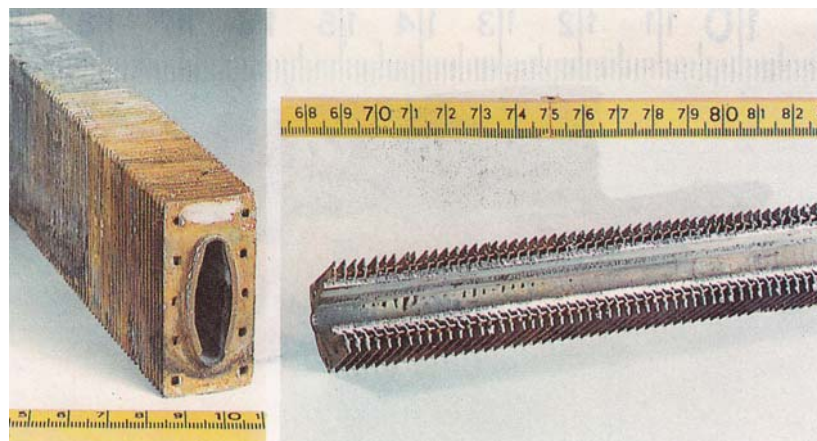
پدیده : خوردگی اسید کربنیک

مدت کارکرد : نا معین

ظاهر نمونه : شیار های یکنواختی در یک سمت نمونه بوجود آمده است .

محیط : آب تغذیه حاوی مقدار زیادی اسید کربنیک است . اسید کربنیک از تجزیه بیکربنات در دیگ بخار

بوجود می آید . دما حدود 100°C است .



علت پدیده : فولاد توسط اسید کربنیک خورده می شود . حمله شیاری در سمتی از قطعه که در معرض

فن است صورت می گیرد . (جایی که بیشترین مقدار بخار به آب تبدیل می شود) .

روش اصلاح : کاهش بی کربنات و کربنات آب تغذیه ، (با توجه به طبیعت کارخانه ممکن است امکان پذیر

نباشد که مواد شیمیایی به بخار اضافه شود) این امر می تواند در رفع مشکل مفید باشد . ضمن آنکه

هواگیری نیز می تواند مفید باشد . همچنین با انتخاب مواد مناسب یعنی با ساختن گرم کن هوا از جنس

فولاد زنگ نزن ۳۰۴ نیز مشکل برطرف می شود .

مورد ۱۰۱۰۲۲

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : کندانسور بخاری

قسمت : لوله افقی کندانسور

پدیده : خوردگی اسید کربنیک

مدت کارکرد : ۱۲ سال

ظاهر نمونه : حمله یکنواختی در سمت پایینی لوله صورت گرفته است .

محیط : آب کندانسه خورندگی دارد. (آب دیگ بخار با جبرانی (make up) تغذیه می شود که

دارای قلیائیت ۲۰۰ mg/lit است ، این آب هوازدایی شده است) . دما $90-100^{\circ}\text{C}$ است



علت پدیده : به دلیل وجود اسید کربنیک در آب کندانسه ، این آب خوردگی شدیدی بر روی لوله های

فولادی دارد .

روش اصلاح : با کاهش قلیائیت آب جبرانی و در نتیجه کاهش مقدار اسید کربنیک مشکل مرتفع می شود .

استفاده از بازدارنده های خوردگی نیز مفید می باشد .

مورد ۱۰۱۰۲۳

صنعت : پالایشگاه نفت

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دیگ بخار

قسمت : لوله برگشتی از کندانسور

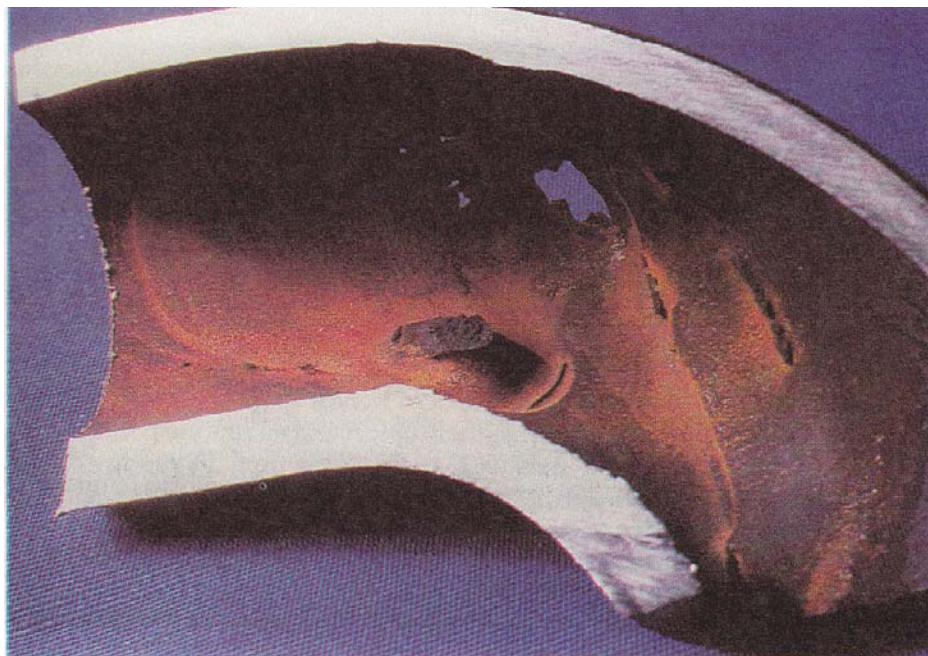
پدیده : سایش

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : سطح داخل لوله از رسوبات قرمز رنگ خوردگی پوشیده شده است . ضمن آنکه در قسمت

خم لوله ها سوراخ ها و زوال بیشتری مشاهده می شود .

محیط : آب دیگ بخار با فسفات و آب تغذیه با هیدرازین مداوا شده است .



علت پدیده : مقدار CO_2 وجود در آب تغذیه بالا می باشد . ولی این نوع زوال مخصوصاً در خم لوله ها که از شکل خاصی برخوردار است مربوط به خوردگی سایشی می باشد که علت آن سرعت بالای سیال است .

روش اصلاح : طراحی صحیح و کاهش سرعت سیال .

مورد ۱۰۱۰۲۴

صنعت: تولید بخار

جنس نمونه: فولاد کربنی

قسمت: لوله

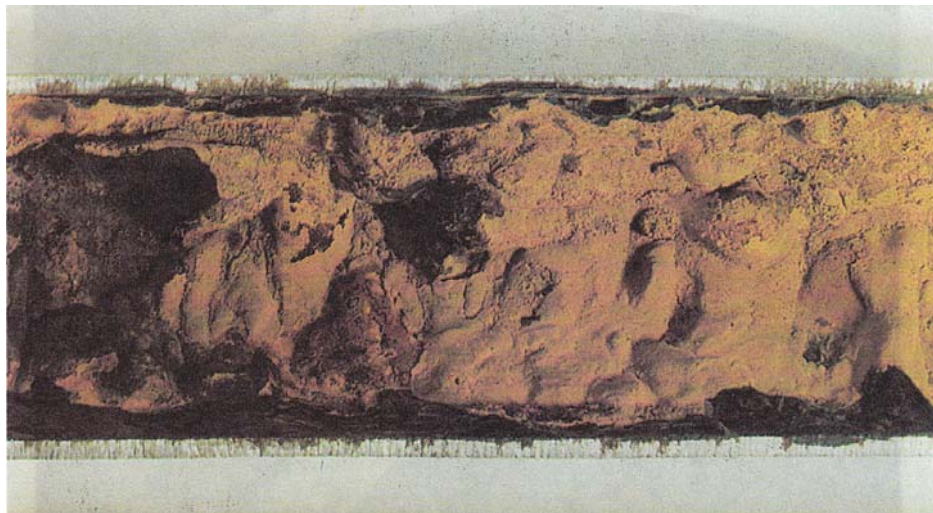
سیستم: کندانسور بخار

مدت کارکرد: در حدود ۱۵ سال

پدیده: حمله اکسیژنی

ظاهر نمونه: لوله با محصولات خوردگی پوشیده شده است، در زیر این محصولات حفره مشاهده شده است.

محیط: آب تغذیه حاوی اکسیژن (دما تقریباً 90°C است).



علت پدیده: حمله اکسیژنی بعثت عدم وجود دستگاه هوازدا (deaerator) صورت می گیرد.

محصولات خوردگی روی لوله باقی می مانند که این مسأله ناشی از پایین بودن pH آب تغذیه و سرعت پایین سیال است.

روش اصلاح: بدلیل کوتاه بودن خط لوله کندانسور، این قسمت از لوله ها بهتر است، از جنس فولاد زنگ نزن ساخته شود. و یا در شرایطی که لوله های کندانسور طویل و از نظر اقتصادی استفاده از فولاد زنگ نزن مقرون بصرفه نباشد ضرورت دارد تا آب تغذیه هوازدایی شده، ضمناً باید از مواد شیمیایی جاذب اکسیژن نیز استفاده شود.

مورد ۱۰۱۰۲۵

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : کندانسور بخار

قسمت : گلوله شناور در قسمت زانویی بخار در مبدل حرارتی

پدیده : حمله اکسیژن

مدت کارکرد : ۷ ماه

ظاهر نمونه : حفره هایی به صورت سوراخهای عمیق موضعی روی نمونه پدید آمده است.

محیط : آب تغذیه (کندانسور) به آب خنک کن آلوده شده است ، ضمن آنکه میزان اکسیژن بالا می باشد .

دما °C ۱۰۰.



علت پدیده : آلوده شدن آب تغذیه به آب خنک کن حاوی اکسیژن بالا و مواد خوردنده سبب این زوال شده

است .

روش اصلاح : پس از برطرف کردن نشتی باید زانویی بخار در مبدل حرارتی با یک گلوله شناور از جنس

فولاد زنگ نزن ۳۱۶ ساخته شود ، ضمن آنکه روشهای پیشگیری به منظور مراقبت های ویژه از آلوده

شدن آب نیز بایستی مد نظر قرار گیرد .

مورد ۱۰۱۰۲۶

صنعت : تأسیساتی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : بخش گرمایش

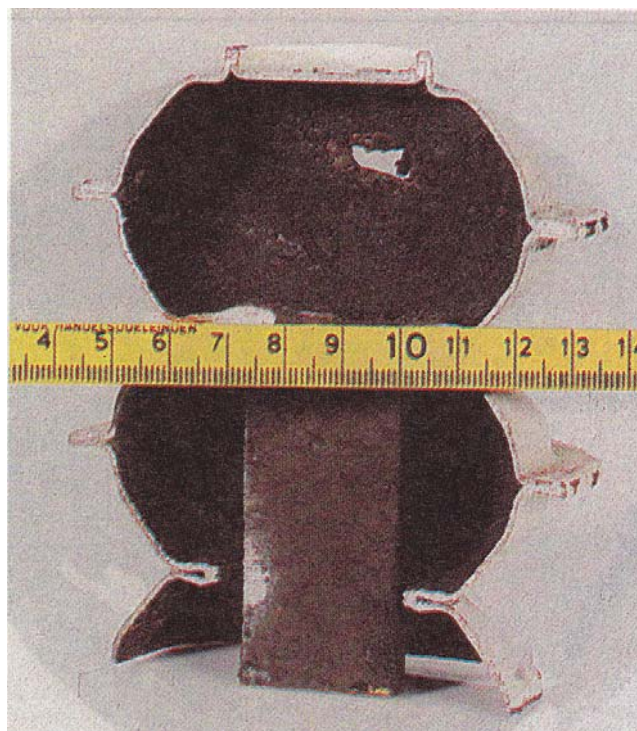
قسمت : قسمت پایینی رادیاتور

پدیده : حمله رسوبی

مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : در زیر رسوبات یر روی نمونه حملات موضعی صورت گرفته است .

محیط : محیط شامل آب گرم با سختی بالا و حاوی اکسیژن است ، دمای آن $70-90^{\circ}\text{C}$ است .



علت پدیده : به علت ناشی مکرر از خطوط لوله زیر زمینی که ناشی از خوردگی خارجی است ، مقدار

زیادی آب کثیف به سیستم اضافه می شود . رسوبات ناشی از خوردگی در ته رادیاتور ته نشین می شود

و این امر منجر به تشکیل پیل‌های اختلاف دمشی می شود و نهایتاً خوردگی در رسوبات اتفاق می افتد .

روش اصلاح : سیستم بایستی شستشوی شیمیایی (اسیدی) شود . ضمن آنکه بایستی شرایط شیمیایی

آب مصرفی در رادیاتور نیز بهبود یابد . پوشش و عایق نمودن لوله های زیر زمینی نیز مفید است .

مورد ۱۰۱۰۲۷

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : کندانسور بخاری

قسمت : لوله کندانسور

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : نامعین

ظاهر نمونه : خوردگی شدیدی در خم لوله ها مشاهده می شود .

محیط : آب کندانسه شده با خوردگی کم ، دما تقریباً 100°C .



علت پدیده : به دلیل بالا بودن سرعت آب ، در خم لوله ها جریان اغتشاشی ایجاد می شود. این پدیده سبب خوردگی سایشی می شود .

روش اصلاح : مهم ترین قدم در رفع مشکل ، طراحی سیستم است ، ولی استفاده از مواد شیمیایی نظیر مورفولین می تواند تا حدودی از خوردگی سایشی جلوگیری نماید. ضمن آنکه در این مورد مطالعاتی ، بهبود شرایط شیمیایی و افزایش pH می توانست کمک مؤثری در کاهش پدیده سایش داشته باشد .

مورد ۱۰۱۰۲۸

صنعت: پتروشیمی

جنس نمونه: فولاد کربنی

سیستم: برج خنک کن با مبدل حرارتی

قسمت: لوله خنک کننده از مبدل حرارتی (لوله با پوشش آلومینیم برنجی)

پدیده: حمله هیدروژنی داغ (کربن زدایی)

مدت کارکرد: چند سال

ظاهر نمونه: شکاف عمیق

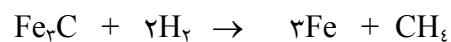
محیط: داخل لوله فشار بالای مخلوط گاز هیدروژن و نیتروژن و آمونیاک (۱۵۰ بار) و دما تقریباً $^{\circ}\text{C}$

۲۴۰ است.



علت پدیده: هیدروژن به داخل فولاد نفوذ می کند و در دما و فشار بالا، هیدروژن با سمانتیت (Fe_3C) در

فولاد واکنش داده و تشکیل متان گازی می دهد. در اثر فشار حاصل از واکنش زیر فولاد ترک می خورد.



روش اصلاح: با به کار بردن ۰/۵ مولیبن در فولاد یا فولاد کرم مولیبیدن دار مشکل برطرف می شود.

مورد ۱۰۱۰۲۹

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : اتوکلاوآور

قسمت : فولاد کربنی با آستری از فولاد زنگ نزن

پدیده: خوردگی تنش از نوع بین دانه ای

مدت کارکرد : نا معین

ظاهر نمونه : ترکهای متقاطعی در نقاط جوش دیده می شود .

محیط : آب باران که حاوی نیترات است داخل شکافهای جداره آلومینیمی پوشش می شود، دمای جداره

حدود 150°C است



علت پدیده : خوردگی تنش بین دانه ای به علت حضور نیترات بوجود می آید .

روش اصلاح : باید طراحی سیستم را تغییر داد و راکتور در زیر یک سقف قرار گیرد تا از ریزش آب

محفوظ باشد .

مورد ۱۰۱۰۳۰

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سیستم حمل سود سوز آور

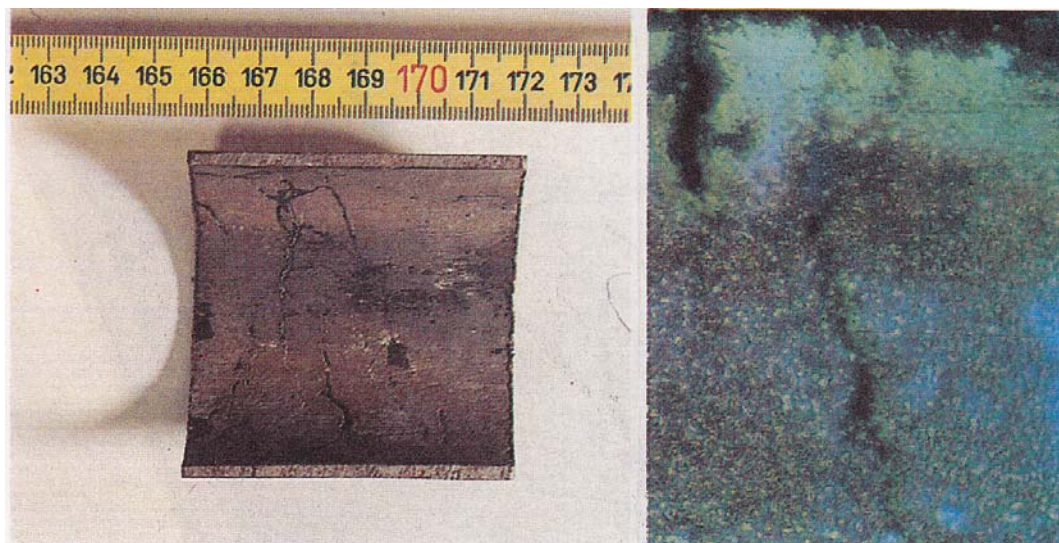
قسمت : لوله

پدیده : خوردگی تنش (تردی قلیایی)

مدت کارکرد : ۲ الی ۴ سال

ظاهر نمونه : ترکهایی در داخل لوله

محیط : محلول سود ۳۱٪ - دما 50°C .



علت پدیده : قلیائیت بالا همراه با وجود تنش هایی در لوله سبب زوال لوله شده است .

روش اصلاح : با جایگزین کردن این لوله توسط یک لوله جدید و با ایجاد تکیه گاه در برخی قسمتهای لوله

به منظور کاهش تنش می توان از خوردگی تنش جلوگیری نمود .

مورد ۱۰۱۰۳۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : مخزن ذخیره محصولات شیمیایی

قسمت : انتهای مخزن

پدیده : خوردگی میکروبی

مدت کارکرد : ۶ سال

ظاهر نمونه : وجود ترکهای موضعی شدید

محیط : آب زیر زمینی



علت پدیده : کف بیرونی مخزن بدلیل فعالیت باکتری های غیر هوازی احیاء کننده سولفات خورده شده است علت آن وجود سولفات در خاک و آب زیر زمینی . این نوع باکتری ها قادرند تا سولفات را به سولفید خورنده تبدیل کنند .

روش اصلاح : نباید این مخزن مدت طولانی در معرض آب و رطوبت زیر زمینی قرار گیرند. بایستی با عایقهای مطلوب سطح زیرین مخزن را پوشش داد .

مورد ۱۰۱۰۳۲

صنعت : استخراج گاز

جنس نمونه : فولاد کربنی

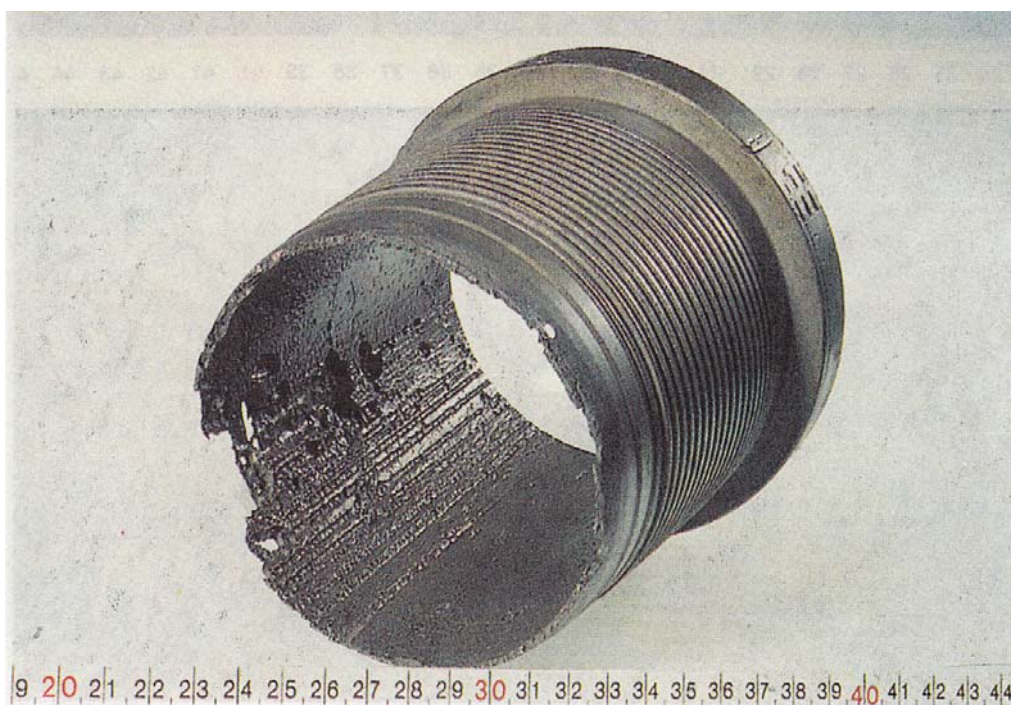
قسمت : قطعه متصل کننده لوله چاه

سیستم : چاه گاز طبیعی

پدیده : خوردگی دی اکسید کربن (خوردگی شیرین) مدت کارکرد : چند سال

ظاهر نمونه : حفرات و شیارهای شدیدی به صورت خطوط طولی روی قطعه قابل مشاهده است .

محیط : گاز طبیعی شامل دی اکسید کربن مرطوب



علت پدیده : جریان اغتشاشی داخل لوله سبب از بین رفتن لایه های کربنات آهن محافظ در لوله ها شده و

در نتیجه خوردگی دی اکسید کربن رخ می دهد .

روش اصلاح : با کنترل سرعت جریان و تزریق باز دارنده در داخل لوله مشکل برطرف می شود .

صنعت : گاز

مورد ۱۰۱۰۳۳

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : ایستگاه گاز قسمت : لوله (ضخامت دیواره ۸ mm است)

پدیده : خوردگی دی اکسید کربن (خوردگی شیرین) مدت کارکرد: چند سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی شدیدی در نزدیکی مقاطع جوشکاری شده لوله و تکیه گاه مشاهده می شود .

محیط : گاز حاوی دی اکسید کربن مرطوب می باشد .



علت پدیده : وجود آب حاوی دی اکسید کربن (CO_2) سبب خوردگی شیرین در لوله ۱۹ انتقال گاز می شود ، ضمن آنکه عملیات جوشکاری بر ساختار فولاد اثر نامطلوبی گذاشته و این نوع خوردگی را تسریع می کند .

روش اصلاح : - بهبود شرایط شیمیایی با استفاده از بازدارنده های خوردگی

- دقت در طراحی و جوشکاری در زمان ساخت .

مورد ۱۰۱۰۳۴

صنعت : گاز

جنس نمونه : فولاد کربنی (ASTM A۱۰۶)

مدت کارکرد : ۱۵ ماه

سیستم : خط انتقال گاز از چاه به واحد تصفیه

قسمت : لوله (ضخامت لوله ۱۳ Cm است)

پدیده : خوردگی دی اکسید کربن که با افزایش سرعت سیال زیاد می شود (خوردگی شیرین)

ظاهر نمونه : در سمت چپ: حفره هائی مشاهده می شود و خوردگی به صورت انتخابی و ترجیحی در

قسمتهای جوش صورت گرفته است .

در سمت راست : حفراتی قابل مشاهده است و خوردگی نامنظم در بیرون خمیدگی صورت گرفته است .

محیط : محیط شامل گاز طبیعی حاوی دی اکسید کربن مرطوب است ، فشار گاز زیاد است (۱۸۰ بار) .



علت پدیده : در سرعت بالای سیال ، جریانهای اغتشاشی در اطراف قسمتهای جوش بوجود می آید ، هم

چنین تماس تصادفی گاز مرطوب در ناحیه خمیدگی سبب وقوع خوردگی می شود . ضمناً در سرعتهای

بالا راندمان باز دارندگی بعضی از بازدارنده ها کاهش می یابد .

روش اصلاح : با کم کردن جریان گاز (کاهش سرعت) و نیز بکاربردن فرآیند جوشکاری بهتر می توان از

وقوع این مشکل جلوگیری کرد .

مورد ۱۰۱۰۳۵

صنعت : گاز

جنس نمونه : فولاد کربنی

مدت کارکرد: حدود یک سال

سیستم : جاه گاز طبیعی

قسمت : قطعه متصل کننده لوله های چاه (ضخامت دیواره ۸mm

(

پدیده: خوردگی دی اکسید کربن که با جریان اغتشاشی افزایش می یابد (خوردگی شیرین)

ظاهر نمونه : خوردگی شدید در سمت پایین لوله .

محیط : گاز طبیعی حاوی دی اکسید کربن مرطوب .



علت پدیده : وجود کمی نامنظمی در اتصالات سبب ایجاد جریان اغتشاش شدید در سیال شده و از تشکیل

لایه محافظ کربنات آهن جلوگیری می کند .

روش اصلاح : با کنترل سرعت سیال و استفاده از بازدارنده مشکل برطرف می شود .

مورد ۱۰۱۰۳۶

صنعت : برق (نیروگاه بخار)

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵,۸)

قسمت : لوله های خروجی از درام

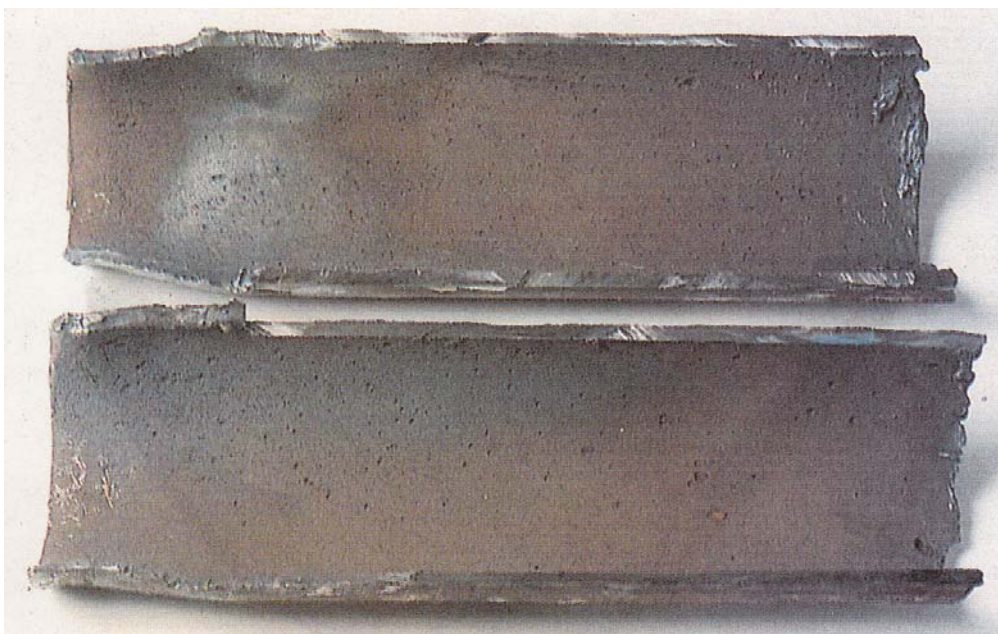
سیستم : دیگ بخار (لوله آب دیگ بخار ، فشار: ۸۵ بار و دما 515°C)

پدیده : حمله اکسیژنی

مدت کارکرد: ۱۱ سال

ظاهر نمونه : حفره های ریزی در قسمت بالایی لوله های زیر درام مشاهده می شود .

محیط : آب دیگ بخار



علت پدیده : بدلیل مقدار غیر کافی هیدرازین که در زمان توقف دیگ بخار به آن افزوده شده است ، پدیده

خوردگی ایجاد شده است .

روش اصلاح :

-بالا نگهداشتن مقدار هیدرازین در زمان توقف واحد و کنترل درجه حرارت آن (حداقل ۱۰۰ppm

هیدرازین و درجه حرارت 70°C) این مشکل مرتفع خواهد شد .

- ضمناً بجای هیدرازین می توان از سایر مواد اکسیژن گیر دیگر نظیر هیدروکینون (hydroquinone) و

اسید اری تروپیک نیز استفاده نمود .

مورد ۱۰۱۰۳۷

صنعت : ساختمان

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سیستم اطفاء حریق
قسمت : لوله انتقال زیرزمینی که با قیر پوشش داده شده است .

پدیده : خوردگی میکروبی
مدت کارکرد : حدود یک سال

ظاهر نمونه : خوردگی شدید موضعی به صورت کاسه ای شکل در روی نمونه قابل مشاهده است .
محیط : بستر زمین ماسه ای و سنگریزه بوده ، همچنین در برخی نقاط خاک از نوع لجن زار و باتلاقی است.



علت پدیده : هنگامی که خاک فشرده شود ، پوشش قیری لوله به صورت موضعی بخاطر حضور سنگریزه تخریب می شود . در این محل ها باکتری احیاء کننده سولفات سبب وقوع خوردگی می شود و فولاد مورد حمله قرار می گیرد .

روش اصلاح : بهتر است در چنین زمینهایی لوله ها به بالای زمین انتقال یابند ، ضمناً در زمانی که ضرورت دارد تا لوله ها در زیر زمین قرار گیرند بهتر است در اطراف لوله ها خاک نرم ریخته شود تا در صورت وجود هر گونه فشار به لوله ها سبب تخریب پوشش های آن نشود .

مورد ۱۰۱۰۳۸

صنعت : تأسیساتی (تهویه مطبوع)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : انشعاب دهنده بخار

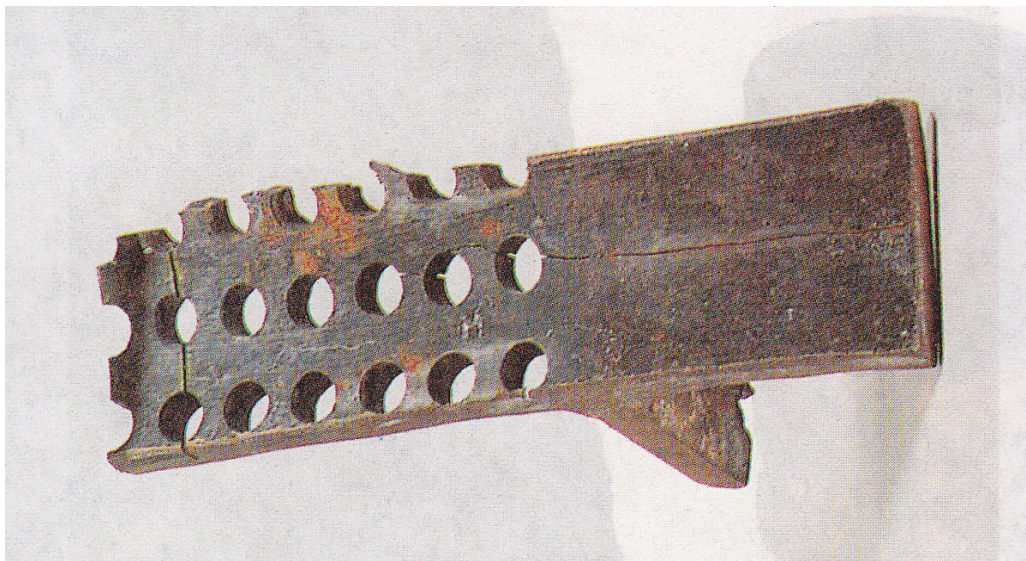
قسمت : صفحه نگهدارنده

پدیده : خوردگی تنش

مدت کارکرد : ۱۰ سال

ظاهر نمونه : بین سوراخهای قطعه ، ترکهایی بوجود آمده است .

محیط : حاوی آب و بخار ، pH حدود (۱۱-۱۳) ، دما 140°C .



علت پدیده : محلولهای قلیایی با pH بالا ، خوردگی تنش در فولاد ایجاد می کنند .

روش اصلاح :

- با نرماله کردن فولاد (Normalizing) مشکل برطرف می شود .

- و یا با تقلیل pH سیستم و استفاده از باز دارنده مناسب .

مورد ۱۰۱۰۳۹

صنعت: برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه: فولاد کربنی

قسمت: لوله انتقال آب

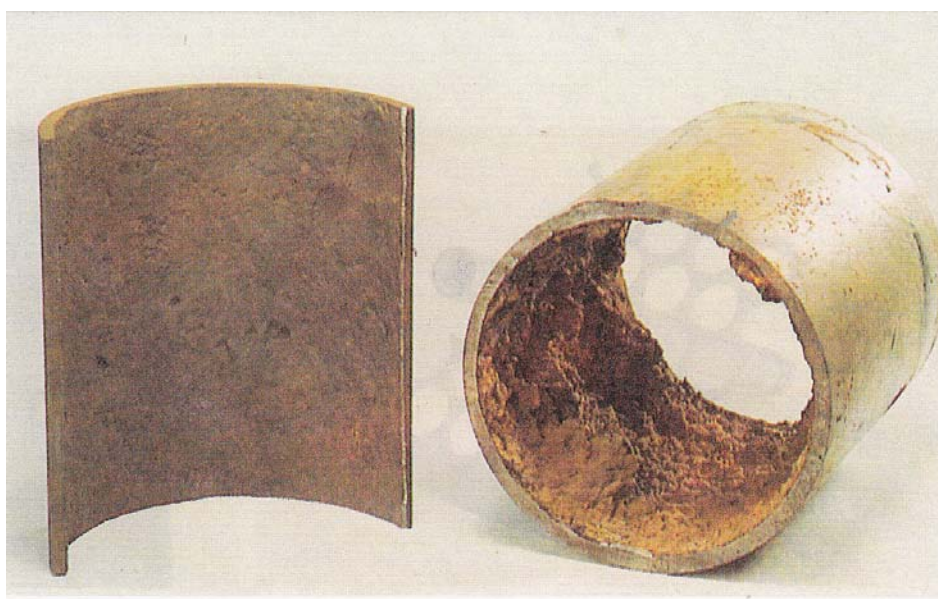
سیستم: برج خنک کن باز

مدت کارکرد: ۲ سال

پدیده: خوردگی اکسیژن

ظاهر نمونه: حفره های عمیقی در زیر رسوبات ایجاد شده است

محیط: آب خنک کننده (آب چاه که تغلیظ شده است). pH محیط برابر ۷ است و دما 30°C است.



علت پدیده: اکسیژن موجود در آب خنک کننده باعث خوردگی می شود. روش اصلاح: با استفاده از

بازدارنده های رسوب و خوردگی و تنظیم شرایط شیمیایی بمنظور کاهش رسوبات می توان مشکل فوق

را مرتفع نمود.

مورد ۱۰۱۰۴۰

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : صفحه جدا کننده : از فولاد کربنی لوله ها : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : آب خنک کن یکبار گذر قسمت : مبدل حرارتی

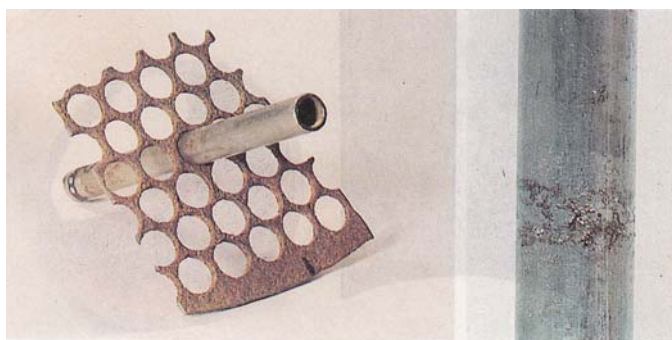
پدیده : خوردگی گالوانیکی (به همراه خوردگی عمومی و خوردگی شیاری)

مدت کارکرد : ۱۰ سال

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواختی در صفحه جدا کننده صورت گرفته است . حفره های ریزی در شیارهای

لوله ها بوجود آمده است .

محیط : اطراف لوله ها: آب سرد کننده در 4°C – 5°C و غلظت یون کلر $\text{ppm}=85$ است .



داخل لوله ها : محصولات شیمیایی عبور می کند .

علت پدیده : فولاد کربنی عملیات حرارتی نشده توسط آب خنک کن مورد حمله قرار می گیرد و این

خوردگی توسط زوج گالوانیک تشکیل شده با فولاد تشدید می شود . در شیارهای صفحه جدا کننده و لوله

های فولاد زنگ نزن خوردگی شیاری نیز صورت می گیرد .

روش اصلاح : اگر صفحه جدا کننده و لوله از یک جنس ساخته شوند به عنوان مثال هر دو از جنس فولاد

زنگ نزن AISI ۳۱۶ یا SMO ۲۵۴ باشند ، مشکل مرتفع خواهد شد . همچنین فولاد نوع دوم مقاومت

بیشتری به خوردگی سلیشی دارد .

مورد ۱۰۱۰۴۱

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دیگ بخار فشار بالا با سوخت نفت سنگین

قسمت: لوله دیواره آب (water wall)

پدیده : خوردگی اسیدی سمت شعله

مدت کارکرد : نامعین

ظاهر نمونه : حمله یکنواختی روی نمونه صورت گرفته است .

محیط : محصولات حاصل از احتراق سوخت سنگین که حاوی مواد خورنده سولفوری و نمکهای وانادیم

می باشد .



علت پدیده : در مدت توقف واحد، اجزاء سولفوری با آب وارد واکنش شده و تشکیل اسید سولفوریک می

دهند که این اسید فولاد را مورد حمله قرار می دهد .

روش اصلاح : در توقف های طولانی مدت بهتر است تا سطوح بوسیله مواد قلیایی نظیر آهک و یا آمونیاک

تمیز شوند ، در صورت امکان با استفاده از گاز طبیعی و یا نفت کوره با مقدار کمتر سولفور ، این مشکل

مرتفع می شود .

مورد ۱۰۱۰۴۲

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵/۸)

سیستم : دیگ بخار با فشار ۹۱ بار قسمت : لوله کوره گرمایشی

پدیده : خزش ناشی از بیش از حد گرم شدن (super heating)

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : بادکردگی موضعی لوله

محیط : آب دیگ بخار مداوا شده (conditioned)



علت پدیده : گردش ناقص و نا کافی آب بر اثر ایجاد گرفتگی در هدرها که ناشی از رسوب دادن

ناخالصیهایی نظیر اکسید آهن و روی از آب چگال می باشد .

روش اصلاح : تمیز کاری شیمیایی دیگ بخار و بالا بردن کیف آب کندانسه (تغذیه) .

مورد ۱۰۱۰۴۳

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵,۸)

سیستم : دیگ بخار با فشار ۷۱ بار

قسمت : لوله آب

پدیده : خزش ناشی از بیش از حد گرم شده (superheat)

مدت کارکرد: ۲ سال

ظاهر نمونه: لوله شکسته است

محیط : آب دیگ بخار از ۹۸٪ بخار چگال و ۲٪ آب مقطر جبرانی استفاده می کند .



علت پدیده : بدلیل عدم استفاده از مواد شیمیایی جهت کنترل رسوب و خوردگی ، رسوبات بیش از حد در

داخل لوله ایجاد شده است و این امر سبب شده تا پدیده بیش از حد گرم شدن اتفاق افتد (Overheating)

روش اصلاح :

-استفاده از هیدرازین به منظور جلوگیری از خوردگی

- استفاده از تری سدیم فسفات برای ایجاد قلیائیت و هدایت الکتریکی کافی در آب

- بازرسی مستمر ، وسیله ایمنی هشدار دهنده ، کاهش میزان آب و نیز ترکیب مناسب آب دیگ بخار .

- بازرسی مستمر از وضعیت سطح آب درام دیگ بخار و هم چنین کنترل شیمیایی آب دیگ .

مورد ۱۰۱۰۴۴

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سیستم تغذیه دیگ بخار

قسمت : خط تغذیه آب دیگ بخار به قطر ۷۰ میلی متر و دارای دستگاه هوازدا

پدیده : خوردگی ناشی از مواد شلانت مدت کارکرد : ۱/۵ سال

ظاهر نمونه : کاهش یکنواخت ۶۰٪ از ضخامت اولیه دیواره لوله .

محیط : مخلوط ۵۰-۵۰ از آب فاقد کربنات و بخار چگال ، $pH = 8$ ، دما $105^{\circ}C$ ، ماده بکار رفته :

EDTA ۴۰٪ و سولفیت کاتالیزه (ppm ۴ از Na – EDTA آزاد در آب ورودی وجود دارد) .



علت پدیده : آب دارای مقادیر بیش از حد اکسیژن (۲-۳ ppm) و نیز EDTA (بیش از ۱۰ ppm) بوده که

دلیل این امر را می توان عملکرد ضعیف دستگاه هوازدا (deaerator) و استفاده نا صحیح از مواد شیمیایی

برشمرده. چلات در آب تغذیه حاوی اکسیژن ، با ایجاد کمپلکس با آهن دیواره لوله ، ایجاد خوردگی می نماید

روش اصلاح :

- بهبود عملکرد هوازدا بوسیله اسپری کردن و پاشش بخار کندانسه و نیز تخلیه کافی هوا از طریق شیر

دی ایرتور .

- محل تزریق سولفیت را به دستگاه هوازدا منتقل کنید .

- نوع چلات را با یک چلات پلیوری و با میزان مصرف زیر حد استوکیومتری جایگزین نمایید .

- دیدبانی و کنترل دقیق تر تزریق مواد شیمیایی و میزان آنها .

موارد ۱۰۱۰۴۵

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد غیر آلیاژی

مدت کارکرد: بیش از ۱۰ سال

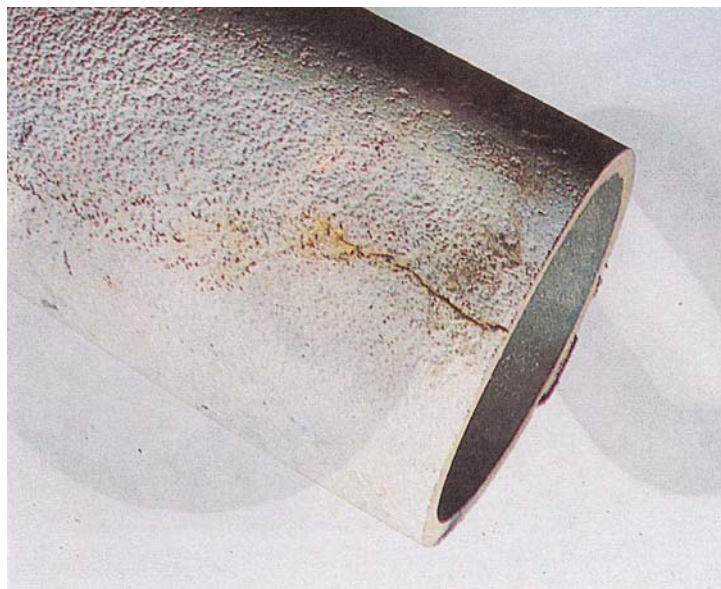
سیستم : دیگ بخار فشار بالا

قسمت : لوله دستگاه تبخیر کننده (evaporator)

پدیده : حمله هیدروژنی تین دنه ای (intergranual hydrogen attack)

ظاهر نمونه : ترک طولی در انحناي خم شده به صورت سرد (cold – bent – bend)

محیط : رسوبات گاز ناشی از سوخت به همراه ترکیبات اسید سولفوریک .



علت پدیده : در حین مرحله اول فرآیند خنثی در سمت گاز (که در هنگام توقف واحد صورت می گیرد)

بدلیل وجود رسوبات گوگردی ، روی لوله ها یک محیط اسیدی ایجاد می شود واکنش اسید سولفوریک

حاصله و فولاد ، تولید هیدروژن می نماید که این هیدروژن به قسمتهای خم شده با تنش بالا حمله نمود و

سبب ترک خوردگی و شکست می گردد .

روش اصلاح : از فولاد کم آلیاژ (low – alloyed) و مقاوم به هیدروژن استفاده شود .

مورد ۱۰۱۰۴۶

صنعت : حمل و نقل (بنادر و کشتیرانی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : لایروب

قسمت : حلقه زنجیر

پدیده : خوردگی خستگی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : شکست نرم جزیی با حلقه های مشخص ناشی از خستگی ، در جاهایی شکست ترد به همراه

حفره مشاهده می شود . (سطح شکست را در عکس سمت راست را ملاحظه کنید) .

محیط : غوطه وری منظم در آب شور بندری



علت پدیده : خستگی در حین کارکرد رخ داده است ، حلقه زنجیر مورد بحث بدلیل وجود نیروهای پیچی و

آسیب دیدن سطح خارجی آن ، گیر کرده و شکسته است .

روش اصلاح : استفاده از آلیاژ بهتر .

جنس نمونه: فولاد کربنی

سیستم : تأمین گاز شهری (گاز رسانی) قسمت : لوله زیر زمینی (نوار پیچی شده)

پدیده : خوردگی ماشی از موجودات زنده میکروسکپی مدت کارکرد : ۲/۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی شدید موضعی .

محیط : آب زیر زمینی با میزان بالایی از سولفات (۱۳۰۰ppm) .



علت پدیده : بر اثر کارکرد نا صحیح ، روکش لوله در مناطقی از لوله کنار رفته و زایل شده است . در

نتیجه آب موجد در زیر آن یک محیط بی هوازی ایجاد کرده ، اجازه رشد را به SRB داده است (در

محصولات خوردگی ، سولفید مشاهده گردیده) . سولفید حاصله نیز فولاد را مورد هجوم قرار داده است .

توجه : کلیه لوله های حفاظت نشده ، حتی در حالت عدم حضور SRB نیز توسط آب زیر زمینی مورد

حمله و خوردگی قرار می گیرند .

روش اصلاح : قسمتهای صدمه دیده باید با لوله های دارای نوار پیچی کافی و کامل تعویض شوند .

مورد ۱۰۱۰۴۸

صنعت : گاز

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : تأمین گاز شهری (گاز رسانی)

قسمت : لوله زیر زمینی پوشیده شده با قیر (bittumen – coated)

پدیده : خوردگی جریان سرگردان

مدت کارکرد : ۱۰ سال

ظاهر نمونه : حمله موضعی شدید در محل نزدیک به اتصال به منازل .

محیط : خاک با ترکیب شیمیایی نامعلوم .



علت پدیده : جریانهای سرگردان ناشی از اعمال حفاظت کاتدی نامناسب ، سبب خوردگی موضعی لوله ها

شده است .

روش اصلاح : استفاده از قطعه پلاستیکی عایق در محل اتصال به منظور انحراف جریانهای سرگردان .

مورد ۱۰۱۰۴۹

صنعت : گاز

جنس نمونه : فولاد کربنی

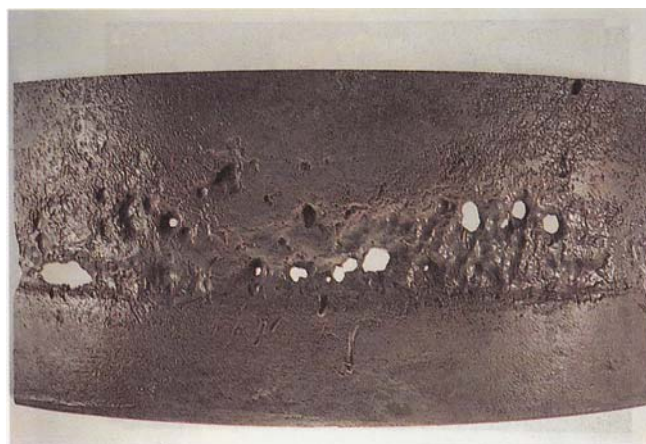
سیستم : تأمین گاز شهری (گاز رسانی)

قسمت : مقطع لوله زیر زمینی به قطر ۹۰۰ میلی متر ، درست قبل از محل اتصال

پدیده : خوردگی جریان سرگردان مدت کارکرد : بیش از ۱۰۰ سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی به همراه حفره های زیاد درست قبل از محل اتصال .

محیط : خاک با ترکیب شیمیایی نامعلوم



علت پدیده : لوله فوق که توسط قیر پوشیده شده است ، در زیر زمینی درست به موازات یک خط تراموا

(قطار داخل شهری) . قرار داشته ، جریانهای سرگردان ناشی از قطار برقی وارد لوله شده و درست در

محل قبل از اتصال ، از آن خارج گردیده و ایجاد خوردگی نموده اند .

روش اصلاح :

- تعویض خط لوله

- پیشگیری می تواند با هدایت جریان الکتریکی از خط لوله گاز توسط یک فلز هادی مناسب صورت

پذیرد .

مورد ۱۰۱۰۵۰

صنعت : حمل و نقل (بنادر و کشتیرانی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دستگاه لایروب

قسمت : جداره کشتی

پدیده : حمله کلریدی و خوردگی زیر رسوبی

مدت کارکرد : چند ماه

ظاهر نمونه : حفره دار شدن ، حتی در زیر صدفهای چسبیده به جداره

محیط : آب دریا (گرمسیری)



علت پدیده : کلر زیاد آب دریا سبب حفره دار شدن فولاد می شود ، به علاوه بدلیل رشد صدفها روی

دیواره کشتی ، پیلهای اختلاف دمشی پدید آمده ، مناطق عاری از اکسیژن (زیر صدفها) آندی شده و دچار

خوردگی می گردد .

روش اصلاح :

- در بدنه بیرونی کشتی بایستی از یک رنگ ضد رشد موجودات دریایی استفاده شود .

- بوسیله آندهایی از جنس روی ، حفاظت کاتدی انجام گیرد .

مورد ۱۰۱۰۵۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : خط انتقال مواد شیمیایی

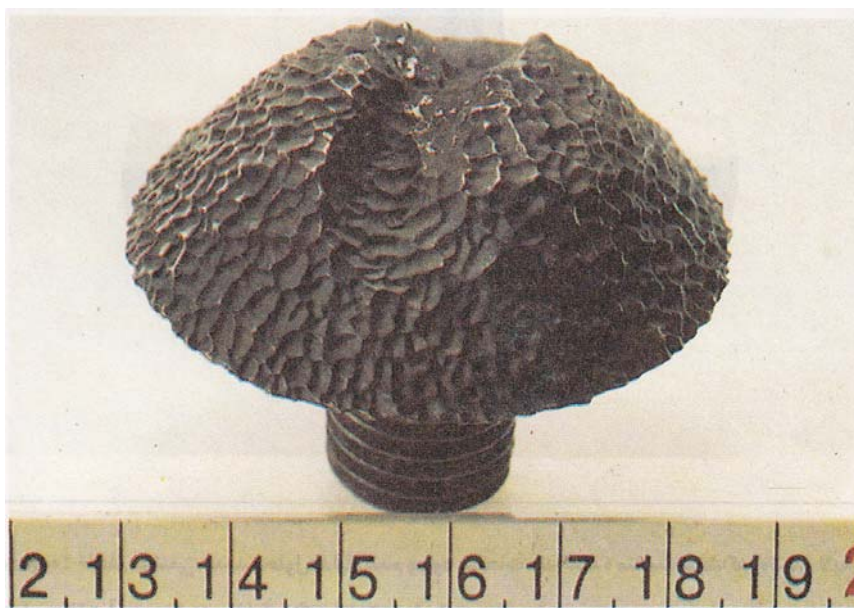
قسمت : پیچ پمپ (pump holit)

پدیده : خوردگی سایشی (Erosion)

مدت کارکرد : ۱۰ سال

ظاهر نمونه : سایش سطح بطور نامنظم در سراسر آن به چشم می خورد .

محیط : گلیکول ، گلیکولیک ، دی اکسید کربن و آب . دما 160°C .



علت پدیده : سرعت بالای محلولهای فوق در لوله های فولادی (کربنی) ایجاد خوردگی سایشی می کند .

روش اصلاح : بایستی از مواد مناسب تر نظیر فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶) استفاده شود.

مورد ۱۰۱۰۵۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : خط انتقال اسید سولفوریک

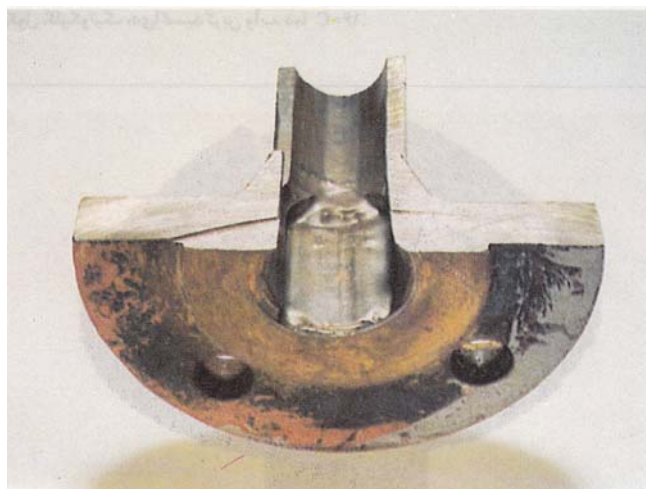
قسمت : لبه لوله

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : حمله شدید موضعی .

محیط : ۹۶٪ اسید سولفوریک ، سرعت ۰/۸ تا ۰/۹ متر بر ثانیه ، دما ۱۵-۲۰ °C



علت پدیده : تلاطم موضعی شدید محلول به دلیل عدم وجود صفحات جدا کننده مناسب سبب کنده شدن

لایه محافظ سولفات آهن می شود و لذا خوردگی شدید می شود .

روش اصلاح :

با طراحی صحیح و نصب صفحات جدا کننده مشکل مرتفع می شود .

مورد ۱۰۱۰۵۳

صنعت : نفت (پالایشگاه)

جنس نمونه : فولاد آلیاژی (W.Nr.۱,۷۳۶۲, ۱۹ CrMo ۱۲)

سیستم : واحد تقطیر در خلأ بالا (فشار بسیار پایین) قسمت : لوله کوره

پدیده : خوردگی سایشی مدت کارکرد : ۱ سال

ظاهر نمونه : هم خوردگی یکنواخت و هم حفره دار شدن مشاهده می گردد .

محیط : هیدرو کربن ها به همراه اسید نفتانیک (اسیدهای آلی موجود در نفت خام) ، دما حدوداً 300°C ،

سرعت های بالا .



علت پدیده : اسید نفتانیک در چنین شرایطی ، خوردگی شدیدی بر این نوع فولاد دارد .

روش اصلاح :

- اسیدها را خنثی کرده ، سرعت را تقلیل دهید .
- انتخاب نوع و رده دیگری از فولاد (برای مثال فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶)

مورد ۱۰۱۰۵۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : خط انتقال محلول سود

قسمت : زانویی لوله

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : ۲ تا ۳ سال

ظاهر نمونه : حمله موضعی .

محیط : سود با دانسیته ۲۴ درجه بومه Be° (حدود ۲۰٪) ، دما 60°C



علت پدیده : خوردگی سایشی بر اثر سرعت بسیار زیاد (۴ تا ۴/۵ متر بر ثانیه)

روش اصلاح :

- سرعت حرکت محلول سود در لوله باید به ۱ متر بر ثانیه کاهش یابد .

مورد ۱۰۱۰۵۵

صنعت : نفت (استخراج نفت)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سکوی تولید نفت

قسمت : قطعه T شکل

پدیده : خستگی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : ترک فاقد اعوجاج می باشد و به صورت مستقیم در صفحه افقی انتشار یافته است .

محیط : نفت (بنزین)



علت پدیده : شاخه ۳ اینچی به خوبی مهار نشده است ، از این رو در معرض بادهای متغیر و نوسانی

شدید قرار گرفته است و همین بادهای نوسانی باعث به وجود آمدن خستگی در قطعه شده است .

روش اصلاح :

نصب نمودن قطعه محافظ و نگه دارنده مناسب بمنظور کاهش تنش .

مورد ۱۰۱۰۵۶

صنعت : نفت (پالایشگاه)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : واحد تقطیر نفت

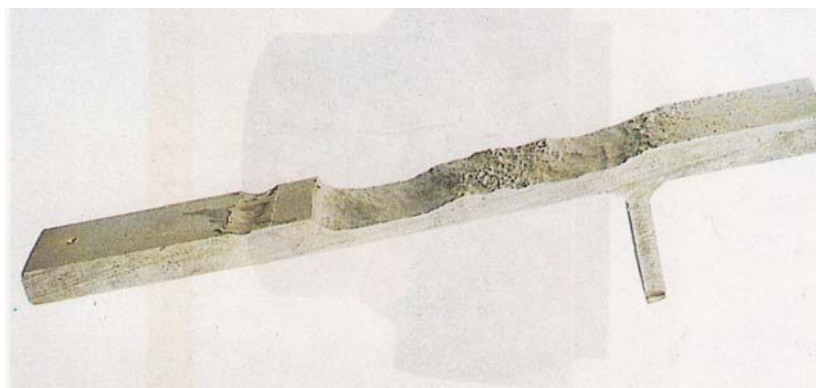
قسمت : دیواره ستون

پدیده : خوردگی در زیر عایق بندی (حرارتی)

مدت کارکرد : ۱۵ سال

ظاهر نمونه : حمله موضعی شدید .

محیط : عایق بندی حرارتی نامناسب که با آب آلوده اشباع شده است . دما تقریباً 80°C .



علت پدیده : دیواره بوسیله نفوذ آب از عایق بندی تحت حمله قرار گرفته است . آب باران آلوده به مواد

خورنده روی سطح دیواره تبخیر شده ، ایجاد خوردگی شدید می کند .

روش اصلاح :

- عایق ها را بخوبی آب بندی نمایید . (از وارد شدن و نفوذ آب بوسیله پیش بینی های ساختاری جلوگیری

کرده ، درزها و شکافها را بپوشانید) .

- دیواره را توسط یک سیستم رنگ مناسب محافظ نمایید .

مورد ۱۰۱۰۵۷

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربن

سیستم : حرارت مرکزی

قسمت : گردونه (rotor) پمپ گردش

پدیده : صورتی از حمله اکسیژنی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : رسوب اکسید آهن سیاه رنگ (مگنتیت) روی گردونه (rotor) تشکیل شده است .

محیط : شامل آب گرم کننده در دمای $70-90^{\circ}\text{C}$ و بدون حضور مواد شیمیایی است .



علت پدیده : ورود هوا (برای مثال از درزها و آب بندی ها) به آب می تواند دلیل عمده خوردگی در

سیستم حرارت مرکزی باشد . مگنتیت حاصله روی میدان مغناطیسی گردونه پمپ نشست و رسوب می

کند ، و سبب گرفتگی و گیر کردن آن می شود .

روش اصلاح : با عملکردهای زیر می توان مشکل سیستم را برطرف نمود :

- با پاک کردن مگنتیت از سیستم

- بکار بردن یک ماده باز دارنده خوردگی در سیستم

- با جلوگیری از ورود هوا با استفاده از آب بندی های فلزی و عدم استفاده از لوله های پلاستیکی .

مورد ۱۰۱۰۵۸

صنعت : دیگ بخار کارخانه

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : لوله دیواره کوره (سمت آتش)

سیستم : دیگ بخار واتر تیوب ، با فشار ۵۱ بار ، گرمایش توسط بستر سیال (Fluidized bed)

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : ۶۰۰۰ ساعت

ظاهر نمونه : سطح بصورت تصادفی و پراکنده ساییده و منهدم شده است .

محیط : محفظه احتراق دیگ بخار که در آن با سوزاندن زباله های خانگی و آشغال تولید حرارت می شود



علت پدیده : سایش بدلیل برخورد ذرات شن و ماسه موجود در آشغال با دیواره محفظه احتراق

روش اصلاح : باید طراحی مناسب تری صورت گیرد . یعنی کف کوره تا ارتفاع ۸۰ سانتیمتر با آجر نسوز

پوشانده شود .

مورد ۱۰۱۰۵۹

صنعت : برق (کندانسور بخاری)

جنس نمونه : فولاد کربنی

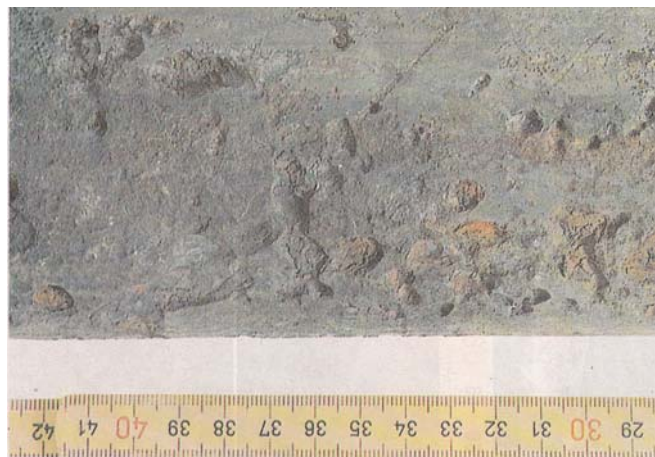
سیستم : بخار چگال شده (Seam Condensate) قسمت : لوله

پدیده : خوردگی در زیر عایق حرارتی (Underneath insulation)

مدت کارکرد : ۱ سال

ظاهر نمونه : حمله بصورت حفره ای در قسمت تحتانی خط لوله صورت گرفته است .

محیط : آب باران . دمای آب چگال 95°C .



علت پدیده : خوردگی بسیار سریعی به علت نفوذ آب باران محتوی اسید و نمک در روی لوله واقع شده است .

روش اصلاح :

- با استفاده از سیستم رنگ مناسب و یا
- عایق بندی حرارتی مناسبتر سیستم (بدون قابلیت نفوذ آب) و یا
- تخلیه کامل آب قسمت تحتانی سیستم بوسیله ایجاد سوراخ ، مشکل مرتفع می شود .

صنعت : برق (کندانسور بخاری)

مورد ۱۰۱۰۶۰

جنس نمونه : فولاد کربنی ST۳۵

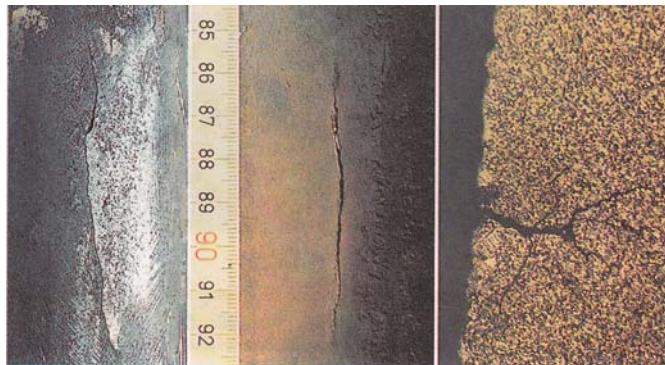
سیستم : سیستم چگالش (Condensate) قسمت : لوله خارجی

پدیده : خستگی حرارتی مدت کارکرد : حدود یک سال

ظاهر نمونه : ترک و شکستگی به طول ۶ سانتیمتر در فاصله ۴ سانتیمتری خط جوش رخ داده است این

ترک در نوک شکست آن دارای شاخه هایی شده است .

محیط : داخل ، آب چگال با کیفیت بالا (هدایت کمتر از ۰/۵ mS/m) . دما : ۶۰-۱۰۰ °C .



خارج : عایق پشم شیشه .

علت پدیده : کیفیت پلین فولاد . آزمایش میکروسکپی نشان داد که فولاد بکار رفته از نوع

pan-Cake/rimmer می باشد . (در مرکز دانه ریز با دانه بندی ۱۰ ASTM و در کناره ها با دانه

بندی ۶ ASTM) در حین فرآیند ساخت فولاد و در طی عملیات نورد ، دانه بندی فولاد درشت گردیده

است . نیروهای مماسی بزرگی ناشی از نوسانات بار و یا تغییرات دمایی در قطعه پدید آمده ، از این رو

ترک خوردگی در جهت برشی در طول مرزدانه ها ایجاد شده است .

روش اصلاح : باید در طول لوله کندانسور ، حلقه هایی را به منظور جذب و استهلاک انبساط و کاهش

تنش ایجاد نمود .

مورد ۱۰۱۰۶۱

صنعت : کارخانه کاغذ سازی

جنس نمونه : فولاد کربنی (فولاد کم آلیاژ)

سیستم : لوله خروجی سوپر هیتز

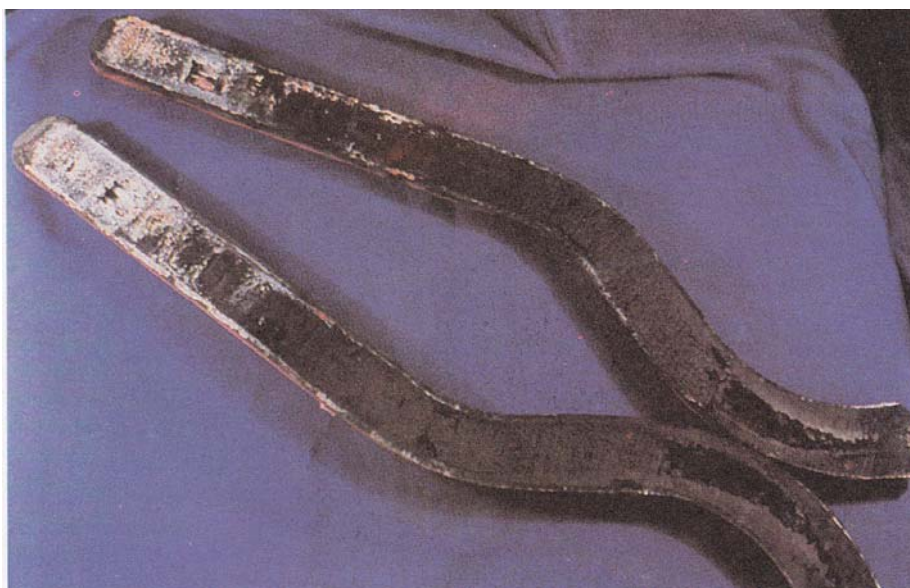
مدت کارکرد : ۳/۵ سال

پدیده : خوردگی حفره ای

ظاهر نمونه : در روی لوله ها ، رسوبات سنگین داخلی قابل مشاهده است . (لایه ای از اکسیدهای نرم و

ریز آهن که در زیر آن ، لایه اکسیدهای سیاه قرار دارد) .

محیط : آب مداوا شده با فسفات ، فشار درام ۹۰۰ psi و فشار آب تغذیه ۹۰۰ psi است .



علت پدیده : علت رسوب گرفتگی آلودگی طولانی مدت آب و تراوش انلاح آب دیگ بخار از درام بداخل

سوپر هیتز بوده است . با تبدیل شدن آب به بخار نتیجتاً مقادیری نمک بر جای مانده است .

روش اصلاح : با کنترل سطح درام و همچنین پایین نگاهداشتن میزان املاح آب دیگ بخار مشکل مرتفع می

شود .

مورد ۱۰۱۰۶۲

صنعت : آب و فاضلاب (شبکه آب شهری)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : لوله کشی آب سرد شهری (Tapwater)

پدیده : خوردگی ناشی از فعالیتهای میکروبی

مدت کارکرد : نامعین

ظاهر نمونه : حفرات در زیر برآمدگیهای خوردگی قابل مشاهده است .

محیط : آب متوقف شده در لوله که در سطح لوله ، رسوبات سولفاتی و همچنین محصولات خوردگی قابل

مشاهده می باشد .



علت پدیده : باکتریهای احیاء کننده سولفات در زیر رسوبات شروع به رشد نموده ، و نهایتاً سولفات را به

سولفید احیاء می کنند ، سولفید حاصله خوردگی شدیدی بر اکثر فلزات دارد .

روش اصلاح : با استفاده از مواد میکروب کش و تمیز نمودن لوله ها و حذف مناطق ساکن در لوله ها می

توان از این پدیده جلوگیری نمود .

مورد ۱۰۱۰۶۳

صنعت : کندانسور بخاری

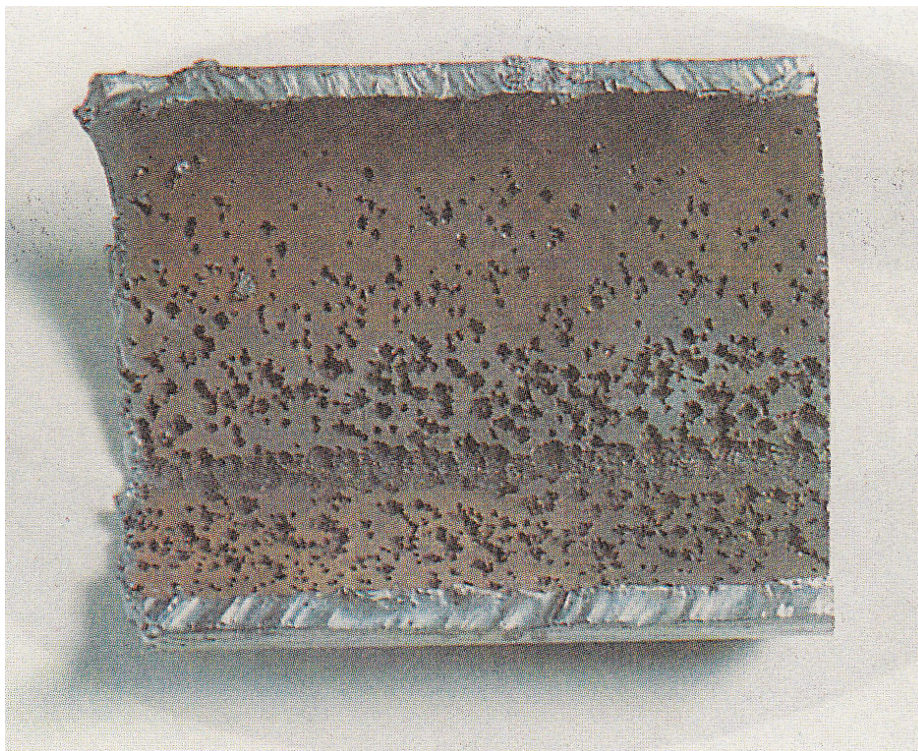
جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : لوله های افقی کندانسور

پدیده : خوردگی حبابی (Cavitation) مدت کارکرد : بیش از دو سال

ظاهر نمونه : صدماتی به صورت خطوط مورب به خصوص در قسمت بالایی لوله دیده می شود .

محیط : آب چگال حاوی اسید کربنیک می باشد .



علت پدیده : بدلیل نشتی مخلوطی از بخار و آب کندانسه شده به لوله اصلی خط تغذیه ، اختلاف فشاری

در سیستم ایجاد می شود که این امر سبب حفره دار شدن (کاویتاسیون) لوله شده است .

روش اصلاح : طراحی صحیح .

مورد ۱۰۱۰۶۴

صنعت : برق نیروگاه حرارتی

جنس نمونه : فولاد کم کربن

سیستم : سیستم بخار با فشار ۸۰ بار

قسمت : فلانچ (Flange) لوله خط بخار به

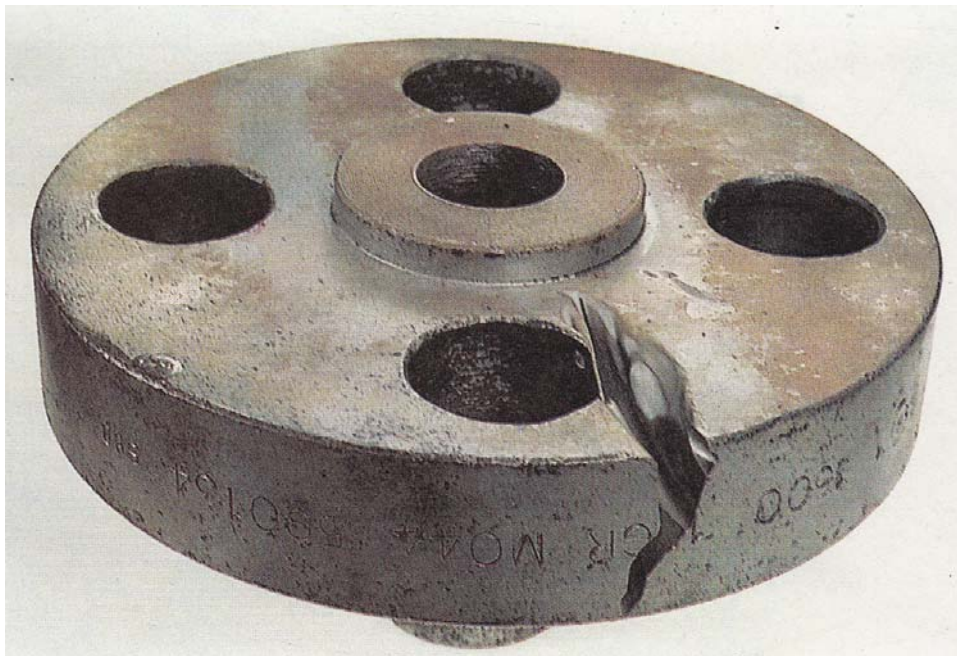
توربین

پدیده : سایش

مدت کارکرد : ۲ تا ۳ روز

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی در نمونه رخ داده است

محیط : بخار در فشار ۸۰ بار که تا 350°C گرم شده است .



علت پدیده : نشت بخارهای بسیار داغ ، سبب بریدگی و شکاف در فلانچ می شود .

روش اصلاح : جلوگیری از نشت بخار و بکار بردن فلانجهای مناسب .

مورد ۱۰۱۰۶۵

صنعت : پتروشیمی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سیستم حرارت مرکزی

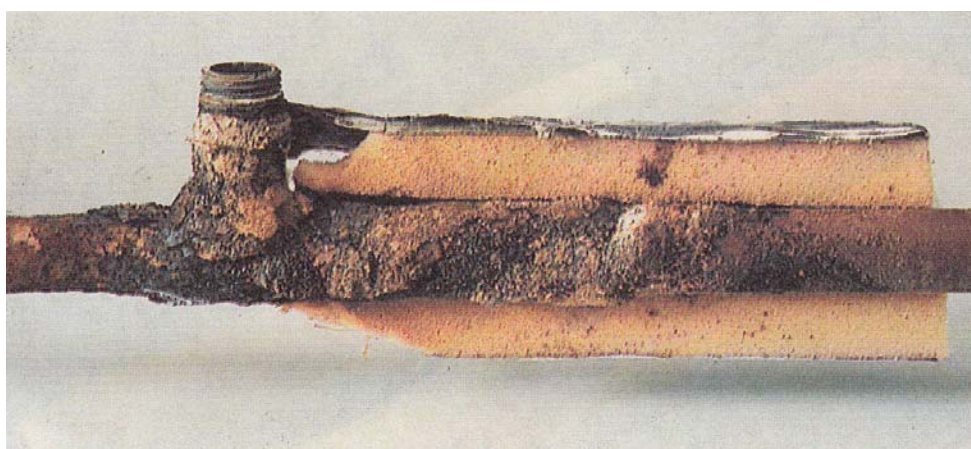
قسمت : لوله عایق شده

پدیده : خوردگی زیر عایق

مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : در قسمت خارجی لوله ، در محل نشستی خوردگی یکنواختی مشاهده می شود.

محیط : عایق رطوبتی (Wetted insulation) (پلی سیانورات ، PIR)



علت پدیده : رزوه کردن نامناسب سبب شده است که آب بندی به درستی انجام نگیرد . بنابراین آب داغ در این محل نشست می کند و در اثر تبخیر آب ، مقدار نمک در زیر عایق بالا می رود (غلظت NaCl در رسوب مرطوب ۲۶٪ است) . فولاد توسط این نمک که شامل رطوبت و اکسیژن است مورد حمله قرار می گیرد .

روش اصلاح : به کار بردن اتصالات با رزوه مناسب به صورتی که امکان کاربرد واشره‌های آب بندی میسر باشد . همچنین بکار بردن یک آب بند مناسب با رزوه ها مانند طناب های (Hemp) عایق می تواند باعث جلوگیری از به وجود آمدن این خوردگی شود .

مورد ۱۰۱۰۶۶

صنعت : فولاد سازی

جنس نمونه : فولاد

قسمت : سوپر هیتر اولیه

سیستم : دیگ بخار

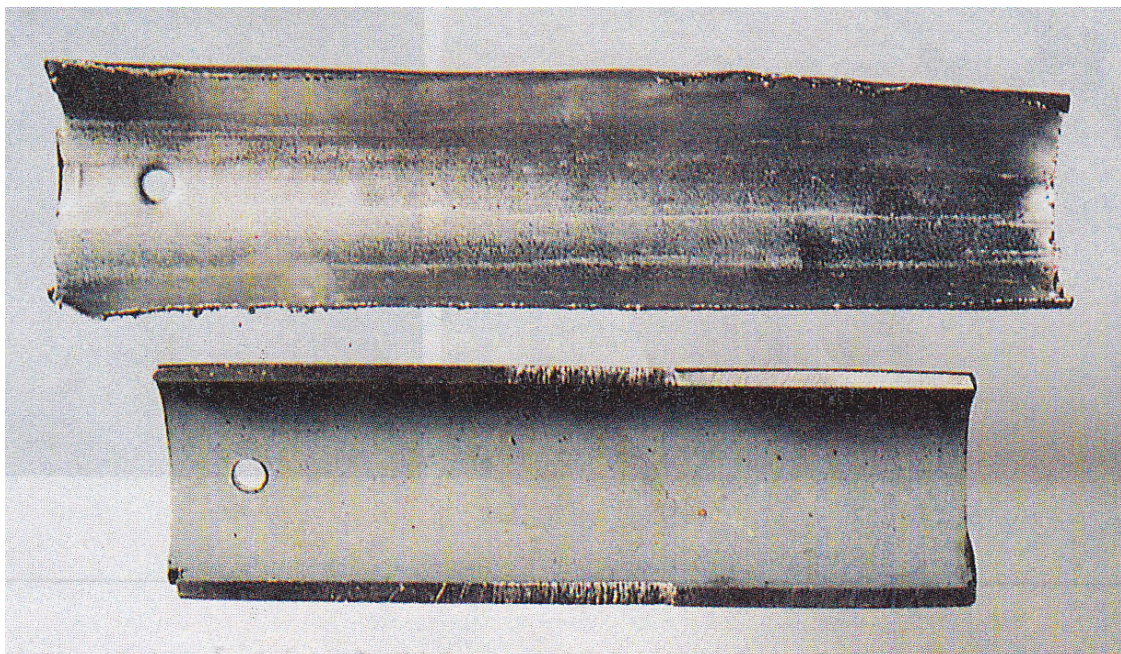
مدت کارکرد : ۳ سال

پدیده : بیش از حد گرم شدن

ظاهر نمونه : سطوح داخلی عاری از رسوبات قابل توجه بودند ، در حالی که سطوح خارجی با یک لایه

اکسید چسبنده و جدا شده پوشیده شده بود .

محیط : آب مداوا شده با پلیمر ، فشار دیگ بخار ۱۲۰۰ Psi ، نوع سوخت گاز کک



علت پدیده : دیگ بخار مزبور از گرمای اضافی یک کوره تحتال گرم شده و لوله های مذکور برای مدت

چند روز و یا بیشتر در دمای بالاتر از 540°C و پایین تر از 730°C قرار داشتند .

روش اصلاح : بایستی با طراحی صحیح از اورهیت شدن لوله ها جلوگیری شود . غالباً بیش از حد گرم

شدن بدلیل وجود رسوبات بیش از حد در داخل لوله می باشد با تنظیم و کنترل شیمیایی آب دیگ بخار و

همچنین اسید شویی مرتب ، می توان از ایجاد این مشکل جلوگیری نمود .

مورد ۱۰۱۰۶۷

صنعت : کارخانه قند

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دستگاه پیش گرم کن (economiser)

قسمت : لوله های افقی

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی و سوراخهای پدیدار شده در شکل نشان دهنده خوردگی بیرونی لوله می باشد .

ضمن آنکه پره های لوله بطور شدیدی دچار خوردگی شده است .

محیط : دیگ مذکور از نفت کوره استفاده می کند که مقدار گوگرد آن ۱/۹ درصد است .



علت پدیده : در یمان شستشوی محفظه کوره ، pH آب شستشو ، اسیدی می باشد ، اسید سولفوریک

ایجاد شده در طولانی مدت سبب خوردگی و زوال لوله ها شده است .

روش اصلاح : سطوح داخلی دیگ بخار (محفظه احتراق) بایستی بطور مرتب با آبی که حاوی قلیا می

باشد شستشو شود . عملیات شستشو بایستی تا حذف کامل رسوبات خورنده ادامه یابد . ضمن آنکه

استفاده از بازدارنده های مخصوص برای عملیات شستشو توصیه می شود .

مورد ۱۰۱۰۶۸

صنعت : تهویه مطبوع

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سیستم گرمایی اتوکلاو (با نوع روغنی)

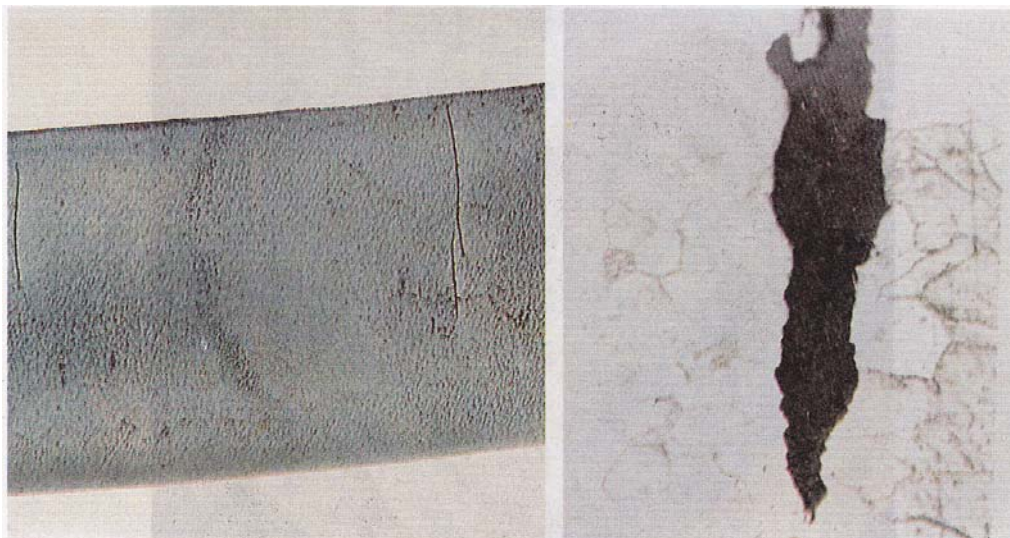
قسمت : قسمت خارجی سیم پیچ حرارتی

پدیده : خوردگی خستگی

مدت کارکرد : ۱۵ سال

ظاهر نمونه : شکافهای موازی ریز در روی سطح

محیط : خارج: اتمسفر صنعتی ، محیط داخل : روغن داغ با درجه حرارت $270-340^{\circ}\text{C}$.



علت پدیده : تنش های ایجاد شده بوسیله تغییرات درجه حرارت ، همراه با خوردگی اتمسفری سبب زوال

سیم پیچ گردیده است .

روش اصلاح : بهبود در طراحی بمنظور کاهش تغییرات درجه حرارت و همچنین استفاده از مواد بهتر .

مورد ۱۰۱۰۶۹

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد غیر آلیاژی

سیستم : برج جذب CO_2

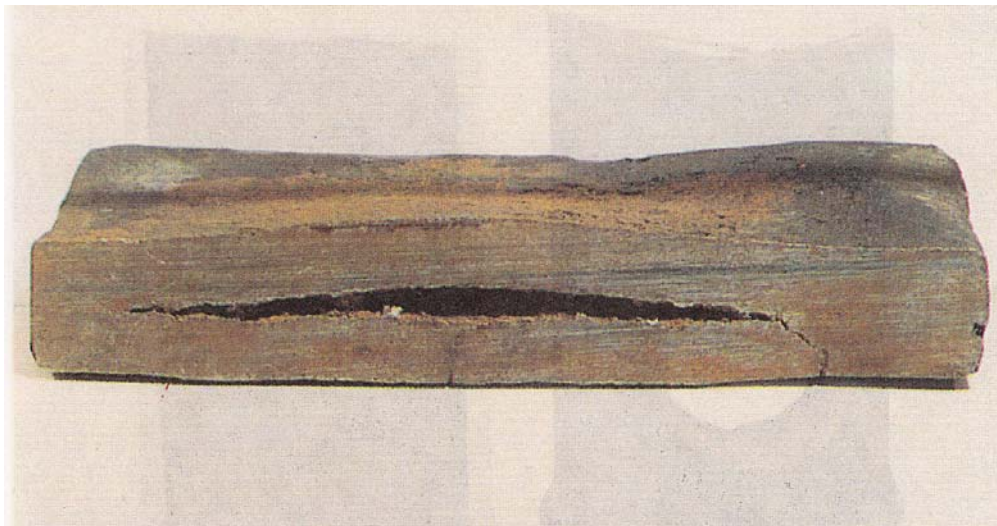
قسمت : دیواره برج

پدیده : حمله هیدروژن سرد (Cold Hydrogen Attack)

مدت کارکرد : چندین سال

ظاهر نمونه : ایجاد حفره در فولاد .

محیط : حاوی CO_2



علت پدیده : هیدروژن اتمی فولاد نفوذ می نماید . هیدروژن اتمی در داخل فولاد به H_2 تبدیل می شود .

فشار ایجاد شده در داخل فولاد سبب زوال آن می شود .

روش اصلاح : بایستی از فولاد با خلوص بالاتری استفاده شود . و یا با قبول میزان خوردگی ، نسبت به

تعویض قطعات منظم اقدام شود .

مورد ۱۰۱۰۷۰

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سیستم آب خنک کن

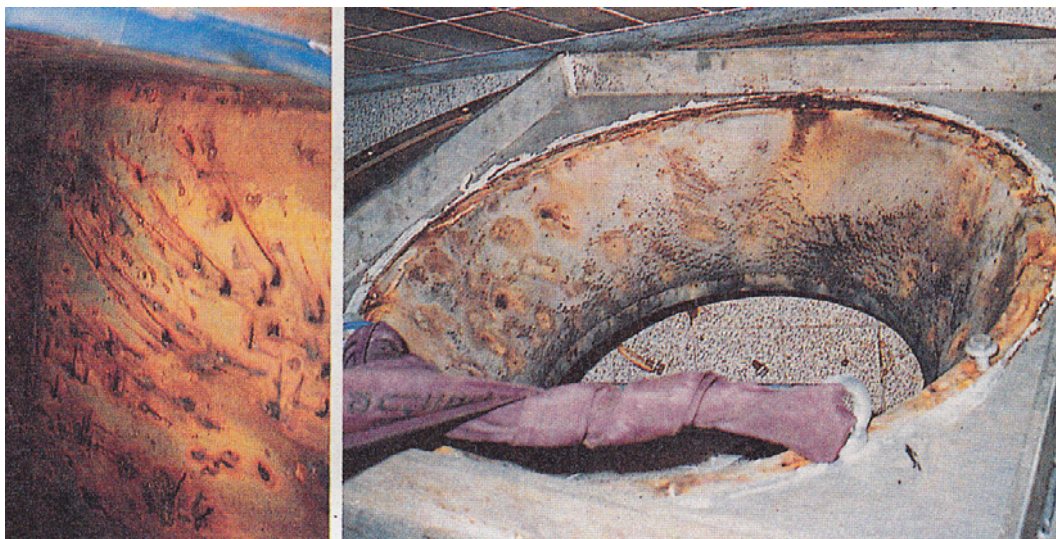
قسمت : مقطع لوله به همراه انشعاب آن

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : ۲ تا ۲/۵ سال

ظاهر نمونه : حفره های موضعی در لوله .

محیط : آب خنک کن که بمنظور انجام بعضی از فرآیندهای شیمیایی بطور متناوب به آن هوا تزریق می شود .



علت پدیده : تلاطم شدید ایجاد شده در اثر تزریق هوا .

روش اصلاح :

- هوا بایستی به طریقی به سیستم تزریق شود تا ایجاد تلاطم نکند (در مسیر و هم جهت با جریان آب) .

- با نصب صفحات موجگیر ، از ایجاد تلاطم جلوگیری شود .

مورد ۱۰۱۰۷۱

صنعت : غذایی

جنس نمونه : فولاد ۳۷

قسمت : لوله انتقال

سیستم : آبجو سازی

مدت کارکرد : ۴ سال

پدیده : سایش

ظاهر نمونه : بطور وسیعی دچار خوردگی شده است .

محیط : دانه های جو که با فشار هوا در داخل لوله منتقل می شوند (دما °C ۷۵) .



علت پدیده : ذرات دانه های جو که سرعت بالایی دارند ، باعث به وجود آوردن سایش در لوله ها می

شوند

روش اصلاح : باید ضخامت لوله ها را افزایش داد .

مورد ۱۰۱۰۷۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : صفحه

سیستم : دستگاه شستشوی گاز

مدت کارکرد : ۵ سال

پدیده : خوردگی اسید کربنیک

ظاهر نمونه : خوردگی شدید

محیط : آب حاوی دی اکسید کربن بمیزان ۱۶-۲۹ درصد .



علت پدیده : اسید کربنیک موجود در آب سبب خوردگی فولاد می شود .

روش اصلاح : فولاد در مقابل اسید کربنیک مقاوم نیست بایستی در زمان تعمیرات ، از پوشش کول تار

اپوکسی برای پوشش دهی داخل دستگاه استفاده شود .

مورد ۱۰۱۰۷۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی (ASTM A ۱۰۶/grade)

سیستم : سیستم انتقال اسید سولفوریک

قسمت : زانویی لوله

پدیده : شیاری شدن ئیدروژنی (hydrogen grooving)

مدت کارکرد: چند سال

ظاهر نمونه : یک شیار تیز بلند به پهنای ۱/۵ mm.

محیط : اسید سولفوریک ۹۵٪ دما حداکثر ۲۵°C ، دمای دیواره لوله ۴۰°C.

فشار ۳/۵ بار ، سرعت ۱ m/s



علت پدیده : فولاد کربنی در برابر اسید سولفوریک غلیظ در دمای اتاق و سرعت جریان پایین (کمتر از ۰/۹ m/s) ، بدلیل تشکیل لایه محافظ سولفات فرو ، مقاومت خوبی را نسبت به خوردگی داراست . (نرخ خوردگی ۰/۵mm/yr) در شرایط خاص (هنگامی که اسید قوی ساکن می باشد) حبابهای ئیدروژن با نفوذ لایه مذکور سبب تخریب آن می شوند . در این حال خوردگی موضعی می تواند تا حدود ۳ mm/yr و یا بیشتر افزایش یابد .

روش اصلاح : استفاده از پوششهایی از جنس شیشه یا Hypalon در مناطق مستعد به شیار ئیدروژنی .

- ساخت قطعات از جنس فولاد AISI۳۱۶ برای غلظتهای اسید سولفوریک ۹۰٪ تا به ۱۰۰٪.

- استفاده از پوششهایی در مخازن از آلیاژهای ۲۰-cb-۳ Carpenter alloy یا Hastelloy C ۲۷۶

برای حفاظت در برابر اسید سولفوریک ۱۰۵-۷۰٪.

جنس نمونه : فولاد Corten (فولاد کربنی که با سرعت پایین زنگ می زند و حاوی چند ده درصد منگنز ،

مس ، سیلیکون و کرم است) .

سیستم : سازه های مهندسی عمران

قسمت : سمت چپ : میله های (حفاظهای) بالکن یک آپارتمان ؛ سمت راست : نگهدارنده قسمتی از باند یک

فرودگاه .

مدت کارکرد : بترتیب ۳ و ۵ سال

پدیده : خوردگی اتمسفری

ظاهر نمونه : فولاد Corten بطور یکنواخت خورده شده ، و محصولات خوردگی به سازه بتونی نفوذ

کرده اند.

محیط : اتمسفر دریایی .



علت پدیده : فولاد Corten توسط یک لایه زنگ فشرده و با قابلیت اندک در جذب رطوبت بدلیل وجود

عناصر آلیاژی در آن پوشیده می شود ، ولی در درازمدت نسبت به خوردگی در محیطهای اتمسفر دریایی

و صنعتی مقاوم نیست .

روش اصلاح : هر چند که فولاد Corten بدلیل زیبایی ظاهری خود بسیار مورد استفاده قرار می گیرد ،

ولی کثیفی و لکه دار شدن ساختار بتونی قابل قبول نخواهد بود . در چنین مواردی ، بهتر است از فولاد

پوشش دار یا گالوانیزه استفاده شود .

مورد ۱۰۱۰۷۵

صنعت : نفت

جنس نمونه : فولاد بسمر (API SL grade B)

سیستم : واحد تقطیر نفت خام

قسمت : لوله فرآیند

پدیده : پیر تردی (Age embrittlement)

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : شکست ترد .

محیط : نفت خام تقطیر شده



علت پدیده : پیر شدن (Ageing) فولاد که سبب تردی در درجه حرارت بالا می شود .

روش اصلاح : استفاده از فولاد که به پدیده مذکور حساس نباشد (انتخاب مواد بهتر)

مورد ۱۰۱۰۷۶

صنعت : برق (نیروگاه بخار)

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵,۸)

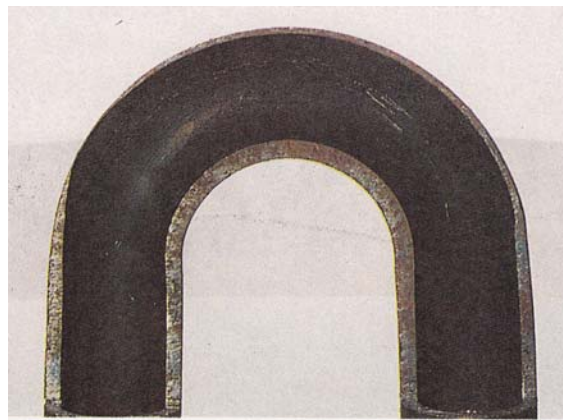
سیستم : دیگ بخار

قسمت : لوله دستگاه پیش گرم کن

پدیده : خوردگی سایشی (Erosion Corrsion) مدت کارکرد : حدوداً ۲ سال

ظاهر نمونه : فلز بطور موضعی در قسمتهای خمیده ساییده شده و از بین رفته است .

محیط : آب تغذیه دیگ بخار ، عاری از مواد معدنی و هوا ، سرعت بخار $1/74 \text{ m/s}$



علت پدیده : ایجاد بخار در دستگاه پیش گرم کن بر اثر توزیع نامنظم گازهای احتراق و دمای غیر یکنواخت آن . بررسی ها نشان می دهد که جذب حرارت توسط دستگاه پیش گرم کن بیش از حد مجاز طراحی بوده است .

روش اصلاح :

- کوتاه کردن دستگاه پیش گرم کن
- یکنواخت کردن سرعت و دمای گازهای احتراق
- یکنواخت کردن دمای آب بوسیله قرار دادن یک جعبه آب (water -box) در دستگاه پیش گرم کن
- ساخت دستگاه پیش گرم کن از فولادهایی مقاوم تر به سایش (فولادهایی با بیش از ۱٪ کروم ، مس و مولیبدن) .

مورد ۱۰۱۰۷۷

صنعت : تأسیساتی (تهویه مطبوع)

جنس نمونه : فولاد کربنی که به مس لحیم شده است .

سیستم : دستگاه خنک کننده فرئون

قسمت : لوله مکنده کمپرسور

پدیده : خوردگی گالوانیکی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی شیاری بر روی سطح فولاد

محیط : مایع شدن بخارات بر روی لوله ای که هیچ پوششی ندارد .



علت پدیده : آب حاوی مس از لوله های مسی به سمت لوله های فولادی بخار حرکت می کند و نهایتاً

ذرات مس بر روی لوله های آهنی را سبب شده و خوردگی گالوانیکی را ایجاد می کند .

روش اصلاح : با عایق مناسب بایستی لوله را پوشانید تا قطرات آی حاوی مس بر روی آن ریخته نشود .

مورد ۱۰۱۰۷۸

صنعت : مولد برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد کربنی (با ضخامت دیواره ۴ mm)

سیستم : کندانسور بخاری

قسمت : لوله

پدیده : خوردگی اکسیژنی

مدت کارکرد : ۸ ماه

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای عمیق بدون محصولات خوردگی

محیط : آب دیگ بخار آلوده شده به اکسیژن ، درجه حرارت 90°C - 90°C .



علت پدیده : پدیده خوردگی به دلیل حضور بالای اکسیژن در سیستم می باشد ، ضمن آنکه دستگاه هوازدا خوب کار نمی کند . ضمناً بدلیل طراحی غلط در جدا کننده های آب از بخار ، قطرات آب دیگ بخار وارد بخار شده که آلودگی آن را تشدید نموده است .

روش اصلاح : استفاده از مواد جاذب اکسیژن .

- تعمیر دستگاه هوازدا (deaerator)

- تنظیم صفحات جدا کننده آب و بخار .

مورد ۱۰۱۰۷۹

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : فولاد کربنی و چدن

سیستم : دستگاه حرارت مرکزی

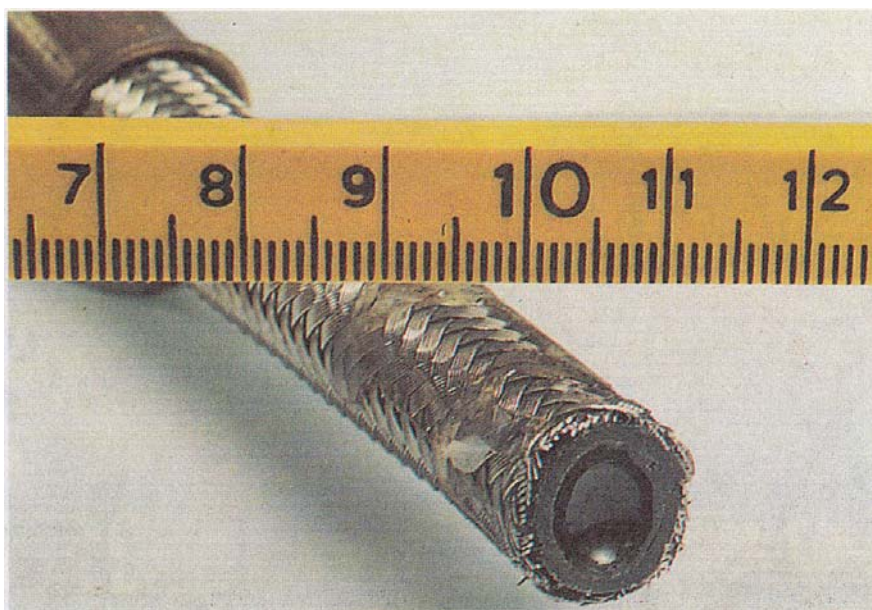
قسمت : لوله اتصال رادیاتور ساخته شده از پلی تترافلورواتیلن (PTFE teflon) .

پدیده : خوردگی اکسیژنی

مدت کارکرد : چندین سال

ظاهر نمونه : رسوب سیاه ایجاد شده اکسید آهن (مگنتیت) باعث مسدود شدن کامل لوله شده است .

محیط : آب گرم کن بدون تصفیه شیمیایی با دمای $70-90^{\circ}\text{C}$.



علت پدیده : خوردگی دیگ بخار فولادی و نفوذ اکسیژن به داخل آب ، سبب ایجاد محصولات خوردگی در

لوله شده و نهایتاً به گرفتگی آن منجر شده است .

روش اصلاح : شستشوی شیمیایی سیستم .

- نرم نمودن آب مصرفی و گرفتن سختی آن و استفاده از مواد جاذب اکسیژن و بهبود کیفیت آب .

مورد ۱۰۱۰۸۰

صنعت : فولاد سازی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دیگ بخار

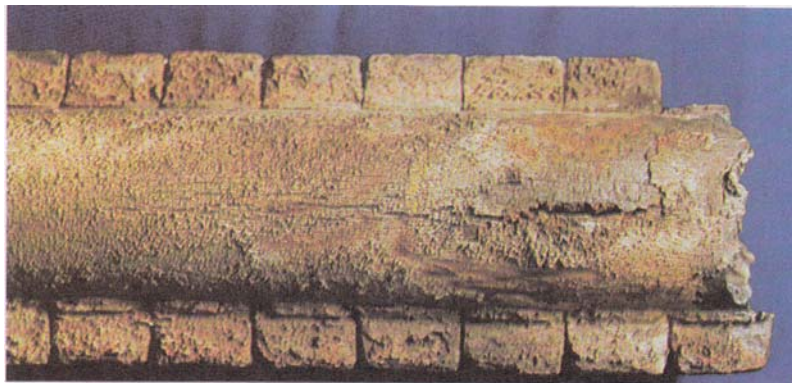
قسمت : لوله های دیگ بخار

پدیده : بیش از حد حرارت دیدن

مدت کارکرد : ۸ سال

ظاهر نمونه : ترکهای طولی همراه با برآمدگی پاره شده در قسمت گرم لوله و طول آن قابل مشاهده است .

محیط : آب مداوا شده با فسفات ، فشار دیگ ۱۲۰۰ Psi



علت پدیده : بررسی های به عمل آمده نشان می دهد دمای فلز بین ۴۵۴ تا ۵۶۶ درجه سانتیگراد بوده است که برای مدت طولانی تحت شرایط بیش گرمایشی شدن قرار داشته است .

روش اصلاح : با تمیز نمودن رسوبات و اسید شویی و کنترل میزان املاح آب دیگ بخار و همچنین تقلیل درجه حرارت ایجاد شده در کوره مشکل مرتفع می شود .

مورد ۱۰۱۰۸۱

صنعت: کاغذ سازی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دستگاه پیش گرم کن

قسمت : لوله های آب دیگ بخار

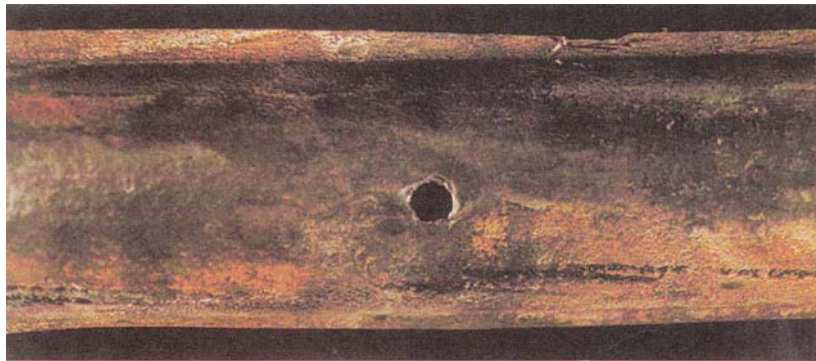
پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : ۱۳ سال

ظاهر نمونه : سوراخی به قطر $\frac{3}{4}$ اینچ در مرکز که شدیداً از خارج خورده شده است . خوردگی

فرورفتگیهای عمیق و گسترده ای در سطح ایجاد کرده است .

محیط : داخل لوله : آب دیگ بخار که با استفاده از پلیمر مداوا شده است .



خارج لوله : سمت آتش می باشد که از نفت کوره استفاده می نماید .

علت پدیده : سطوح خارجی لوله ها واقع در کوره سالیانه دوباره مورد شستشو با آب قرار می گرفت ،

بدلیل استفاده از نفت کوره که حاوی گوگرد بالا می باشد ، شستشوی ناقص با آب سبب می شود تا لوله

از قسمت خارجی مورد حمله اسید سولفوریک ایجاد شده قرار گیرد .

روش اصلاح : سطوح داخلی دیگ بخار (سطح بیرونی لوله ها) بایستی به طور مرتب با آب حاوی قلیا

شستشو شود . عملیات شستشو بایستی تا حذف کامل رسوبات خورنده ادامه یابد . ضمن آنکه استفاده از

بازدارنده در آب شستشو توصیه می شود .

مورد ۱۰۱۰۸۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : لوله

سیستم : دیگ بخار

مدت کارکرد : ۵ سال

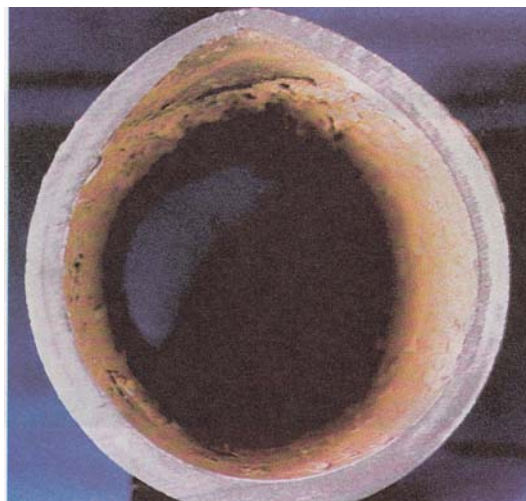
پدیده : بیش از حد حرارت دیدن

ظاهر نمونه : رسوبات زیادی در داخل لوله تشکیل شده است که حاوی نمکها ، کربنات کلسیم ، سیلیکات

کلسیم ، فسفات کلسیم و هیدروکسید منیزیم سیلیکات می باشد .

محیط : فشار درام ۴۲۵ psi ، با سوخت گاز طبیعی و نفت کوره کار می کند ، آب مداوا شده با مواد

پلیمری



علت پدیده : دیگ بخار با ظرفیت ۹۰۰۰۰ پوند بخار در ساعت بطور متناوب برای مدت بیشتر از یک سال

در سرویس بوده است ، در حالی که همین دیگ بخار برای ۷۵۰۰۰ پوند بخار در ساعت طراحی شده بود .

روش اصلاح : تشکیل رسوب ناشی از وارد شدن حرارت زیاد به کوره و همچنین بالا بودن مقدار املاح

آب دیگ بخار بوده است . با کنترل این دو پارامتر مشکل مرتفع می شود.

جنس نمونه : فولاد کم آلیاژ (۰.۵ CrMo)

سیستم : واحد تقطیر در خلأ بالا

قسمت : لوله سقفی کوره (roof furnace tube)

پدیده : شکست بر اثر بیش از حد حرارت دیدن مدت کارکرد : حدود ۸ سال

ظاهر نمونه : در داخل رسوب کک و در خارج لوله تشکیل خوردگی و تقلیل ضخامت دیواره .

محیط : خارج لوله : گازهای احتراق در 410°C ، داخل لوله : هیدروکربنهای حاصل از تقطیر اولیه .



علت پدیده : بدلیل تشکیل رسوبات ککی در قسمت داخلی لوله ، اتصال حرارت بخوبی انجام نمی شود .

زیرا عبور محلول هیدروکربن از داخل لوله بایستی سطح لوله را خنک نماید . ضمن آنکه گازهای حاصل از

احتراق بدلیل دارا بودن مواد خورنده ، قسمت بیرونی لوله را مورد حمله قرار می دهد . عوامل فوق سبب

شکست لوله می شود .

روش احتراق :

- حذف و زدودن رسوبات ککی داخل لوله با بخار و یا سایر روش های شستشوی دیگر

- بازرسی منظم ضخامت لوله و اطمینان از کیفیت مطلوب لوله ها با توجه به استانداردهای موجود .

مورد ۱۰۱۰۸۴

صنعت : آب خنک کن یک واحد صنعتی

جنس نمونه : فولاد کربنی از نوع (sherardized)

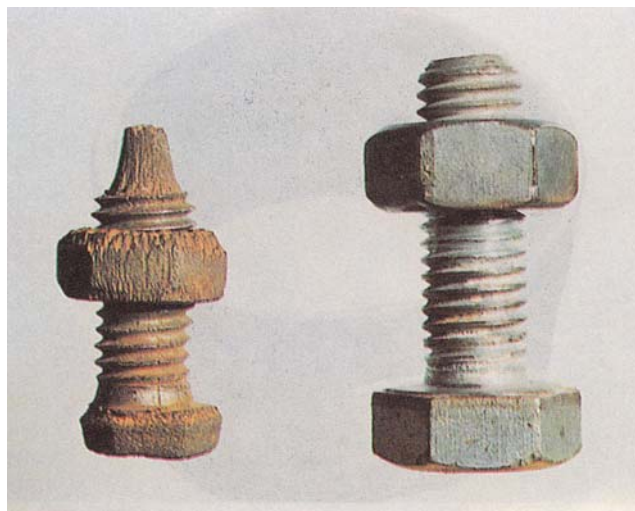
سیستم : سیستم آب خنک کن

قسمت : سمت چپ : پیچ و مهره پمپ فیلتر آب خنک کن خورده شده ؛ سمت راست : پیچ سالم .

پدیده : خوردگی گالوانیکی مدت کارکرد : چند ماه

ظاهر نمونه : خوردگی شدید یکنواخت در روی کل سطح .

محیط : آب رودخانه .



علت پدیده : پیچ و مهره مذکور بدلیل زوج گالوانیکی ایجاد شده بین پیچ و مهره از جنس فولاد کربنی و

بدنه

پمپ که از نوع فولاد زنگ نزن است خورده شده است .

روش اصلاح : استفاده از پیچ و مهره از جنس فولاد زنگ نزن (مطابق با نوع بدنه پمپ)

مورد ۱۰۱۰۸۵

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : خط قطع و وصل گاز (off-gas ling)

سیستم : دستگاه مخصوص شستشوی بنزن که از ماده شوینده حاوی سود استفاده می کند .

پدیده : خوردگی تنش (تردی قلیایی)

مدت کارکرد : ۶ ماه

ظاهر نمونه : ترک خوردگی انتخابی در مناطق متأثر از حرارت (HAZ) در مجاورت جوش.

محیط : بنزن حاوی قطرات سود ، دما 80°C .



علت پدیده: وجود تنش و همچنین سود موجود در محیط سبب خوردگی تنش مناطق جوش در این درجه

حرارت می شود .

روش اصلاح : عملیات حرارتی تنش زدایی پس از جوشکاری .

مورد ۱۰۱۰۸۶

صنعت : فلزی (ذوب روی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

مدت کارکرد : حدود یک سال

سیستم : کوره بازیاب سرباره روی (از نوع پیوسته گرمایی) کوره simson

قسمت : حلقه زنجیر آهنی

پدیده : تردی ناشی از فلز در فاز گازی (Gaseous metal embrittlement)

ظاهر نمونه : پوسته های سطحی که بصورت ورقه ای کنده می شوند ، به همراه شکست ترد .

محیط : بخارات روی (Zine Vapiurs) در دمای $450-600^{\circ}\text{C}$ در قسمت فوقانی کوره ، دمای کاری

کوره زیر 1800°C .



علت پدیده : بخارات روی در مرز دانه های فولاد (زنجیر) نفوذ کرده ، این امر سبب تشکیل ترکیبات بین

فلزی آهن روی می گردد که دارای اثر ترد کننده می باشند . در مرکز (قسمت داخلی) حلقه زنجیر ،

۴۰۰ppm روی یافت گردید . که این قسمت برای خارجی ۱۰۰۰۰ppm بود ، با توجه به پدیده «تردی ناشی

از فلزات» می توان این حالت را نیز «تردی ناشی از بخار فلز» نامید .

روش اصلاح : زنجیر را از جنس برنج ساخته ، و یا آن را مرتباً تعویض نمایید .

مورد ۱۰۱۰۸۷

صنعت : کاغذ سازی

جنس نمونه : چدن فولادی

سیستم : آب تغذیه به دیگ بخار

قسمت : پروانه پمپ

پدیده : حفره زائی

مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : خوردگی حبابی شدیدی در روی پروانه پمپ قابل مشاهده است .

محیط : آب مداوا شده با فسفات ، فشار دیگ بخار ۱۲۰۰ psi



علت پدیده : تأمین آب تغذیه به دیگ بخار مناسب با نیاز آن صورت نگرفته است . پروانه پمپ دستخوش

هدر رفتگی شدید (افت فشار) شده است .

روش اصلاح : خسارت به علت خوردگی حبابی (هواگرفتگی) است که علت آن عدم تأمین فشار کافی و

خالی بودن پمپ می باشد . با رفع این عیب مشکل مرتفع می شود .

مورد ۱۰۱۰۸۸

صنعت : گاز

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سیستم انتقال گاز

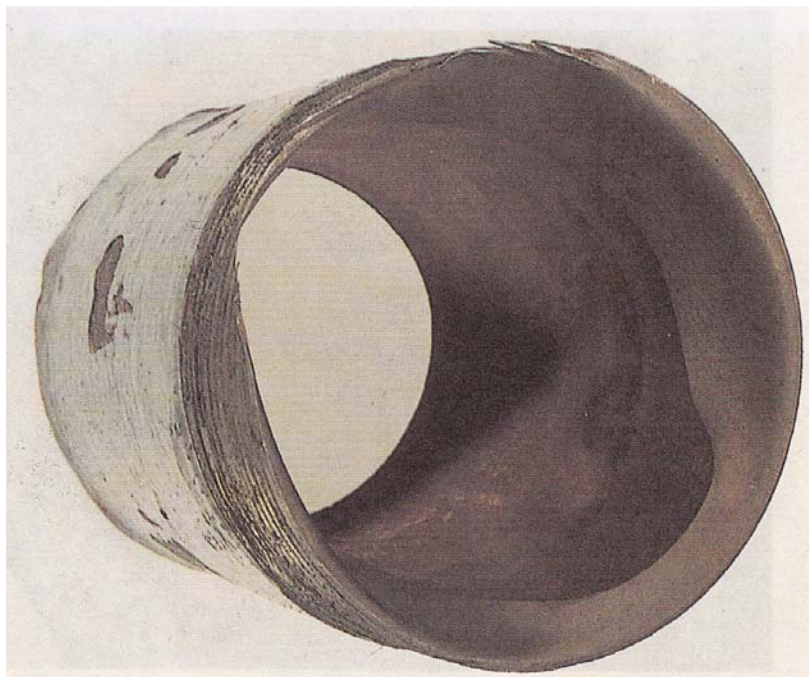
قسمت : مغزی پیچ شده در نزدیکی گلوگاه (ضخامت دیواره ۱۴mm)

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد: چند سال

ظاهر نمونه : سطح نمونه به شکل ملایم ساییده و ضایع شده است .

محیط : گاز طبیعی حاوی ذرات جامد می باشد .



علت پدیده : سرعت بالای جریان گاز در محل گلوگاه به مغزی (nipple) به همراه ذرات ریز جامد موجود

در گاز سبب پدید آمدن این خوردگی شده اند .

روش اصلاح : سرعت جریان را کاهش دهید .

مورد ۱۰۱۰۸۹

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : قطعه گوشواره ای از یک زنجیرسیستم : احیاء کننده ترکیبات حلقوی (سیکلونها)

پدیده : خزش

مدت کارکرد : چند هفته

ظاهر نمونه : ترک خوردگی به همراه شکست .

محیط : اتمسفر CO/CO_2 ، دمای کاری 620°C ، در مواردی تا 800°C ، فشار حدود ۰/۵ bar



علت پدیده : فولاد مذکور به دلیل نداشتن مولیبدن ، دارای مقاومت خزشی کمی می باشد و لذا در محیط

فوق الذکر دچار زوال شده است .

روش اصلاح : استفاده از فولاد مولیبدن دار

مورد ۱۰۱۰۹۰

صنعت : نفت

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دستگاه تقطیر سازی که در خلأ بالا کار می کند. قسمت : خط بخار (لوله)

پدیده : خوردگی سایشی مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : تصویری از خوردگی حفره ای بر روی مقطع لوله .

محیط : هیدروکربنها به همراه مقادیری از اسید نفتانیک . دما 300°C .



علت پدیده : علت این پدیده ، استفاده مرکب و همزمان از لوله های ASTM و API بوده که فقط لوله های

API دچار این نوع تخریب گشته اند .

روش اصلاح :

- از لوله های ASTM استفاده شود .

- اسید نفتانیک را ختشی کنید .

مورد ۱۰۱۰۹۱

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : شبکه فولادی پل

قسمت : قسمتی از تیر حمّال

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد: نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی به صورت لایه لایه ای نذیر تورق (exfoliation) اتفاق افتاده است.

محیط : اتمسفر .



علت پدیده : اتمسفر مرطوب ، فولاد را که بطور ناقص حفاظت شده است مورد حمله قرار می دهد . فرم

حمله توسط ساختار کریستالی کشیده شده در امتداد جهت نورد و تنشهای پس مانده ایجاد شده معین می

گردد ، این نوع از خوردگی را (packing corrosion) نیز می نامند .

روش اصلاح : تیره حمّال را به روشی مناسب پوشش دهید .

مورد ۱۰۱۰۹۲

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : آب تغذیه (بویلر)

قسمت : مقطعی از قسمت گنبدی شکل بخار دستگاه هوازدا

پدیده : حفره زائی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : لوله بطور نامحسوسی خورده شده که نهایتاً منجر به سوراخ شدن آن گردیده است .

محیط : بخار با فشار ۱/۵ اتمسفر



علت پدیده : بدلیل طراحی غلط و ورود بخار در قسمتی که نبایستی از آن ناحیه بخار وارد شود .

روش اصلاح : اصلاح ساختار و طراحی برای پیشگیری از گاویتاسیون

مورد ۱۰۱۰۹۳

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دیگ بخار

قسمت : دریچه بازدید شکل در خط بخار با فشار ۲۰ بار

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی سایشی ستاره شکل در روی شعله ایجاد شده است .

محیط : بخار اشباع به همراه قطرات کندانسه .



علت پدیده : ضربات چکشی آب (water hammer) بر روی دریچه بازدید سبب این مشکل شده است .

روش اصلاح : با حذف آب از بخار مشکل فوق مرتفع می شود .

مورد ۱۰۱۰۹۴

صنعت : دیگ بخار یک واحد صنعتی

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : لوله آب مقطر برگشتی

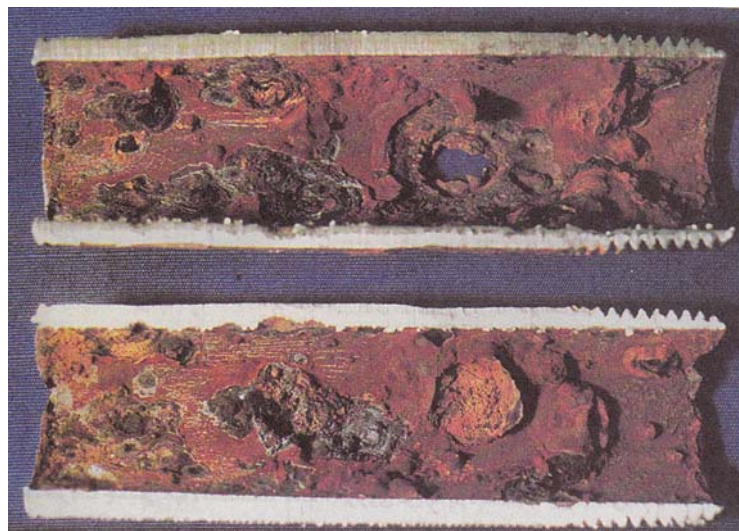
سیستم : دیگ بخار

مدت کارکرد : ۹ سال

پدیده : خوردگی اکسیژنی

ظاهر نمونه : حفره و برآمدگیهایی در داخل لوله مشاهده می شود . ضمن آنکه اکسیدهای فلزی قرمز رنگ در داخل لوله وجود دارد .

محیط : سیستم تحت فشار آب مقطر در طول شرایط کار با حرارت 104°C است . آب تغذیه با آمین های خنثی کننده مداوم شده است .



علت پدیده : حضور بیش از حد اکسیژن در آب تغذیه مسبب این زوال می باشد .

روش اصلاح : بایستی از مواد جاذب اکسیژن نظیر سولفیت سدیم و یا هیدرازین استفاده شود ، ضمناً

توصیه می شود تا بجای آمین های خنثی کننده از آمین های نوع فیلمی استفاده شود .

مورد ۱۰۱۰۹۵

صنعت : دیگ بخار

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵,۸)

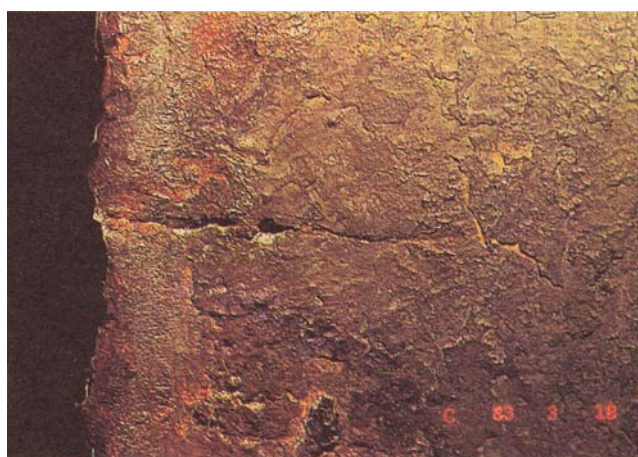
قسمت : انتهای لوله دود (Smok tube)

سیستم : دیگ بخار از نوع (shell type) ، فشار ۷-۸ بار ، گاز سوز

پدیده : ترک خوردگی ناشی از زیاد حرارت دیدن مدت کارکرد : ۱۵ سال

ظاهر نمونه : ترک های متعدد .

محیط : گاز های احتراق خروجی در دمای 191°C .



علت پدیده : لوله به دلیل بیش از حد گرم شدن دچار زوال شده است چنانچه آب داخل لوله می توانست

بقدر کافی لوله مذکور را خنک نماید ، این مشکل ایجاد نمی شود .

روش اصلاح : چنانچه رسوبات داخل لوله با روش شیمیایی شستشو و حذف شوند تبادل حرارت افزایش

یافته ، سطح بیرونی لوله خنک خواهد شد و مشکل مرتفع می شود .

صنعت : نیروگاه تولید برق

مورد ۱۰۱۰۹۶

جنس نمونه : فولاد کربنی کم آلیاژ (۴۴ Cr Mo ۱۳)

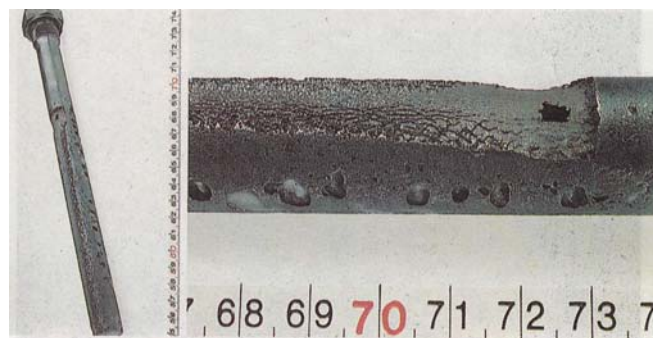
سیستم : سیستم بخار

قسمت : فنر ترمومتر مربوط به لوله بخار اصلی توربین

پدیده : خوردگی سایشی (Erosion) مدت کارکرد : ۱۵ سال

ظاهر نمونه : ابتدا و انتهای لوله بطور موضعی خورده شده ، در حالی که خوردگی قسمت میانی بطور یکنواخت می باشد .

محیط : بخار سوپر هیت . دما 495°C ، فشار ۱۰۰ بار ، سرعت ۳۷m/s .



علت پدیده : ترمومتر درست در محلی قرار دارد که ذرات آب داخل بخار بصورت قطرات آب بر روی این ترمومتر ریخته می شود و سبب خوردگی سایشی این قطعه شده است .

روش اصلاح : ترمومتر بایستی به محلی دیگر منتقل شود ، محلی که مشکل مذکور ایجاد نشود .

مورد ۱۰۱۰۹۷

صنعت : دیگ بخار کارخانه شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵,۸)

قسمت : لوله آب

سیستم : دیگ بخار (با فشار ۴۱ بار)

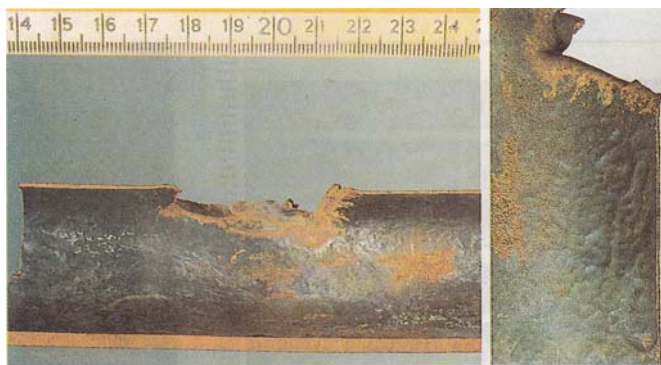
مدت کارکرد : ۶ سال

پدیده : بیش گرمایش (سوختگی)

ظاهر نمونه : حلقه نامنظم داخلی در قسمت فوقانی لوله صورت گرفته است .

محیط : بخار با فشار ۴۱ بار

علت پدیده : در اثر خنک کاری ناکافی لوله های آب ، بخار بیش از حد تولید شده است . حبابهای بخار بدلیل سبکی به قسمت فوقانی لوله ها رانده شده این امر سبب کاهش موضعی و انحلال شدید در خنک کاری و رشد سریع لایه اکسید آهن مغناطیسی بصورت محلی و موضعی گردیده است . اگر حبابها در اثر تغییر فشار از بین بروند ، مجدداً بطور موقت تبادل حرارت انجام شده ، اکسید تشکیل شده بصورت ورقه ای فرو می ریزد . این امر سبب کاهش شدید ضخامت دیواره در طی یک دوره زمانی کوتاه خواهد گردید .



روش اصلاح : با بهبود در طراحی دیگ بخار بنحوی که جریان در لوله های آب افزایش یابد، مشکل

برطرف می شود .

مورد ۱۰۱۰۹۸

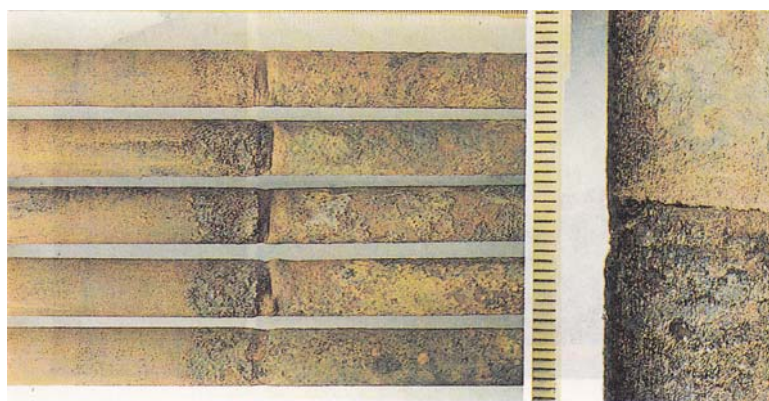
صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵,۸) سیستم : واحد گوگردزدایی از دود خروجی نیروگاه
(desulfurization)

قسمت : لوله هایی از مبدل حرارتی نفت گاز سنگین

پدیده : خوردگی گوگردی مدت کارکرد : ۲/۵ سال

ظاهر نمونه : درست در پشت صفحه لوله ها ، ضخامت دیواره لوله ها از ۲/۵ mm به ۱/۲ mm کاهش یافته است .
محیط : طراف لوله ها : نفت حاوی گوگرد (S ۰/۲۴٪ بیش از H_2S ۰/۱٪ و اندکی H_2) که از دمای $350^{\circ}C$ تا $1550^{\circ}C$ حرارت داده شود .



علت پدیده : خوردگی در دمای بیش از $250^{\circ}C$ بوسیله گوگرد آزاد و سولفید هیدروژن در داغ ترین نقاط
بر اثر ترکیبات آلی گوگرد دار موجود در نفت رخ داده است . حضور H_2 این حمله را تشدید می نماید
ضمناً بر اثر رسوبدهی لجن و گل و لای ، دمای جداره لوله ها بطور موضعی از $2350^{\circ}C$ فراتر رفته است .

روش اصلاح :

- از تشکیل رسوب لجنی جلوگیری کنید (مورد آخر توسط بهبود طراحی امکان پذیر است) و یا ،
- مبدل حرارتی را از فولاد زنگ نزن ۳۱۶L با درصد کربن بسیار کم و پایدار ساز نیوبیم (Nb) بسازید .
برای مثال (W-Nr ۱/۴۵۸۱ یا ۱/۴۵۷۵) .

مورد ۱۰۱۰۹۹

صنعت : نیروگاه حرارتی

سیستم : سیستم تغذیه آب بویلر

جنس نمونه : فولاد کربنی DIN ۱۷۱۵۵

قسمت : دستگاه هوازدا (deaerator) (فشار طراحی شده ۲/۴۵ بار ، دمای طراحی شده 134°C)

مدت کارکرد : ۱۵ سال

پدیده : خوردگی تنشی

ظاهر نمونه : ترک خوردگی در داخل و راستای درز جوش (به وسیله آزمایش ذرات مغناطیسی فلور سنت

(NPFE) نمایش داده شده است) .

محیط : آب تغذیه (فاقد مواد معدنی) ، دما : 105°C ، فشار ۱/۵ بار .



علت پدیده : مکانیزم خوردگی هنوز به طور دقیق مشخص نیست . ولی قطعاً ترکیبی است از تنش های

پس مانده موجود در جوش ها به همراه حمله اکسیژن . بعلاوه ، خوردگی خستگی بر اثر ارتعاشات نیز

ممکن است مؤثر باشد .

روش اصلاح :

- ترک ها را بوسیله سنگ زنی زدوده ، محل را تمیز نموده ، سپس تا دمای 550°C آنیل کنید . آزمایش

ذرات مغناطیسی (NPFE) را بعد از تعمیر تکرار نمایید .

- دستگاه هوازدا را جدید بایستی توسط عملیات حرارتی پس از جوشکاری

(Post Weld Heat Treatment)

مورد ۱۰۱۰۱۰۰

صنعت : نیروگاه بخاری تولید برق

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دیگ بخار فشار بالا

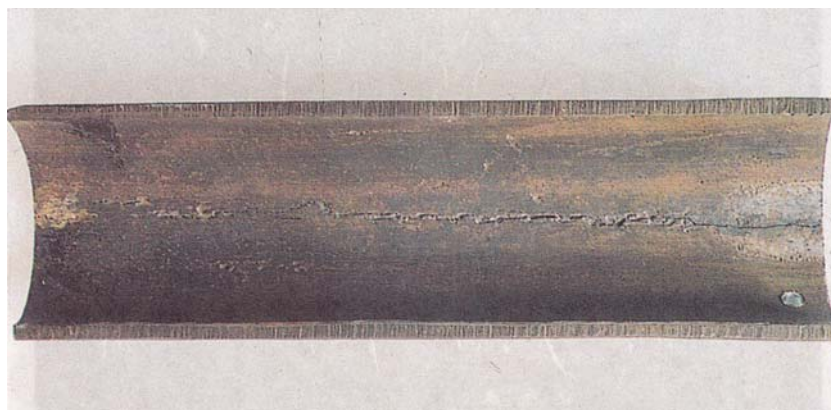
قسمت : لوله دستگاه پیش گرم کن

پدیده : حمله اکسیژن

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : ترک طولانی .

محیط : آب تغذیه بویلر در داخل لوله ، گازهای حاصل از احتراق در پیرامون لوله .



علت پدیده : استتاده از گلوله زنی دوره ای جهت تمیز کاری سطوح مربوط به قسمت دود خروجی (سمت

شعله) موجب از بین رفتن لایه مگنتیت گردید . نقاط آسیب دیده فوق بر اثر وجود مقادیر اندک اکسیژن در

آب تغذیه ، نسبت به خوردگی و حمله بیشتر حساس می شود .

روش اصلاح : تمیز کاری با روشی دیگر نظیر استفاده از روش فراصوتی (Ultrasonic) انجام دهید .

مورد ۱۰۱۰۱۰۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : تولید بخار (با فشار کم)

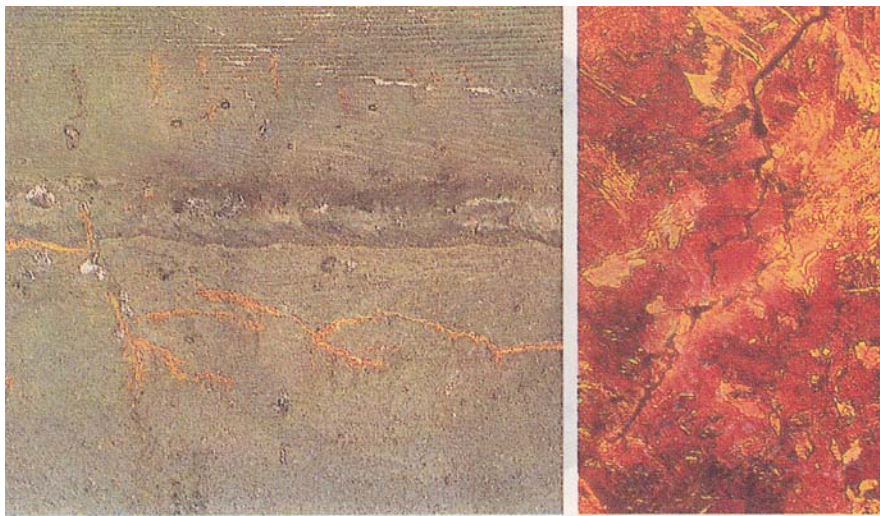
قسمت : مقطع لوله بخار

پدیده : خوردگی تنشی بین دانه ای (تردی قلیایی)

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : ترک در جوش .

محیط : بخار با فشار ۳/۵ بار .



علت پدیده : بدلیل نشتی سود به داخل بخار ، تنشهای کششی در نزدیکی جوش ایجاد و منجر به تردی قلیایی شده است .

روش اصلاح : کنترل دقیق و مرتب هدایت الکتریکی بخار با دیدبانی مرتب ، ضمناً در زمان وقوع چنین حوادثی تزریق آب مقطر مفید می باشد .

مورد ۱۰۱۰۱۰۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : خط انتقال سود (NaOH)

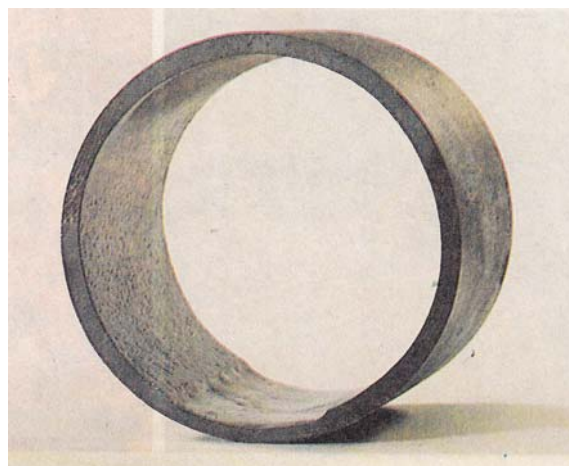
قسمت : لوله

پدیده : خوردگی قلیایی

مدت کارکرد : ۴ سال

ظاهر نمونه : کاهش موضعی ضخامت دیواره .

محیط : سود ۵۰٪ ، دمای دیواره لوله حداکثر 140°C .



علت پدیده : خوردگی سود (NaOH) بدلیل افزایش درجه حرارت موضعی در حین توقف تولید .

روش اصلاح : استفاده از تجهیزاتی که درجه حرارت را کنترل نموده تا موجب جلوگیری از بالا رفتن دما

و جلوگیری از خوردگی گردد .

مورد ۱۰۱۰۱۰۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : خط انتقال اسید سولفوریک

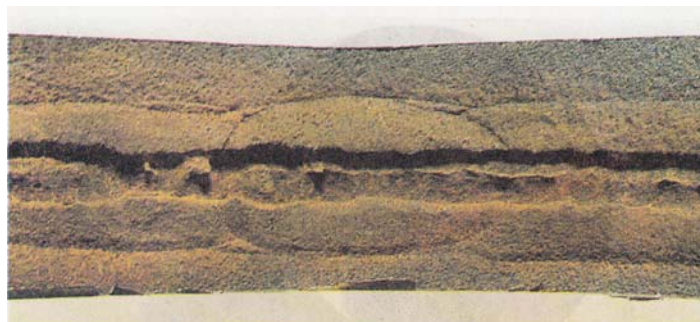
قسمت : مقطع لوله

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : زدایش انتخابی در قسمت جوش .

محیط : اسید سولفوریک ۷۱٪، دما 40°C .



علت پدیده : اختلاف ساختاری بین فلز جوش و فلز لوله منجر به زدایش انتخابی جوش گردیده است .

(حلقه بیضوی شکل در مرکز لوله وجود تعمیر موضعی را در جوش نشان می دهد) .

روش اصلاح : نرمالیزه کردن جوش ،

مورد ۱۰۱۰۱۰۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : خط انتقال اسید سولفوریک

قسمت : لوله توزیع اصلی

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : حمله یکنواخت و موضعی در قسمت فوقانی لوله

محیط : اسید سولفوریک ۹۶٪ ، سرعت ۰/۵m/s ، دما ۲۰-۱۵ °C .



علت پدیده : در محل خوردگی (قسمت فوقانی لوله) ، علت را می توان بیشتر به تشکیل اسید سولفوریک

رقیق بر اثر چگالش رطوبت هوا نسبت داد .

روش اصلاح : فولاد کربنی برای اسید سولفوریک غلیظ مناسب است ولی چنانچه اسید مذکور رقیق شود

برای فولاد کربنی خوردگی دارد . لذا بایستی تمهیداتی بکار گرفته شود تا از رقیق شدن اسید با آب و

رطوبت هوا جلوگیری شود .

مورد ۱۰۱۰۱۰۵

صنعت : لاستیک سازی

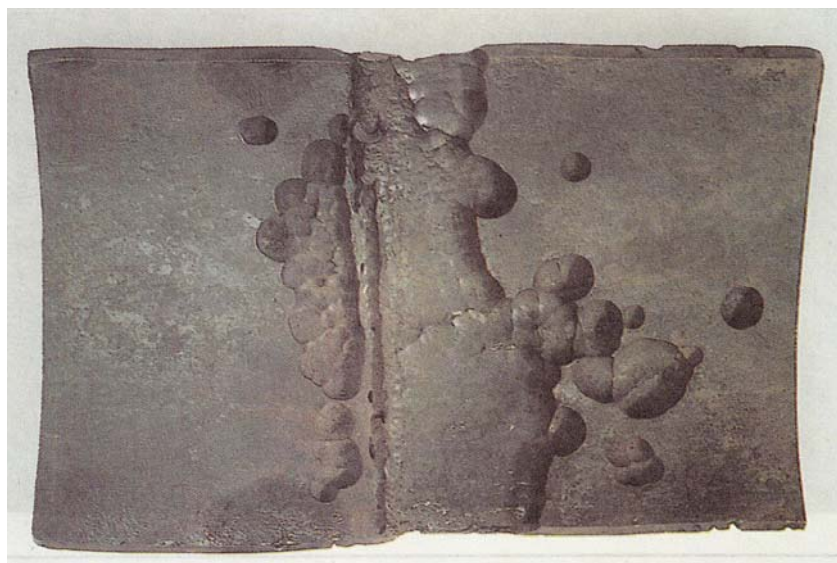
جنس نمونه : فولاد کم آلیاژ (۲,۵ Cr Mo ۵) سیستم : واحد تغذیه

قسمت : لوله ۱۰ اینچی انتقال دهنده مواد بین کوره و راکتور

پدیده : پودری شدن فلز (Metal dusting) مدت کارکرد : ۱۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای شدید با حفره های درشت ، پهن و حوضچه ای شکل .

محیط : بوتیلن ، دما 535°C ، فشار ۱ بار .



علت پدیده : واکنش فلز با اجزاء کبرنی حاصل از فاز گازی منجر به تشکیل شدید کار بید گرم می گردد .

این امر منجر به تجزیه و زوال فلز می شود که به شکل حفره نمود می یابد.

روش اصلاح : جایگزینی با لوله هایی از جنس فولاد ۲۰ Cr ۱۵ Ni .

مورد ۱۰۱۰۱۰۶

صنعت : نفت

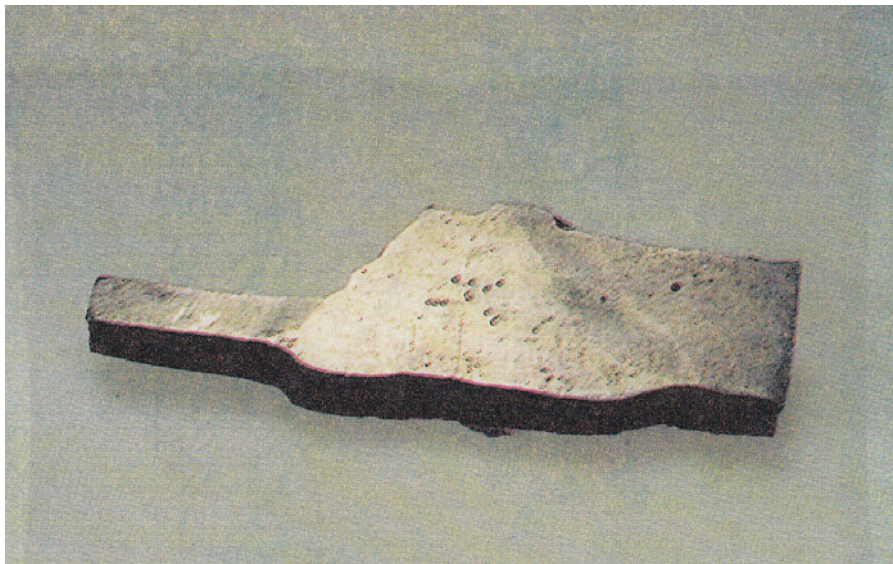
جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : سیستم شستشوی دود
اصلی

پدیده : خوردگی گوگردی
مدت کارکرد : حدود ۱۰ سال

ظاهر نمونه : حمله یکنواخت در سمت چپ جوش

محیط : حاوی هیدروکربنهای گوگرد دار و ذرات کاتالیزور ، دما 360°C ، فشار ۱۰ بار



علت پدیده : از هر دو سری لوله های API و ASTM در سیستم استفاده شده بود . بدلیل ایجاد خوردگی ، جنس لوله ها آنالیز شد . مشاهده گردید که لوله ASTM دارای درصد بیشتری از سیلیکون نسبت به لوله API است (۲۳٪ در برابر ۱٪) که باعث مقاومت بالاتر آن به خوردگی گردیده است .
روش اصلاح : استفاده از لوله های ASTM .

مورد ۱۰۱۰۱۰۷

صنعت : نفت (پالایشگاه)

جنس نمونه : قطعه مستقیم: فولاد کربنی، قطعه منحنی: فولاد (۱۲ CrMo ۱۹ s. W. Nr. ۱,۷۳۶۲)

سیستم : واحد تقطیر در خلأ بالا

قسمت : لوله فرآیند

پدیده : خوردگی گوگردی

مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : حمله یکنواخت در مقطع لوله .

محیط : هیروکربنها و ترکیبات گوگرد دار (آلی و معدنی) دما تقریباً 380°C .



علت پدیده : بدلیل اشتباه و خطا ، لوله از فولاد کربنی انتخاب شده که اصلاً به خوردگی گوگردی مقاوم نیست .

روش اصلاح : لوله بایستی از جنس فولاد ۱۲ CrMo ۱۹ ۵ ساخته شود ، و در آینده کنترل کیفیت بهتر و دقیق تری انجام پذیرد .

مورد ۱۰۱۰۱۰۸

صنعت : نفت

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : ستون تقطیر نفت خام

قسمت : خط لوله تقطیر فوقانی .

پدیده : خوردگی سایشی (Erosion)

مدت کارکرد : حدود ۲ سال

ظاهر نمونه : سطح به صورت شیار دار در آمده است .

محیط : شامل هیدروکربنها به همراه مقادیر مختصری HCl است دما 80°C .



علت پدیده : حمله شیمیایی ناشی از حضور کم اسید کلریدریک . همچنین بالا بودن سرعت.

روش اصلاح : کاهش میزان HCl محصول بوسیله خنثی سازی .

مورد ۱۰۱۰۱۰۹

صنعت : آتش نشانی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : آب پاش (خاموش کننده آتش)

قسمت : لوله

پدیده : خوردگی میکروبی

مدت کارکرد : ۱۰ سال

ظاهر نمونه : حملات موضعی در زیر محصولات خوردگی صورت گرفته است .

محیط : آب سرد چاه ، حاوی سولفات بالا .



علت پدیده : باکتریهای احیاء کننده سولفات در محیط غیر هوازی زیر رسوبات ، سولفات را به سولفید

تبدیل نموده و حمله خوردگی صورت می گیرد (سولفید محصولات خوردگی و در آبی که از آب پاش

خارج می شود، قابل تشخیص است) .

روش اصلاح : تمیز کردن شیمیایی سیستم و نیز استفاده از آب نرم و یا آب معطر می تواند در کاهش

خوردگی مؤثر باشد . همچنین متناوباً می توان از آب چاه نیز بهره برد (یک بار در ماه) .

مورد ۱۰۱۰۱۱۰

صنعت : صنایع غذایی

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵/۸)

سیستم : سیستم بخار

قسمت : زانویی دیگ بخار

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : ۱/۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای در طول لوله

محیط : بخار با فشار ۱۱ بار ، به وسیله بخاری که حاوی مواد آلی (شیر) می باشد آلوده می شود ، به نحوی که مقدار مواد آلی (Organic matter content) تا (COD ۱۴۰۰ ppm) افزایش می یابد . ضمناً سرعت بخار ۵۰ m/s است .



علت پدیده : بالا بودن سرعت بخار در زانویی در حضور ذرات آب در بخار ، و همچنین آلوده شدن آن به مواد آلی ، سبب خوردگی سایشی لوله (قسمت زانویی) شده است .

روش اصلاح :

- قطر لوله بخار بایستی افزایش یابد به نحوی که سرعت آن نبایستی بیشتر از ۳۰ m/s باشد .
- آلودگی بخار بوسیله شیر بایستی مرتفع شود ، حداکثر مجاز مقدار COD برای دیگ بخار فوق الذکر می تواند تا ۲۵۰ ppm باشد .

مورد ۱۰۱۰۱۱۱

صنعت : دیگ بخار یک واحد صنعتی

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵,۸)

سیستم : دیگ بخار (دیگ بخار نوع پوسته ای با فشار ۱۰ بار)

قسمت : لوله های دود

مدت کارکرد : تقریباً ۱۰ سال

پدیده : حمله در اثر اکسیژن

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای همراه با مناطقی از محصولات خوردگی در زیر لوله های دود .

محیط : آب دیگ بخار ، قلیائیت موقت (CaCO_3 ppm ۱۰۰۰-۶۰۰) ، مقدار کلرید (Cl) برابر

ppm ۱۳۰-۲۲۰ فسفات (PO_4^{3-}) برابر با ppm ۵۰-۷۰ و مقدار آهن (Fe^{2+}) برابر با ppm ۵۰-۱۵ می

باشد



علت پدیده : درست کار نکردن دستگاه هوازدا : به علت ظرفیت زیاد پمپ آب جبرانی ، هوازدا هنگامی که

پر می شود ، فشار به کمتر از ۱/۲۵ بار و دما به کمتر از 105°C می رسد . نتیجه نشستی به وجود آمدن

نمکهای آب می باشد که باعث مسدود شدن لوله می گردد .

روش اصلاح : پمپ آب جبرانی باید متناسب با ظرفیت فشار بخار خط تأمین کننده بخار باشد .

مورد ۱۰۱۰۱۱۲

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵/۸)

سیستم : دیگ بخار (فشار: ۱۷ بار)

قسمت : لوله پیش گرم کن (قبل و بعد از تمیز کاری آزمایشگاهی)

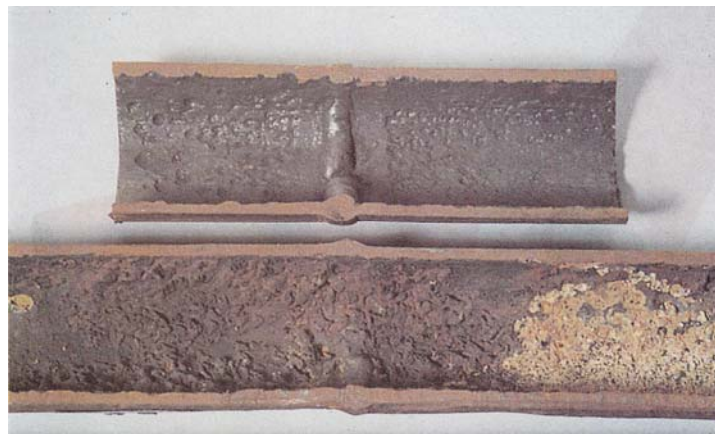
پدیده : حمله اکسیژن

مدت کارکرد : حدود ۲ سال

ظاهر نمونه : حفره دار شدن همراه با مناطق قهوه ای رنگ محصولات خوردگی .

محیط : آب تغذیه هوازدايي شده که دمای آن 105°C می باشد . این آب مخلوط آب دمی لایزرشده و آب

تقطیر شده از بخار همراه با مقداری سولفیت سدیم می باشد .



علت پدیده : بدلیل عملکرد ضعیف هوازدا، همچنین غلظت ناکافی سولفیت آب دیگ بخار این خوردگی به

وجود آمده است .

روش اصلاح :

- تعویض دستگاه پیش گرم کن ،
- شستشوی شیمیایی دیگ بخار به منظور حذف محصولات خوردگی ،
- کنترل متناوب عملکرد هوازدا ،
- بهبود کیفیت آب با افزایش بیشتر ماده جاذب اکسیژن ،

مورد ۱۰۱۰۱۱۳

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : قسمت تغذیه دیگ بخار قسمت : خط لوله تغذیه از هوازدا تا دیگ بخار

پدیده : حمله اکسیژن مدت کارکرد : حدود ۲ سال

ظاهر نمونه : حفره دار شدن هوا با مناطق قهوه ای رنگ محصولات خوردگی .

محیط : آب تغذیه هوازدایی شده که حاوی آب چگال شده از بخار و آب نرم شده و قلیازدایی شده است

pH=۵، غلظت کلرید (Cl) برابر ۱۰ ppm، دما حدود ۱۰۵ °C.



علت پدیده : وجود بیش از حد مقدار اکسیژن در آب تغذیه به علت خوب کار نکردن دستگاه هوازدا .

روش اصلاح : بهبود عملکرد هوازدا : شناسایی علت خوب کار نکردن سیستم با استفاده از بازرسی و

آزمایش قسمت‌های مختلف از جمله افشانه (Atomizer) و نازل تزریق بخار .

- اندازه گیری مقدار اکسیژن اضافی تحت بارهای مختلف .

- بهبود ترکیب شیمیایی آب تغذیه دیگ بخار و نگه داشتن آن در حالت قلیایی .

مورد ۱۰۱۰۱۱۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی (۳۵/۸)

سیستم : واحد بخار (کم فشار)

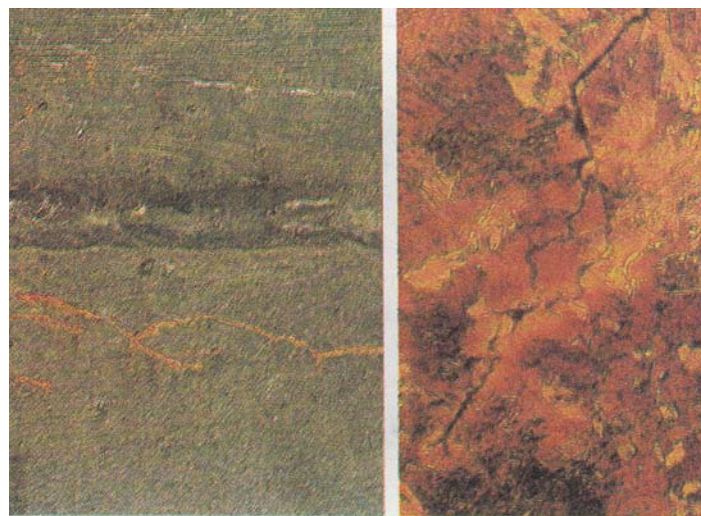
قسمت : لوله بخار

پدیده : خوردگی تنشی بین دانه ای (تردی قلیایی)

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : به وجود آمدن ترک در جوش

محیط : بخار با فشار پایین (۳/۵ بار)



علت پدیده : به دلیل نشتی در فرآیند تولید ، سود سوزآور ۵۰٪ وارد سیستم بخار کم فشار می شود .

به دلیل وجود تنش کشتی نزدیک منطقه جوش ، تریدی قلیایی در فلز رخ می دهد . :

- بهبود روشهای کنترل کیفی با استفاده از اندازه گیری هدایت الکتریکی آب کندانسه شده به منظور

کنترل نشتی در سیستم بخار .

- تزریق آبی که مواد معدنی آن گرفته شده (آب مقطر) (Demineralized)

مورد ۱۰۱۰۱۱۵

صنعت : کارخانه پارچه بافی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : دیگ بخار

قسمت : لوله دیگ بخار

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : مدت کوتاه

ظاهر نمونه : تعدادی از لوله ها که دچار زوال شده اند بعد از عملیات اسید شویی (با اسید معدنی) دچار زوال شده اند . سطح خارجی لوله ها با لایه بسیار نازکی از اکسید آهن به رنگ قهوه ای پوشیده شده است
محیط : در زمان اسید شویی محیط حاوی اسید معدنی است .



علت پدیده : غلظت بالای اسید و همچنین کمبود بازدارنده در زمان اسید شویی علت این زوال می باشد .
روش اصلاح : دقت در عملیات اسید شویی نظیر ، کنترل درجه حرارت ، غلظت اسید و غلظت بازدارنده از عوامل مهم اسید شویی می باشند .

مورد ۱۰۱۰۱۱۶

صنعت : دیگ بخار

جنس نمونه : فولاد کربنی

قسمت : لوله سمت آتش

سیستم : دیگ بخار با فشار ۱۶ بار و دیگ بخار از نوع پوسته ای (shell type)

پدیده : خوردگی اسیدی

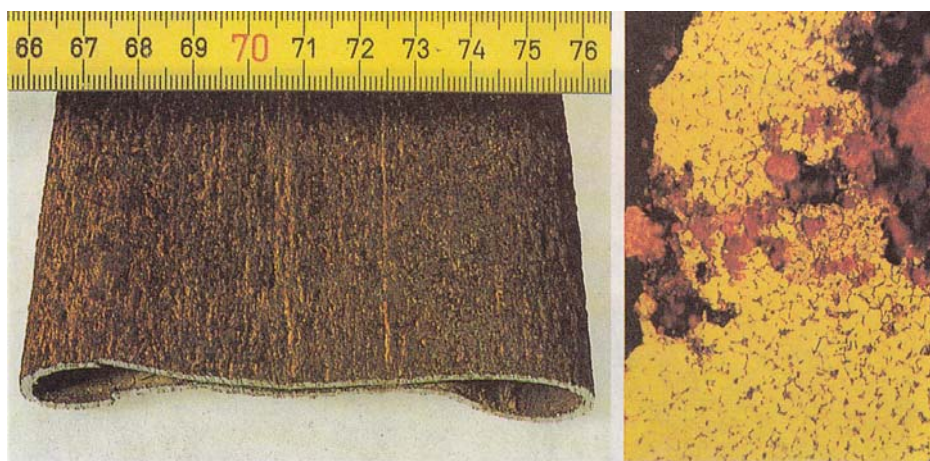
مدت کارکرد : در حدود ۴۰ ساعت (در طول عملیات شستشوی شیمیایی)

ظاهر نمونه : حمله شیاری روی لوله صورت گرفته است . لوله تحت فشار آزمایشی ۱۱ اتمسفر بعد از

تمیز کردن منفجر می شود .

محیط : محلول شستشو حاوی اسید کلریدریک ۶ درصد ، دما حدود 90°C ، دیگ بخار به صورت شیمیایی تمیز

می شود . این امر به منظور رفع آلودگیهای آلی شیمیایی می باشد که به سیستم وارد شده است .



علت پدیده : اشتباهاتی که در زمان اسید شویی رخ داده است بشرح زیر است :

- بیش از حد گرم شدن محلول شستشو (اسید)
 - نامناسب بودن بازدارنده مصرفی
 - بیش از حد ، مدت زمان شستشو طولانی شده است و متأسفانه کنترل های کیفی خوبی صورت نگرفته است .
- روش اصلاح : اگر لوله های دیگ بخار بخواهد کاملاً تعویض شود کل خسارت ۳۰۰/۰۰۰ دلار می باشد ، بنابراین باید توجه داشت که تمیز کردن شیمیایی سیستم بایستی حتماً توسط مؤسسات مخصوص و کارشناسان با تجربه در این امر صورت گیرد .

مورد ۱۰۱۰۱۱۷

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد کربنی

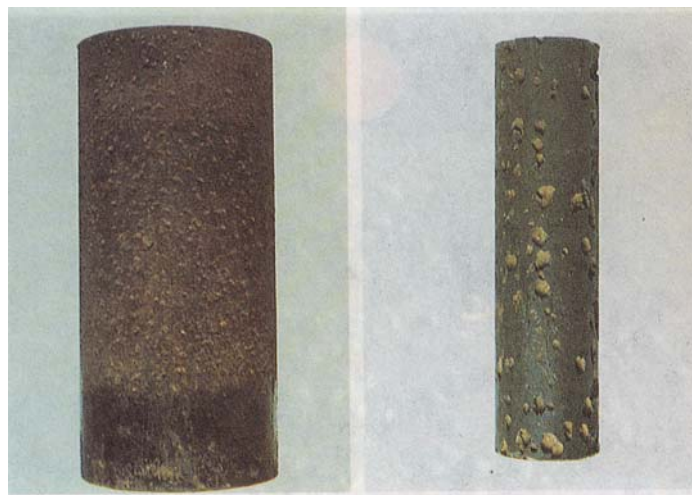
سیستم : سیستم خنک کن (آمونیاک) قسمت : لوله فولادی

پدیده : خوردگی در سطح بیرونی لوله زیر عایق حرارتی

مدت کارکرد : ۱۰ سال

ظاهر نمونه : حفراتی روی سطح خارجی لوله بوجود آمده است .

محیط : داخل لوله : گاز آمونیاک با دمای 10°C - .



خارج لوله : لوله با یک پوشش از نوع پلی اورتان عایق شده است .

علت پدیده : سیستم پوشش داده شده در برابر نفوذ آب مقاوم نیست ، نفوذ آب به زیر پوشش و یخ زدن

آن سبب تخریب پوشش شده و نهایتاً خوردگی حفره ای ناشی از پیل غلظتی اکسیژن بوجود آمده .

روش اصلاح : پوششها بایستی با نوارهای لاستیکی مناسب درزگیری شوند تا عملکرد پوشش بهبود یابد

مورد ۱۰۱۰۱۱۸

صنعت : فولاد سازی

جنس نمونه : فولاد کربنی ۱۰۱۰ کار سرد شده

سیستم : تانک خنک کن

قسمت : کوپن های خوردگی

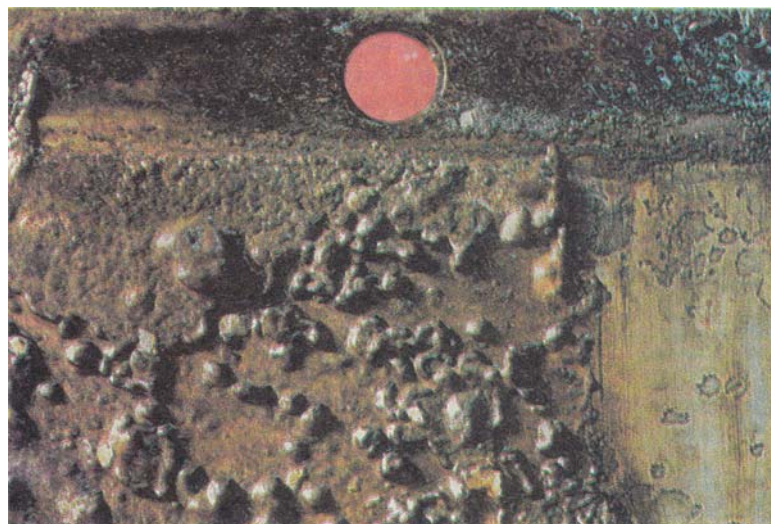
پدیده : خوردگی زیر رسوبی

مدت کارکرد : ۶ ماه

ظاهر نمونه : اکسیدهای آهن ، هیدروکسیدها و نمک های آلی روی سطح نمونه تشکیل شده است .

محیط : آب خنک کن که درجه حرارت آن تا 71°C (160°F) افزایش می یابد . ضمناً در این آب از

بازدارنده خوردگی استفاده شده است .



علت پدیده : بدلیل کمبود غلظت بازدارنده این نوع خوردگی اتفاق افتاده است و بررسی های انجام شده

نشان می دهد که با افزایش میزان بازدارنده به حد قابل قبول میزان خوردگی تقریباً تا ۷۰ درصد کاهش

یافته است .

روش اصلاح :

- بکار بردن فولاد ضد زنگ در صورت عدم استفاده از بازدارنده .

- افزایش بازدارنده به میزان کافی .

مورد ۱۰۲۰۱

صنعت : تأسیساتی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (با ۱۷٪ کرم ۴۳۰ AISI)

سیستم : کولر گازی

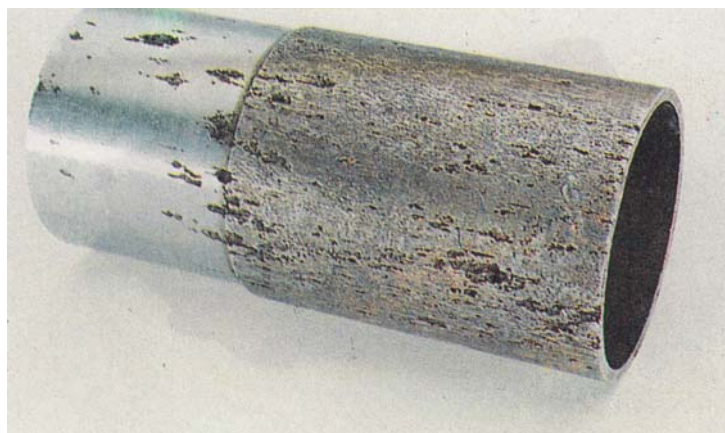
قسمت : لوله ها

پدیده : حمله کور

مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : حفراتی روی لوله پدید آمده است .

محیط : داخل لوله : گاز با دمای $150-200^{\circ}\text{C}$ ، اطراف لوله : آب خنک کننده با ۱۰ ppm کلر .



علت پدیده : فولاد کرم دار دارای مقاومت کافی در برابر حاوی یون کلرید نیست .

روش اصلاح : با انتخاب مواد مناسب تر ، مشکل برطرف می شود . فولاد زنگ نزن ۳۱۶ را برای لوله های

خنک کننده گاز (کولر گازی) بکار برد

مورد ۱۰۲۰۲

صنعت : مولد برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

سیستم : کندانسور بخار قسمت : لوله های زیر زمینی عایق نشده

پدیده : خوردگی تنشی (میان دانه ای) مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : ترکهایی روی نمونه قابل مشاهده است .

محیط : آب زیر زمینی حاوی کلروربالا



علت پدیده : کلرور موجود در آب زیر زمینی به همراه دمای بالا (90°C) در لوله چگاله و تنشهای موجود، علت این پدیده است .

روش اصلاح : با توجه به شرایط سیستم اگر آب حاصل از چگالش کم باشد باید سیستم به گونه ای طراحی شود که آب حاصل از چگالش دوباره به سیستم برگشت داده نشود ، بلکه به فاضلاب تخلیه شود .
بعنوان پیشنهاد دیگر ، خطوط لوله کندانسور را می توان بصورت لوله های دوجداره ساخت که جدار داخلی لوله از فولاد کربنی باشد و جداره خارجی از جنس پلاستیک و بین آنها نیز عایقی قرار گیرد .

مورد ۱۰۲۰۳

صنعت: مولد برق

جنس نمونه: فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم: دستگاه آب مقطر سازی (مبادله کننده یونی)

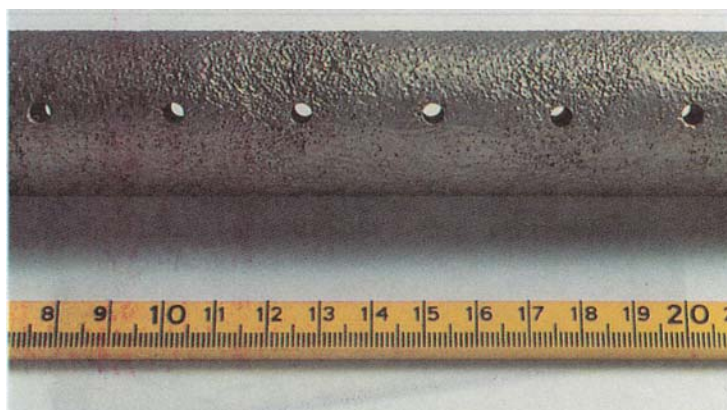
قسمت: لوله تخلیه (درین)

پدیده: خوردگی در اثر حمله کلرید مدت کارکرد: تقریباً یک سال

ظاهر نمونه: حمله حفره ای (pitting attack) (خوردگی حفره ای) در روی تمام سطح صورت گرفته

است.

محیط: حاوی اسید کلریدریک ۶٪ (در طول بازیابی)



علت پدیده: فولاد زنگ نزن در برابر اسید کلریدریک مقاوم نیست (در محیطی با غلظت کلرید بالا و یا pH

پایین) و در این محیطها به راحتی دچار خوردگی می شود.

روش اصلاح: بایستی لوله تخلیه از جنس مونل یا پلاستیک باشد. می توان از تجمع اسید جلوگیری نمود

و مانع از خوردگی شد. با انتخاب مواد صحیح مشکل بر طرف می شود.

مورد ۱۰۲۰۴

صنعت: دیگ بخار

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : کندانسور بخاری

قسمت : لوله های بدون عایق

پدیده : خوردگی تنشی (میان دانه ای)

مدت کارکرد : نامعین

ظاهر نمونه : ترکهای طولی در روی لوله قابل مشاهده است . لوله ، شکاف بازی برداشته است .

محیط : لوله در داخل زمین مرطوبی قرار دارد که حاوی نمک زیاد است و در داخل لوله آب گرم با درجه

حرارت 95°C در جریان است .



علت پدیده : آبهای حاوی یون کلرید سبب شکست فولاد فولادی زنگ نزن می شود ، ضمن آنکه گرم

بودن لوله کمک در تسریع زوال می نماید .

روش اصلاح : بایستی جنس لوله ها از کربن استیل باشد که با عایق مناسب بمنظور اتلاف انرژی پوشیده

شد و سپس با یک پوشش پلاستیکی محصور گردد .

مورد ۱۰۲۰۵

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (۲RE۵۱)

مدت کارکرد : ۶ ماه

سیستم : کندانسور اسید نیتریک

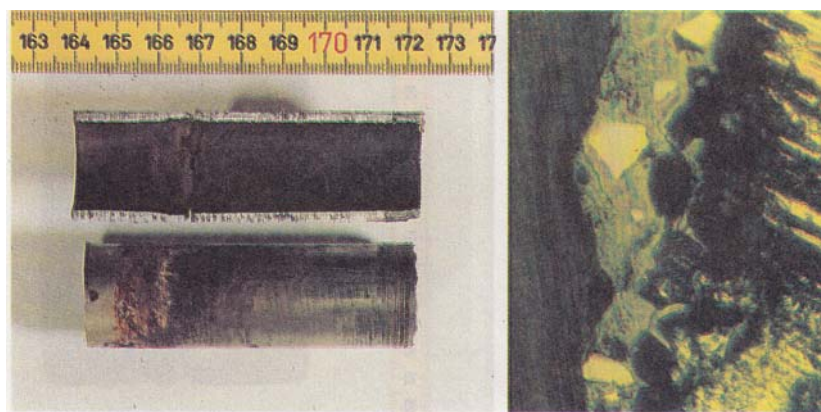
قسمت : لوله های کندانسور

پدیده : خوردگی بین دانه ای (در قسمت داخلی) و خوردگی شکافی (در قسمت خارجی)

ظاهر نمونه : حمله شیاری در داخل لوله ها و حمله حفره های در خارج لوله ها صورت گرفته است .

محیط : داخل لوله حاوی بخار اشباع اسید نیتریک با Nox است ، دما °C ۲۲۰ و فشار ۸ بار است . خارج

لوله ها آب سرد کننده با ppm ۴۰۰ کلرور و دمای °C ۷۰ و فشار ۶ بار است .



علت پدیده : تحت این شرایط ، این ماده مستعد به خوردگی بین دانه ای و خوردگی شکافی است و

همچنین در صفحه لوله ها که از جنس (W-Nr.۹,۴۴۱۷) RE۶۰ ۷۳ ساخته شده است ، خوردگی تنشی

مشهود است بعلاوه ناخالصیهای آلوده کننده نواحی جوش توسط عکسهای میکروسکوپی در این نمونه ها

قابل مشاهده است . لازم به ذکر است که لوله هایی که از جنس فولاد ۳۰۴ و ۴۱۰ و W-Nr ۱/۴۴۶۵ و

فولاد زنگ نزن L ۳۱۶ ساخته می شوند دارای عمر شرایط کاری کوتاهی هستند .

روش اصلاح : با بکار بردن لوله های طولی از جنس تیتانیوم با جوش درزی و یا اینکونل ۶۰۰ و نیز با بکار

بردن پوشش تیتانیومی روی صفحه لوله ها مشکل بر طرف خواهد شد .

مورد ۱۰۲۰۶

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن

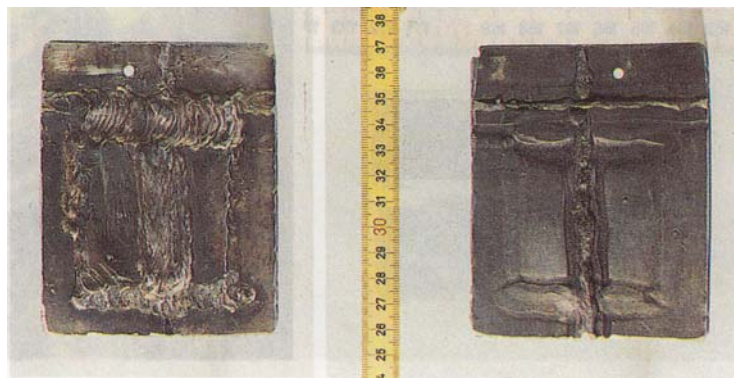
سیستم : کارخانه اسید نیتریک قسمت : دیواره مخزن (در هر دو سمت)

پدیده : خوردگی جوش (خوردگی بین دانه ای نزدیک جوش)

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : حمله موضعی در فواصل کوتاهی از نواحی جوش صورت گرفته است .

محیط : شامل اسید نیتریک ۵۴٪ دما تقریباً 80°C است .



علت پدیده : علت خوردگی ، انتخاب نامناسب مواد است . در این فولاد زنگ نزن در نواحی متأثر از

حرارت (850°C - 600°C) در نزدیکی نواحی جوش ، رسوب کاربید گرم تشکیل می شود . در نتیجه ماده

(فولاد) به علت کمبود کرم در مرزدانه ها به خوردگی حساس می شود .

روش اصلاح : با بکار بردن فولاد زنگ نزن با میزان کربن کم ($C \leq 0.03\%$: AISI ۳۰۴) فولاد ضد زنگ

پایدار شده با Nb (AISI ۳۴۷) یا پایدار شده با Ti (AISI ۳۲۱) ، مشکل بر طرف می شود .

مورد ۱۰۲۰۷

صنعت : گاز

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن دابلکس (۶۰ RE ۳)

سیستم : جاه گاز طبیعی

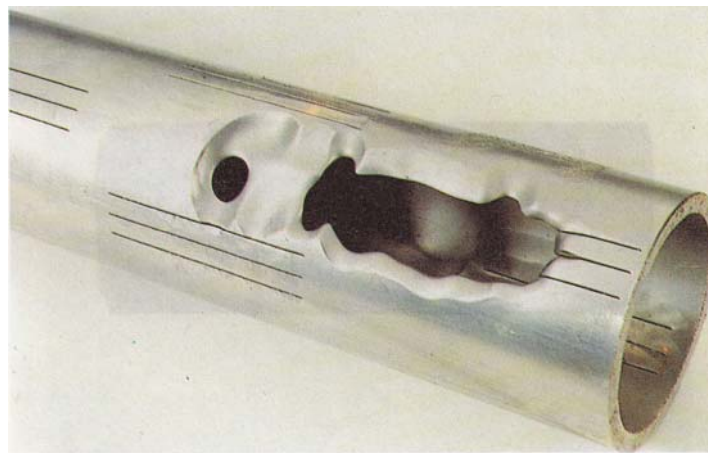
قسمت : جوش سیلندر شیار دار

پدیده : سایش

مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : قطعه در نزدیکی شیارها به طور کامل تخریب شده است .

محیط : گاز طبیعی که حاوی ذرات معلق جامد نظیر شن و ماسه می باشد .



علت پدیده : سرعت بالای سیال سبب می شود که مواد جامد به همراه گاز بالا کشیده شوند . بنابراین

سایش شدیدی نزدیک به شیارهای باریک قطعه بوجود می آید .

روش اصلاح : باید تمهیداتی بکار گرفته شود تا ذرات معلق از سیال حذف شوند .

مورد ۱۰۲۰۸

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن

سیستم : (Urium Stripper)

قسمت : لوله گاز

پدیده : خوردگی تنشی (میان دانه ای)

مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : ترک‌هایی روی نمونه پدید آمده است .

محیط : حاوی محلول سنتز شده اورיום (کاربامات) ، دما 80°C .



علت پدیده : لوله مذکور با دستگاه مخصوص علامت گذاری شده است (حکاکی شده) بدلیل آلوده بودن

دستگاه حک گذار به یون کلرید . لوله آلوده شده و زوال صورت گرفته است .

روش اصلاح : بایستی دستگاه مذکور عاری از یون کلرور باشد .

مورد : ۱۰۲۰۹

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

سیستم : آب گرم خانگی

قسمت : سیم پیچ گرم کننده الکتریکی (electrical coil heated)

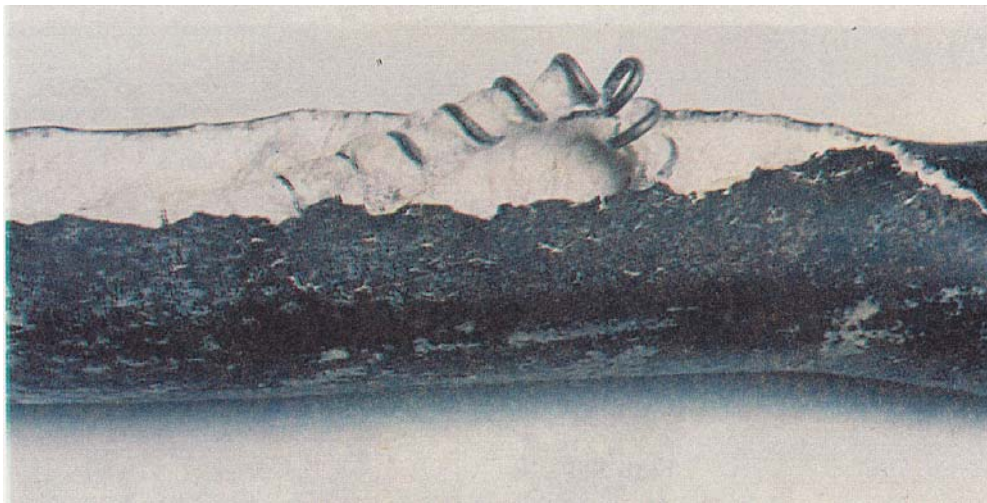
پدیده : خوردگی تنشی (درون دانه ای)

مدت کارکرد : چند ماه

ظاهر نمونه : ترک خوردن

محیط : در ابتدا از آب سخت و بعد از آب نرم استفاده شده است . مقدار کلرید (Cl⁻) برابر ۱۳۵ ppm ،

دما ۸۰ °C .



علت پدیده : خوردگی تنشی نتیجه بوجود آمدن تنش در سیستم پیچ (در اثر تغییرات دما) و بالا بودن

کلرید و دمای محیط می باشد. در ابتدا نشستی در سیستم به وجود آمد و بعد از نفوذ آب و به کار افتادن

سیم پیچ آب به صورت بخار در می آید که نتیجه آن با بالا رفتن فشار ، تخریب در قطعه ایجاد می شود .

روش اصلاح : در ابتداء سیم پیچها از فولاد با پوشش نیکل ساخته شده ، ولی بعد از ۳ ماه بدلیل وجود

حفره در پوشش نیکلی ، این روش مناسب نبود و دچار تخریب شد . راه درمان آن ، ساخت قطعه از جنس

مس و استفاده از آب نرم (گذرانیدن آب سخت از مبادله کننده سدیمی) می باشد .

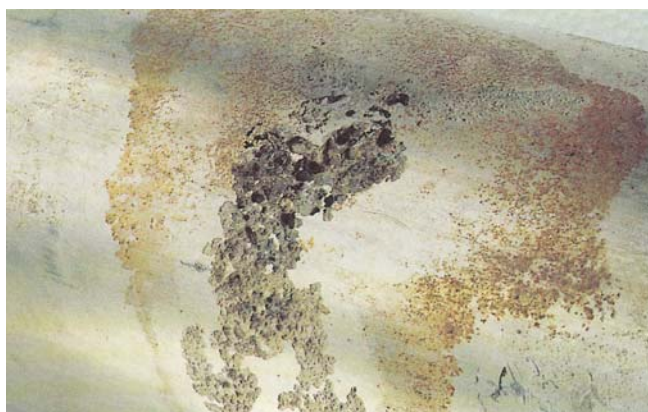
جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶ L)

سیستم : دستگاه خاموش کننده آتش (اطفاء حریق) قسمت : لوله زیر زمینی

پدیده : حمله کلریدی مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : در لوله مناطق وسیعی بطور موضعی دچار خوردگی حفره ای شده اند که این مناطق بوسیله رسوب اکسید آهن احاطه شده است .

محیط : خاک که شامل مخلوطی از شن و خاک رس همراه با مقداری سنگ معدن آهن می باشد . آنالیز خاک رس به این صورت است : $pH = 7/6$ ، مقدار کلرید : ۵۰ ppm ، آهن $1/5\%$ وزنی ، و حاوی یون سولفید می باشد . لوله مورد نظر بالای سطح آب زیر زمینی قرار دارد .



علت پدیده : دلیل اصلی خوردگی غیر همگن بودن خاک می باشد . هوا در مناطقی که شن وجود دارد بیشتر و در مناطق خاک رس کمتر می باشد و لذا پیل غلظتی اکسیژن تشکیل می شود . همچنین وجود سنگ معدن آهن باعث تشدید خوردگی می شود .

روش اصلاح : برای جلوگیری از خوردگی یک لوله فولاد زنگ نزن ، ریختن یک لایه شن دور لوله به نحوی که هوای کافی نیز وارد شود می تواند مناسب باشد .

ضمناً از یک فولاد زنگ نزن پوشش داده شده و یا فولاد ساده نیز استفاده نمود .

مورد ۱۰۲۰۱۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن دوبلکس (SAF ۲۲۰۵) ، فولاد زنگ نزن سوپر آستنیتی (Sanicro ۲۸) و

فولاد زنگ نزن سوپر فریتی ۲۶/۱ E – Britee

پدیده : حمله کلریدی

سیستم : سیستم بازیابی مونو کلروبنزن قسمت : لوله های مبدل حرارتی

مدت کارکرد : برای نمونه SAF ۲۲۰۵ و نمونه Sanicro ۲۸ یک سال و نمونه E-Brite ۲۶۱۱ ، سه

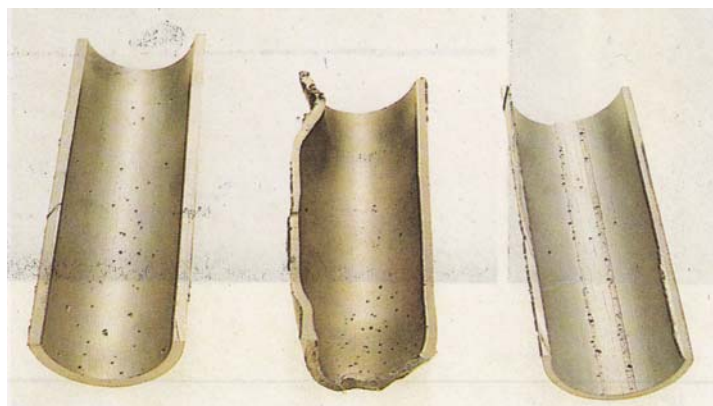
سال است .

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای در سه نمونه سمت چپ : SAF ۲۲۰۵ در وسط Sanicro ۲۸ و در

سمت راست E-Brite ۲۶۱۱ قابل مشاهده است .

محیط : در داخل لوله ها : مونوکلروبنزن با مقدار کمی کلرید در جریان است و از 21°C تا 75°C گرم

می شوند .



در اطراف لوله ها : محصولات خالص با کلر کم که از 103°C تا 49°C سرد می شوند .

علت پدیده : هیچ یک از آلیاژهای به کار رفته در سیستم به خوردگی کلریدی مقاوم نیستند.

روش اصلاح : با به کار بردن آلیاژ SMO ۲۵۴ به همراه بازرسیهای متناوب مشکل بر طرف می شود .

مورد ۱۰۲۰۱۲

صنعت : پتروشیمی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶ L)

سیستم : سیستم گریز از مرکز محصولات آلی قسمت : خط تغذیه

پدیده : خوردگی هیدروبرومید مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : خوردگی هیدروبرومید حفره ای در خراشها و سایر قسمتها مشهود است .

محیط : حاوی مخلوطی از اسید تری فتالیک (terephthalic) و اسیداستیک به همراه کاتالیست برمید

(bromide) که به عنوان آلوده کننده محیط می باشد . دما °C ۱۰۰ .

علت پدیده : در دمای بالا در محیط اسیدی ، آلودگیهای برومید سبب خوردگی حفره های فولاد زنگ نزن

L ۳۱۶ می شود ، ضمن آنکه یون کلرور و سایر هالیدها ، سبب تسریع خوردگی می شوند .

روش اصلاح : باید آلیاژی با مقاومت بالاتر ، به عنوان مثال فولاد زنگ نزن (۲۰ Ni،۵ Mo و ۲۵ Cr) L

AISI ۹۰۴ را بکار برد و یا طراحی تجهیزات فرآیند را بنحوی بهبود بخشید تا سر رفتن و آلودگی برومید

جلوگیری شود .

مورد ۱۰۲۰۱۳

صنعت : شیشه سازی

جنس نمونه : فولاد کرم دار (W. Nr ۱ / ۴۷۷۲ × ۱۰ Cr si ۲۹)

سیستم : دستگاه بازیابی حرارت

قسمت : لوله

پدیده : خوردگی در دمای بالا (اکسیداسیون)

مدت کارکرد : یک سال و نیم

ظاهر نمونه : ضخامت دیواره لوله به شدت کاهش پیدا کرده است و پوسته اکسیدی ضخیم زرد رنگی

روی دیواره لوله تشکیل شده است .

محیط : حاوی گازهای حاصل از احتراق در یک کوره ذوب شیشه است ، دما $600 - 1000^{\circ}\text{C}$ است .



علت پدیده : وجود گاز کلر (Cl_2) در گاز احتراق سبب می شود تا کروم موجود در فولاد مذکور اسید

شده و نهایتاً به شکل کروماتهای قلیایی زردرنگ در آید .

روش اصلاح : باید از موادی که میزان گاز کلر (Cl_2) آن کم است استفاده شود (در صورت امکان) و یا

از فولاد مقاوم تر استفاده شود .

مورد ۱۰۲۰۱۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : انتقال محصولات

قسمت : لوله

پدیده : خوردگی تنشی

مدت کارکرد : ۸ سال

ظاهر نمونه : ترکهایی در سطح لوله ، در مسیر بخار پدیده آمده است .

محیط : محصول داخل لوله حاوی کلرور بالا است . دمای دیواره لوله حداکثر 140°C است.



علت پدیده : دمای دیواره لوله در مسیر بخار به طور منظم بالا می رود . علت این امر توقف محصولات

در لوله است . این مسأله به همراه مقدار کلرور بالا در سیستم سبب خوردگی تنشی می شود .

روش اصلاح : با کاهش دمای دیواره و یا انتخاب مواد مناسب تر یعنی کاربرد فولاد دابلکس ، خوردگی

سیستم بر طرف می شود .

مورد ۱۰۲۰۱۵

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴ H) سیستم : کوره کراکینگ

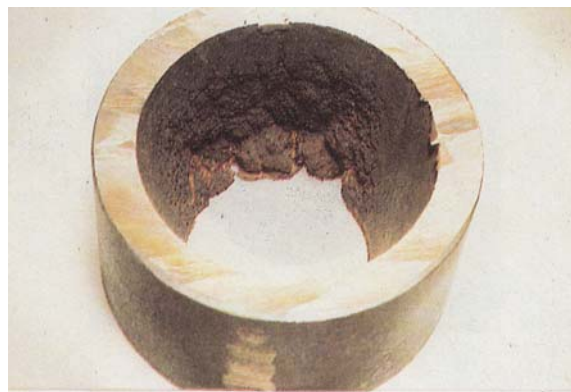
قسمت : نازل روی لوله ورودی یک سیم پیچ (Coil) در خارج کوره

پدیده : خوردگی تنش‌ی شکافی بین دانه ای مدت کارکرد : ۸۰۰۰۰ ساعت

ظاهر نمونه : ترکهای نامنظم باعث بوجود آمدن یک سطح خشن در نمونه شده است .

محیط : حاوی اسید پلی تیونیک است که سولفیدها توسط اسید ، آب و اکسیژن در طول مدت توقف

سیستم در محیط ایجاد می شود .



علت پدیده : بدلیل چگالش آب و تشکیل اسید پلی تیونیک ، فولاد زنگ نزن دچار خوردگی می شود . این

فولاد به اسید مذکور حساس بوده و ایجاد رسوب کربید گرم در مرزدان ها می کند . بدلیل تنشهای

کششی ، زوال تسریع می شود . سطح خشن به علت حل شدن دانه های فلزی ایجاد می شود .

روش اصلاح : با بکار بردن فولاد زنگ نزن AISI ۳۲۱ H که استعداد کمتری به حساس شدن

(Sensitization) دارد ، مشکل سیستم بر طرف می شود .

مورد ۱۰۲۰۱۶

صنعت : فولاد سازی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن

سیستم : واحد الکترولیز در کارخانه روی

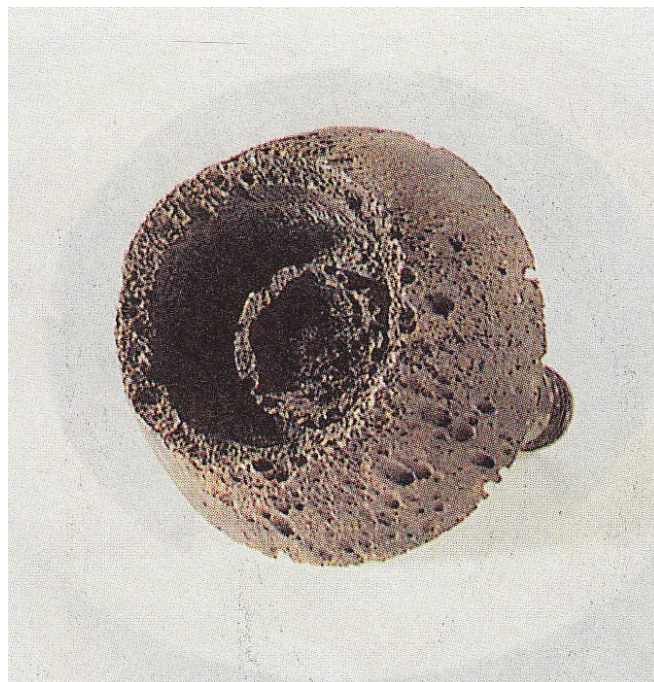
قسمت : کلاhek پروانه در پمپ الکترولیت

پدیده : خوردگی جریان سرگردان

مدت کارکرد : ۳ - ۴ ماه

ظاهر نمونه : حمله حفره ای شدیدی در روی کل سطح صورت گرفته است .

محیط : اسید سولفوریک ۱۸٪



علت پدیده : در این فرآیند ، مایع دارای یک ولتاژ الکتریکی است . به منظور جلوگیری از نشت جریان الکتریکی ، باید تمام واحد از زمین عایق شود . در این واحد ، متأسفانه پمپ بصورت نامناسبی از فونداسیون عایق شده است . بنابراین جریانهای سرگردان خروجی سبب خوردگی شدیدی بخصوص در نواحی کلاhek پروانه می شود .

روش اصلاح : باید عایق مناسبی (پلاستیک) بین پمپ و فونداسیون بکار برد .

مورد ۱۰۲۰۱۷

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن

مدت کارکرد : چند سال

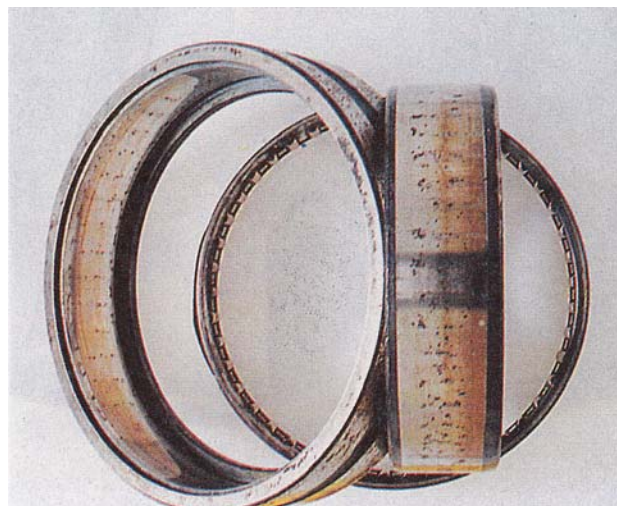
سیستم : پمپ

قسمت : یاتاقان غلطکی

پدیده : برینل شدن کاذب (تخریب سطح یاتاقان به وسیله تغییر شکل پلاستیک در اثر اعمال بار زیاد را برینل شدن گویند) .

ظاهر نمونه : تکه های کوچکی از سطح فرسوده ، کنده شده است .

محیط : روغن روانکاری هوادار



علت پدیده : در طول توقف واحد ، سیستم در معرض ارتعاشات ناچیز ناشی از تجهیزات در حال گردش نزدیک به سیستم است . این مسأله سبب می شود حرکت ناچیزی بین غلطکها و سطوح فرسوده بوجود آید که علت خسارات بعدی است .

روش اصلاح : با بکار بردن یک روانکار که حاوی سولفید مولیبدن باشد و یا به چرخش درآوردن منظم یاتاقان غلطکی در زمان توقف مشکل برطرف می شود .

مورد ۱۰۲۰۱۸

صنعت : غذایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن

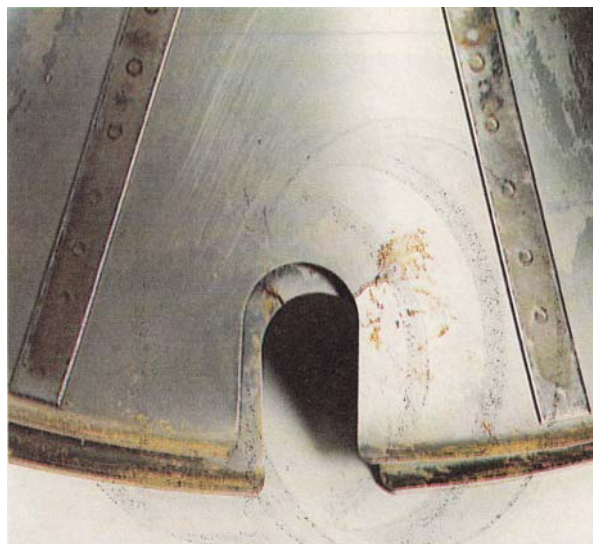
سیستم : کارخانه مارگارین

قسمت : سینی جدا کننده برای خالص کردن فاز چربی

پدیده : خوردگی تنشی (درون دانه ای) مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : ترکهایی در انحنای کانالهای تخلیه پدید آمده است .

محیط: حاوی فلز چربی با ppm ۱۶,۰۰۰ یون کلرید و دمای °C ۸۰ است .



علت پدیده : تنشهای موضعی بوجود آمده در طول چرخش سینی ها سبب خوردگی تنشی در این محیط می شود .

روش اصلاح : با تعدیل ساختار یعنی جایگزین کردن کانالهایی با سوراخهای مدور ، مشکل برطرف می شود همچنین به عنوان راه درمان دیگر ، می توان فولاد زنگ نزن با حساسیت کمتر به تنش به کار برد .

(به عنوان مثال فولاد دوبلکس ۱/۴۴۶۲ W – Nr) .

مورد ۱۰۲۰۱۹

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۲۱)

سیستم : راکتور نیترات آمونیم

قسمت : فلانچ (flange)

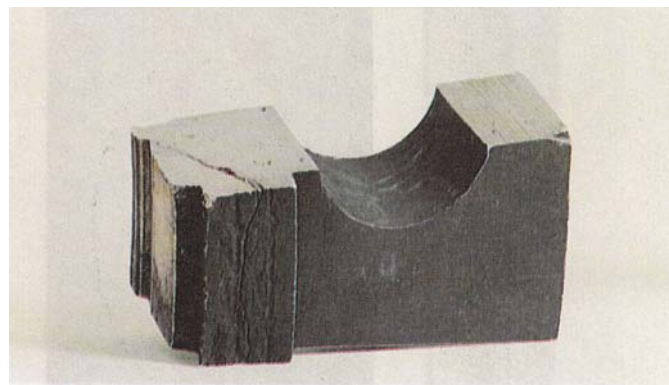
پدیده : خوردگی تنشی (میان دانه ای)

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : ترکهایی روی نمونه بوجود آمده است .

محیط : نیترات آمونیم در 140°C در لوله ذوب می شود ، فلانچ با نوارهای آب بندی تفلونی

(braided teflon seal)آباد شده است



علت پدیده : به علت وجود تنش در فلانچ که از جنس فولاد زنگ نزن است و نیز کلریدهای موجود در آب

بندیهای (seal) ، خوردگی تنشی در این دما در سیستم بوجود می پیوندد .

روش اصلاح : با به کار بردن آب بندیهایی از جنس ماده ای بدون کلرید ، مشکل سیستم برطرف می شود

مورد ۱۰۲۰۲۰

صنعت : نساجی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

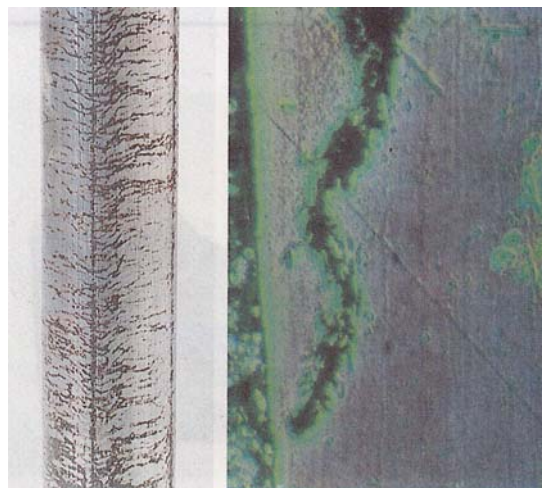
سیستم : دیگ بخار نساجی

قسمت : میله راهنما در سیستم بالابر منسوجات

پدیده : خوردگی تنش (میان دانه ای) مدت کارکرد: حدود سه سال

ظاهر نمونه : ترکهای مورب در روی نمونه پدید آمده است .

محیط : حاوی بخار با دمای 100°C است که با تزریق آب نرم به مایع تبدیل می شود .



علت پدیده : خوردگی تنش به علت حضور همزمان سه عامل زیر ، در نمونه صورت گرفته است :

(۱) تنشهای کششی در میله: (۲) مقدار زیاد یون کلرید در رنگ منسوجات : (۳) دمای بالای محیط

روش اصلاح : چنین فولادی به یون کلرید موجود در رنگ و همچنین آب نرم حساس می باشد . با

استفاده از رنگ و آبی که حاوی کلرید نباشد مشکل مرتفع می شود ،البته اگر شرایط فوق امکان پذیر نمی

باشد ، بایستی از فولاد زنگ نزن آستنیتی فریتی استفاده شود

مورد ۱۰۲۰۲۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : مخزن ذخیره اسید لاکتیک

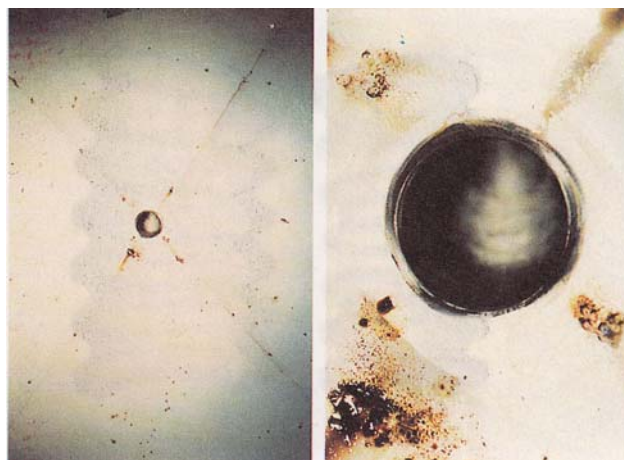
قسمت : پایه (با آبگذر)

پدیده : حمله رسوبی

مدت کارکرد : ۳ ماه

ظاهر نمونه : حفراتی روی نمونه پدید آمده است .

محیط : در طول فعالیت سیستم : محیط حاوی اسید لاکتیک ۱۷٪ است .



علت پدیده : در طول توقف واحد ، مخزن تمیز نشده و در هوای باز قرار گرفته است ، بعد از ۳ هفته ،

حملات حفره ای شدیدی که ناشی از تبخیر اسید لاکتیک (pH کم) در زیر مواد باقیمانده در کف مخزن است

مشاهده می شود . در صورت تمیز کردن و کارکرد طبیعی سیستم مشکلی پدید نمی آید .

روش اصلاح : بایستی در زمان توقف، مخزن و ملحقات آن بطور کامل تمیز شود .

مورد ۱۰۲۰۲۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

سیستم : لوله انتقال اسیدکلریدریک

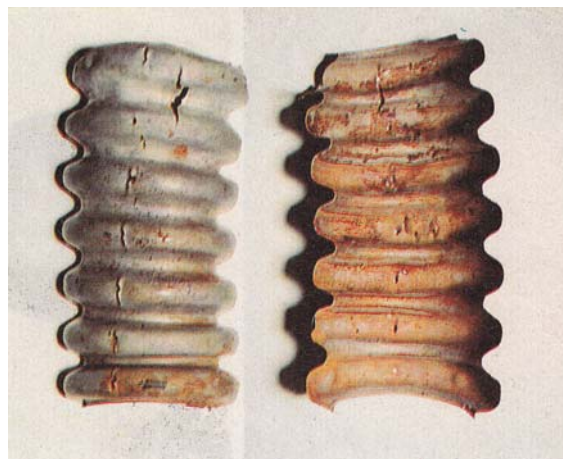
قسمت : بستهای فلزی در اطراف دمنده های پلاستیکی

پدیده : خوردگی تنش

مدت کارکرد : حدود یک سال

ظاهر نمونه : حملات حفره ای توأم با ترکهای روی نمونه رخ داده است .

محیط: حاوی اسیدکلریدریک نشت کرده ، به همراه بخار آب (اتمسفر) است .



علت پدیده : اشتباه در انتخاب مواد سبب خوردگی در سیستم شده است . بجای بستهای فولادی زنگ نزن

باید بستهای مولی به کار گرفته می شد. همچنین گاز اسیدکلریدریک از میان پلاستیک (PTFE) نفوذ نمی

کند. و این گاز با رطوبت اتمسفر تشکیل اسیدکلریدریک غلیظ را می دهد که به فولاد زنگ نزن حمله می کند

روش اصلاح : با جایگزین کردن بستهای مولی و کنترل دقیق تر در انتخاب مواد مشکل برطرف می شود

مورد ۱۰۲۰۲۳

صنعت : گاز

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

سیستم: لوله گاز

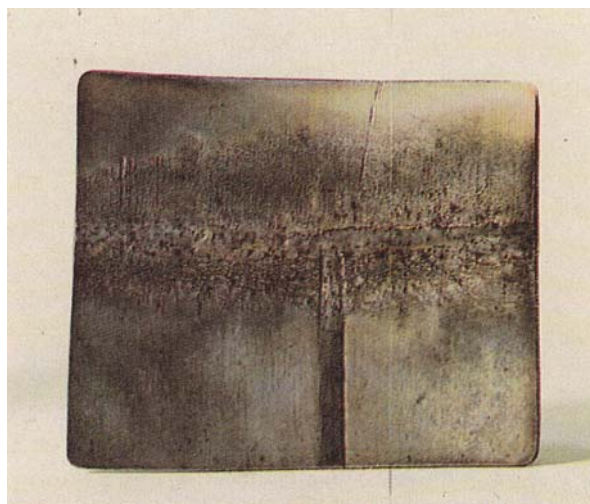
قسمت : دیواره

پدیده : خوردگی تنشی

مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : ترک‌هایی نزدیک به نواحی جوش پدید آمده است .

محیط : گازی که حاوی کلراید (Cl_2) می باشد دما بیش از $95^{\circ}C$ است .



علت پدیده : به طور موضعی ، دمای لوله به زیر نقطه شبنم گاز کاهش می یابد که ناشی از عایق کردن نامناسب است .

روش اصلاح : با به کار بردن عایق مناسب به نحوی که دمای دیواره در بالاتر از نقطه شبنم گاز باقی بماند ، مشکلی پدید نخواهد آمد .

مورد ۱۰۲۰۲۴

صنعت : آب فاضلاب

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۴۱۰ و با ۱۲٪ Cr)

سیستم : لوله فاضلاب رو

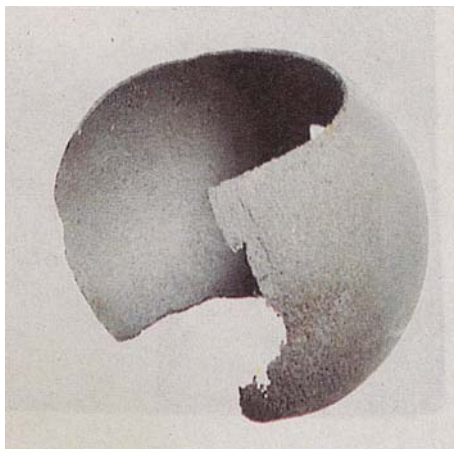
قسمت : توپی شیر ساچمه ای (balt value ball)

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : ۱/۵ سال

ظاهر نمونه : سطح داخل توپی کاملاً مورد حمله قرار گرفته است و به صورت موضعی خورده شده است

محیط : حاوی فاضلاب که به اسیدهای چرب آلوده شده است . دما حدود $^{\circ}\text{C}$ ۸۰ - ۵۰ است.



علت پدیده : فولاد کرم دار مذکور دارای مقاومت کافی به خوردگی در این محیط نیست .

روش اصلاح : باید قطعه مذکور با غشاء شیشه ای (glass - lined memberane) که با پوشش

پلیتترافلورواتیلن (polytetrafluoroethylene) پوشیده شده است ساخته شود .

مورد ۱۰۲۰۲۵

صنعت : استخراج گاز

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (لوله ها ۸۰ EPI L و ۴۲۰ AISI)

پدیده : خوردگی اسیدی

قسمت : لوله های چاه

سیستم : چاه گاز طبیعی

مدت کارکرد : کوتاه مدت (چند روزی که لوله در تماس با اسید معدنی قرار می گیرد)

ظاهر نمونه : حملات موضعی و به صورت خطوط طولی در روی نمونه رخ داده است .

محیط : گاز طبیعی که حاوی CO_2 مرطوب است که در طی چند روزی لوله در تماس با اسیدهای معدنی

(نظیر HF و HCl) قرار می گیرد .



علت پدیده : در این سیستم از باز دارنده خوردگی (خوردگی اسیدکربنیک CO_2) استفاده می گردد. بدلیل

کمبود و فقدان بازدارنده و همچنین بالا رفتن موضعی درجه حرارت در قسمت آسیب دیده ، لایه محافظ

باز دارنده از بین رفته است .

روش اصلاح : باید تمهیداتی بکار گرفته شود تا از اتفاقات مذکور جلوگیری شود .

مورد ۱۰۲۰۲۶

صنعت : نفت

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن دابلکس (W – Nr.۱,۴۴۶۲)

سیستم : خط لوله

قسمت : منطقه جوش

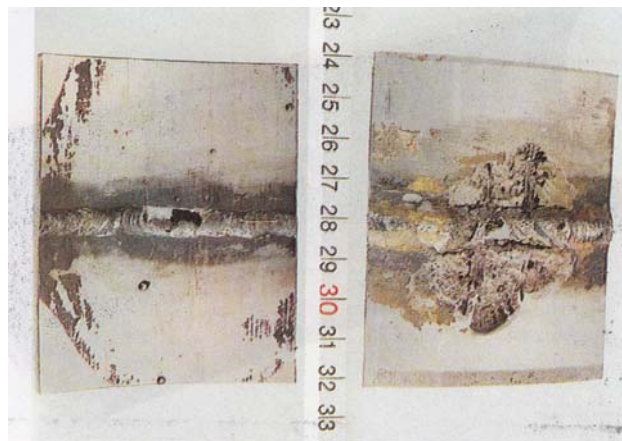
پدیده : خوردگی شکافی

مدت کارکرد : کمتر از ۶ ماه

ظاهر نمونه : حمله انتخابی در داخل ناحیه جوش (شکل سمت چپ) سبب حمله خارجی به لوله شده است

(شکل سمت راست)

محیط : حاوی آب راکد هوادار است که برای آزمایشات تست فشار (hydrotesting) بکار می رود .



علت پدیده : تشکیل پوسته های اکسیدی در طی عملیات جوشکاری سبب بوجود آمدن ترکهایی در درون

سیستم می شود. زمانی که جوش دچار تخریب می شود ، خوردگی در زیر پوشش اعمال شده گسترش

می یابد .

روش اصلاح : باید از جوش گاز بی اثر (فاقد اکسیژن) برای جوشکاری استفاده شود که پدیده اکسید

شدن اتفاق نیافتد . ضمناً آزمایش تست فشار نیز بایستی با کنترل دقیق تر صورت پذیرد .

مورد ۱۰۲۰۲۷

صنعت : کاغذ سازی

جنس نمونه: فولاد زنگ نزن

مدت کارکرد : ۳ سال

سیستم : تولید خمیر کاغذ

قسمت : خط لوله انتقال خمیر

پدیده : خوردگی گالوانیکی (حفرات بعلت آلودگی با ذرات فولاد کربنی پدید آمده است)

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای به همراه اجزاء زنگ (rust) روی نمونه مشاهده می شود .

محیط : حاوی اتمسفر مرطوب اطراف لوله و خمیر کاغذ (آب با ۳٪ کاغذ) با دمای 50°C از میان لوله می

گذرد .



علت پدیده : در بالا دست این خط لوله که از جنس فولاد زنگ نزن می باشد ، یک خط لوله فولاد کربنی

قرار دارد . اجزاء کنده شده از خط لوله فولاد کربنی بر روی این لوله که از جنس فولاد زنگ نزن می باشد

راسب شده و نهایتاً تشکیل پیل گالوانیکی را می دهد .

روش اصلاح : بهتر است خط لوله فولاد زنگ نزن در این گونه عملیات با پوشش مقاومتری پوشانیده شود

تا مشکل خوردگی برطرف شود یا تمهیداتی بکار گرفته شود تا از خوردگی فولاد کربنی جلوگیری شود.

مورد ۱۰۲۰۲۸

صنعت : پلاستیک سازی (PVC)

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن

سیستم : دستگاه ساخت OVC

قسمت : لوله خط فرآیند

پدیده : خوردگی تنشی (میان دانه ای) در زیر نواحی عایق شده

مدت کارکرد : چند ماه

ظاهر نمونه : ترکهای شاخه ای بسیار ریز در روی نمونه قابل مشاهده است .

محیط : شستشو که حاوی ۶۰ ppm کلرور بوده و دمای آن 90°C - 50°C است .



علت پدیده : خط لوله عایق شده بطور منظم توسط آب شستشو که به سیستم نفوذ می کند،

و مرطوب می شود . بنابراین آب از طریق نقصهای موجود در عایق به لوله می رسد و در آنجا تبخیر

می شود ، مجموعه عوامل تنش و کلرور و دما سبب خوردگی تنشی می شود .

روش اصلاح: با عایق نمودن خوب و پوشش برای جلوگیری از نفوذ آب (بعنوان مثال پر کردن شکافهای

عایق) . ضمناً عایق نمودن با فویل آلومینیومی قبل از اعمال پوشش مذکور بسیار مفید است .

مورد ۱۰۲۰۲۹

صنعت : غذایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

سیستم : واحد سس گوجه فرنگی

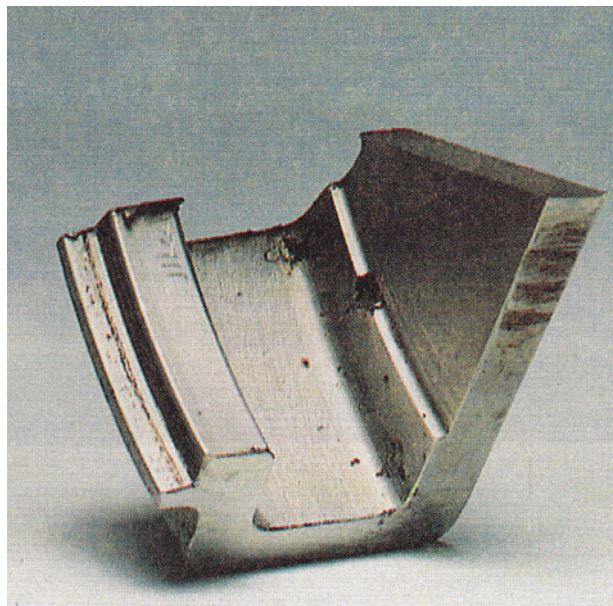
قسمت : قسمتی از روکش پمپ ریخته شده

پدیده : حمله کلریدی

مدت کارکرد : ۶ ماه

ظاهر نمونه : خوردگی شدیدی در روی نمونه پدید آمده است .

محیط : شامل ماده غذایی سس است با $\text{pH} = 3/5$ و نمک طعام 318% ، دما 90°C است .



علت پدیده : خوردگی حفره ای بعلت میزان کلرید بالا در سیستم و نیز pH پایین و دمای بالای محیط

صورت می گیرد ، روکش پمپ کمی دارای خاصیت مغناطیسی است ، که ناشی از رسوبات فریتی در

فرآیند ریخته گری است و این مسأله حساسیت فولاد را به یون کلرید افزایش می دهد .

روش اصلاح : باید روکش پمپ از جنس فولاد زنگ نزن مقاوم تر به یون کلرید ساخته شود . (به عنوان

مثال W – Nr . ۱/۴۵۳۹)

مورد ۱۰۲۰۳۰

صنعت : غذایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : کارخانه تولید لبنیات – واحد تولید پنیر

قسمت: خط لوله انتقال مایع پنیر

پدیده : حمله کلریدی

مدت کارکرد : نامعین

ظاهر نمونه : حملات حفره ای در روی نمونه صورت گرفته است .

محیط : اتمسفر مرطوب که حاوی یون کلرید و گاز کلر می باشد . این نوع آلودگیها بدلیل استفاده مرتب

محلول هیپوکلریت سدیم به منظور ضدعفونی کردن سیستم ، در محیط بوجود می آید .



علت پدیده : در اثر تبخیر آب کلر دار در لوله ها ، حفره هایی به دلیل وجود یون کلرید بوجود می آید که

این مکانیزم توسط عملکرد اکسید کنندگی هیپوکلریت سدیم تقویت می شود .

روش اصلاح : برای گندزدایی بایستی بجای هیپوکلرید سدیم از سایر محلولهای ضدعفونی کننده نظیر

هیدروژن پراکسید (Hydrogen peroxide) استفاده کرد، ضمناً ضرورت دارد تا آب مورد استفاده

حاوی مقادیر کم کلور باشد .

مورد ۱۰۲۰۳۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : مخزن ذخیره بنزین

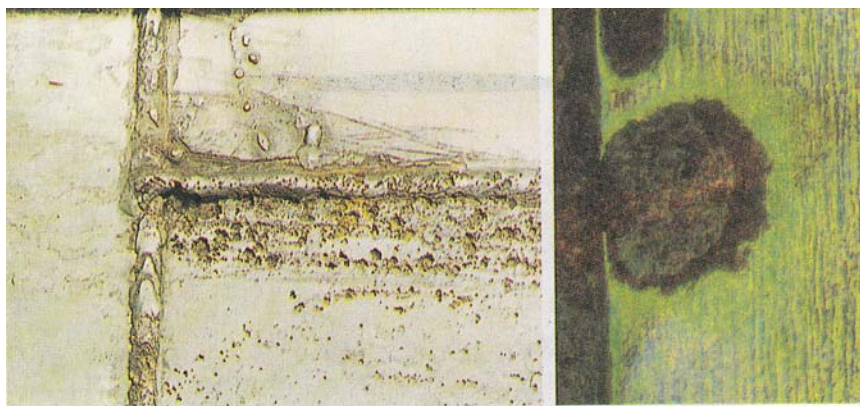
قسمت : صفحه کف مخزن

پدیده : حمله کلریدی

مدت کارکرد: ۶ سال

ظاهر نمونه : خوردی حفره ای در داخل سیستم صورت گرفته است .

محیط : فاز آبد حاوی یون کلرید با مقدار ناچیزی SO_2 ، دما 50°C است .



علت پدیده : تحت شرایط حاکم بر سیستم و درجه حرارت مذکور فولاد زنگ نزن مستعد به حمله کلریدی

به خصوص در نزدیکی نواحی جوش است .

روش اصلاح : باید انتخاب مواد مناسبتری صورت گیرد و مخزن از جنس فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶

ساخته شود .

مورد ۱۰۲۰۳۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : سیستم شستشو

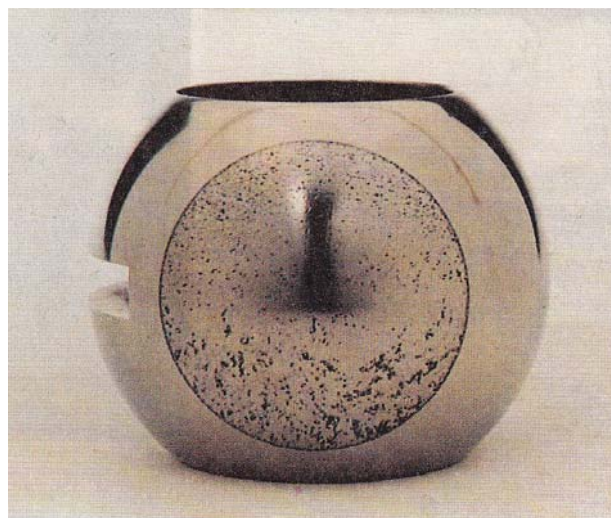
قسمت : ساچمه (توپ) شیر

پدیده : حمله کلریدی

مدت کارکرد : چند روز

ظاهر نمونه : حملات حفره ای در نمونه صورت گرفته است .

محیط : حاوی بازدارنده و اسید کلریدریک ۱٪ دما 20°C است .



علت پدیده : بدلیل آبکشی ناقص و باقیماندن اسید بعد از خاتمه اسید شویی در سیستم و از بین رفتن

اثرات بازدارنده ، فلز مورد حمله قرار گرفته است .

روش اصلاح : دقت در آب کشی کامل سیستم و حذف باقیمانده های اسید پس از خاتمه اسید شویی

مورد ۱،۲،۳۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۰)

سیستم : کوره کراکینگ

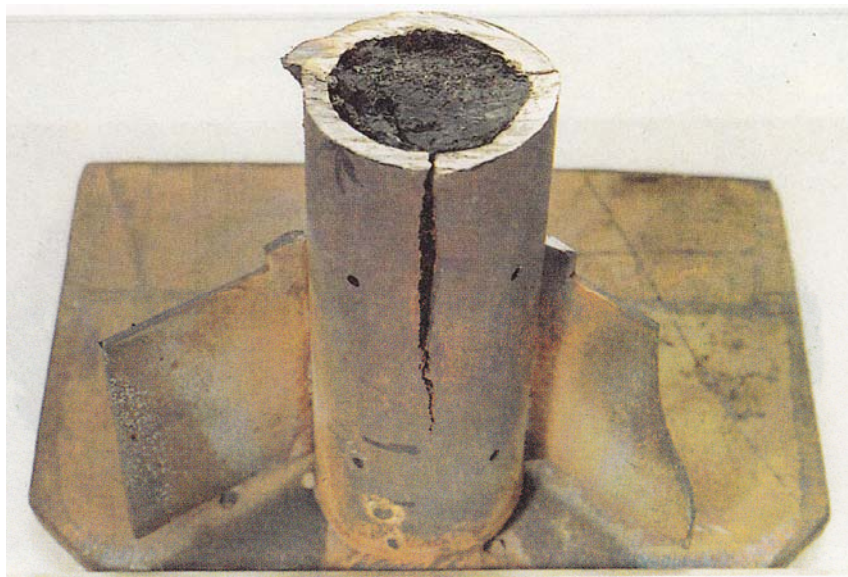
قسمت : مشعل جلویی با Nox پایین

پدیده : شکنندگی فاز سیگما

مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : ترکهایی طولی به همراه پر شدن آنها که ناشی از ترک های داخل سیستم است و

محیط : حاوی اتمسفر گازی با دمای بالا است .



علت پدیده : تشکیل کک سبب بسته شدن نقاط تزریق گاز می شود و این امر سبب افزایش دما شده و

زمینه برای تشکیل فاز سیگما ($500-900^{\circ}\text{C}$) فراهم می شود . در نتیجه شکست ترد فلز بصورت بین دانه

ای در اثر تنشها صورت می گیرد .

روش اصلاح : با بکار بردن موادی که به تشکیل فاز سیگما مستعد نیستند می توان مشکل را برطرف کرد

در این مورد صنعتی باید از اینکولوی H ۸۰۰ استفاده کرد و نیز با طراحی مناسب تر و بزرگتر کردن

دهانه تزریق به نحوی که احتمال بسته شدن آنها کاهش یابد .

مورد ۱,۲,۳۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (اورانوس ۱/۴۵۳۹ Br: W.-Nr.)

سیستم : خطوط لوله انتقال اسید سولفوریک آلوده

قسمت : صفحه سوپاپ

پدیده : خوردگی بین دانه ای مدت کارکرد : ۱۵ ماه

ظاهر نمونه : حمله خوردگی شدیدی به همراه شبکه ایی از ترکها در هر دو سمت صفحه سوپاپ رخ داده است .

محیط : حاوی محلولی از اسیدسولفوریک ۷٪، سولفات روی ۴٪، سولفات منیزیم ۰/۵٪، سولفات منگنز ۰/۵٪ است. دمای محیط °C ۳۰ و فشار ۲/۷ بار و سرعت ۱/۶m/s است .



علت پدیده : بکار بردن آلیاژی که به این محلول مقاوم نیست سبب اضمحلال و پدیده خوردگی در سیستم شده است .

روش اصلاح : با انتخاب مواد مناسب تر و ساختن سوپاپ از جنس اینکولوی ۸۲۵ (W – Nr۲/۴۸۵۸) مشکل سیستم برطرف می شود .

مورد ۱.۲.۳۵

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI۳۰۴) سیستم : مدار شستشو

قسمت: الکترودهای دستگاه هدایت سنج که در مدار واقع شده است .

پدیده : خوردگی جریان سرگردان مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : الکترودها کاملاً حل شده اند

محیط : شامل مایعات مختلف شستشو است از جمله آب خام ، آب خام با سود سوز آور و EDTA ، آب

خام با ۲۰-۳۰ ppm گاز کلر .



علت پدیده : بعلا اختلاف در مقاومت کابلهای زمینی الکترودها و دیواره لوله ، یک اختلاف پتانسیل DC

بین الکترودها و دیواره لوله بوجود می آید . جریان موجود در سیستم سبب ایجاد برخی از انواع خوردگی

جریان سرگردان می شود .

روش اصلاح : با بهبود در وضعیت اتصال زمین اختلاف پتانسیل بین الکترودها و دیواره لوله را می توان

به حداقل رساند .

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن دابلکس (۶ ۲۵ CrNiMoN x۲)

مدت کارکرد : ۳ سال

سیستم : کندانسور جزیی برای کاربرات آلومینیم

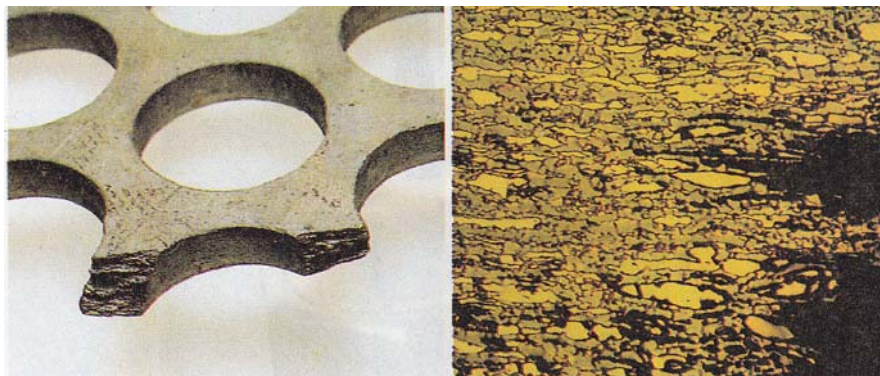
قسمت : صفحه نگهدارنده پایینی

پدیده : خوردگی بین دانه ای و حمله آستنیتی انتخابی (Selective austenite attack)

ظاهر نمونه : در بازرسی چشمی هیچ چیز مشاهده نمی شود ، اما مشاهدات میکروسکوپی حاکی از

حمله انتخابی به فاز آستنیت و خوردگی بین دانه ای در امتداد مرزدانه های فریب و آستنیت است .

محیط : حاوی کاربرات آمونیم بدون اکسیژن ، دما 125°C و فشار ۶ بار .



علت پدیده : فولاد دابلکس با کیفیت پایین : با مقدار آستنیت بالا (۷۰-۶۰٪)، با یک ساختار میکروسکوپی

شامل زمینه آستنیتی با جزایر فریتی بجای یک زمینه فریتی با جزایر آستنیتی است . تحت این شرایط

رویین شدن مجدد آستنیت صورت نمی گیرد ، بنابراین شکست ترد در قطعه رخ می دهد .

روش اصلاح : باید میزان آستنیت و فریت در دابلکس متعادل شود و کیفیت فولاد بهتر گردد .

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

قسمت : شیر ساچمه ای (ball valve)

سیستم : سکوی دریایی

مدت کارکرد : چند ماه

پدیده : سایش

ظاهر نمونه : در روی گلوله و نشیمنگاه ، شیارهایی قابل مشاهده است .

محیط : حاوی کانالیزور با حامل سرامیکی (Catalyst on Ceramic Carrier) است .



علت پدیده : حامل سرامیکی در مقایسه با گلوله و نشیمنگاه سخت تر است . به نحوی که مواد کانالیزوری

بر روی مواد نرم تر جای می گیرند .

روش اصلاح : با بکاربردن موادی از جنس سخت تر برای گلوله و نشیمنگاه ، مشکل مرتفع می شود .

مورد ۱.۲.۳۸

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶ Cast Y ACI – ۱۲M)

سیستم : پمپ

قسمت : پروانه

پدیده : خوردگی بین دانه ای

مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : انحلال دانه ها به صورت نسبی در سطح دانه ها صورت گرفته است و شبکه ای از ترک در

نمونه بوجود آمده است .

محیط : حاوی اسید نیتریک ۵٪ است . دما $^{\circ}\text{C}$ ۶۰-۲۰ است .



علت پدیده : به علت حضور مولیبدن و مقدار کربن بالا در فولاد ، اثر توآم این دو عنصر سبب شدت

بخشیدن به خوردگی بین دانه ای فولاد زنگ نزن در محیط اسیدنیتریک غلیظ می شود .

روش اصلاح : در این محیط خاص ، باید فولاد زنگ نزن از نوع ۳- ACI CF (AISI ۲۰۴ l Cast) بکار

برد که مقدار کربن و مولیبدن آن پایین است .

مورد ۱.۲.۳۹

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۰ Cast)

سیستم : کوره

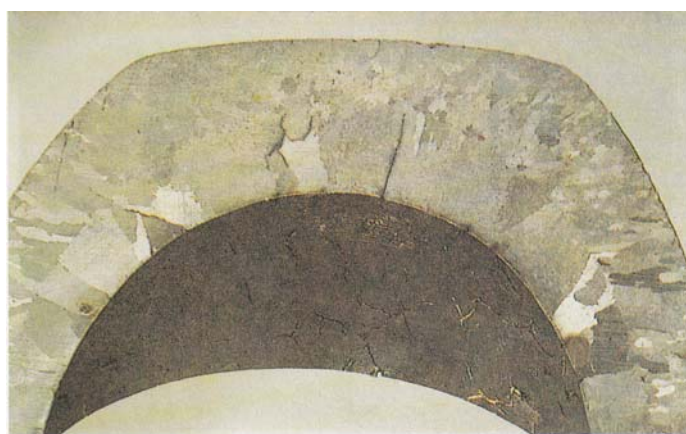
قسمت : زانویی لوله

پدیده : خستگی حرارتی (بین دانه ای)

مدت کارکرد : حدود ۵ سال

ظاهر نمونه : ترکهایی روی نمونه پدید آمده است .

محیط : نفت ، دما $^{\circ}\text{C}$ ۸۰۰-۱۰۵۰ .



علت پدیده : خستگی حرارتی به علت نوسانات دما بوجود آمده است .

روش اصلاح : با بهبود ریخته گری قطعه و تعدیل نمودن شرایط فرآیند به منظور جلوگیری از نوسانات

زیاد دما ، مشکل مرتفع می شود .

مورد ۱.۲.۴۰

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

سیستم : انتقال اسید سولفوریک

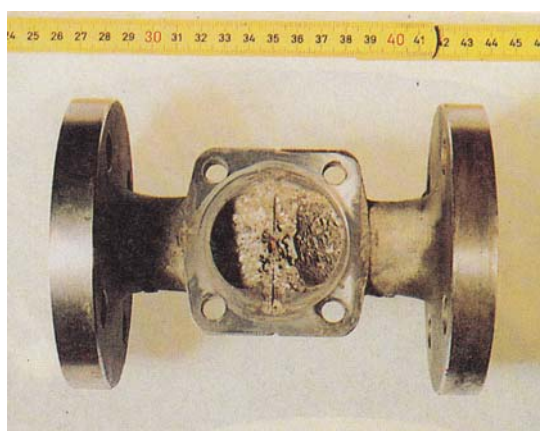
قسمت : دریچه (Valve)

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : ۴ سال

ظاهر نمونه : حملات شدیدی در قسمت داخلی نمونه بوقوع پیوسته است .

محیط : حاوی اسیدسولفوریک ۲۰-۲۵٪ و دما $^{\circ}\text{C}$ ۲۰-۱۵ است .



علت پدیده : شیر از جنس فولاد زنگ نزن به عنوان یک ماده مناسب در این محلول ساخته شد. قبلاً نمونه

لعابی بکار می رفت که به علت داشتن سوراخ در لعاب خورده شده بود .

روش اصلاح : با بکار بردن پوششی از جنس PTFE (polytetrafluoroethylene) بر روی دریچه

فولادی مشکلی بوجود نخواهد آمد .

مورد ۱.۲.۴۱

صنعت : برق

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

سیستم : سیستم خنک کننده نیروگاه حرارتی

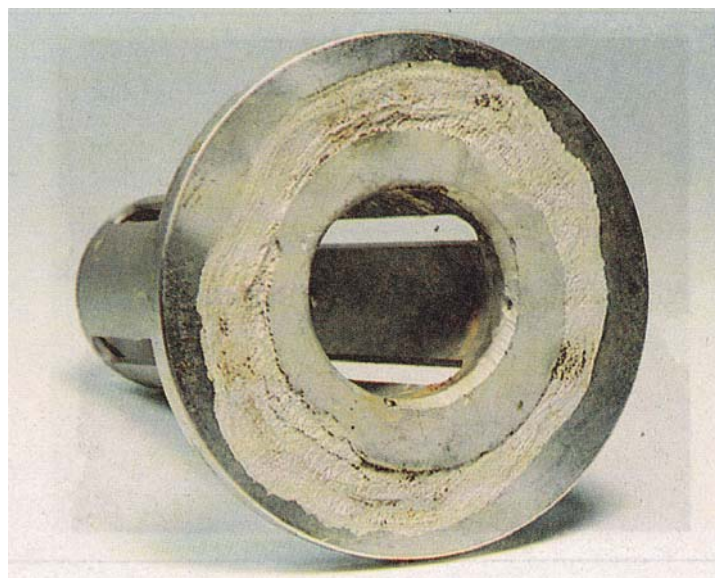
قسمت : فیلتر آب خنک کننده کندانسور بخار

پدیده : خوردگی شکافی

مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : حمله موضعی در زیر نواحی آب بندی شده صورت گرفته است .

محیط : آب دریا در گردش ، با حداکثر دمای 40°C .



علت پدیده : به علت حضور شکافهایی و درزهایی بین لوله فولادی و آب بندها ، سازه به صورت موضعی

به حمله کلریدی بسیار حساس بوده و زوال صورت گرفته است .

روش اصلاح : با بکار بردن یک فیلتر پلاستیکی یا با آب بندی کردن شکافها و درزها با مواد مناسب

مشکل برطرف می شود .

جنس نمونه: فولاد زنگ نزن (که در بالای آن فولاد AISI ۳۲۱ جوش شده است و در پایین آن فولاد

AISI ۳۱۶ جوش داده شده است) . **قسمت :** دیواره جوش داده شده

سیستم : راکتور اختلاط **مدت کارکرد :** حدود ۲ سال

پدیده : دو نوع مختلف خوردگی بین دانه ای در نزدیکی نواحی جوش رخ داده است . حمله شیار چاقویی و فساد

ناشی از جوش

ظاهر نمونه : در قسمت بالایی نمونه : درست در امتداد قسمتهای جوش حمله شیار چاقویی رخ داده است

در قسمت پایینی در برخی فواصل از خط جوش ، فساد ناشی از جوش صورت گرفته است.

محیط : شامل مخلوطی از اسیدنیتریک و سایر اسیدهای معدنی اکسید کننده است . دمای محیط 110°C - 110°C و

فشار اکسیژن در سیستم بالاست.



علت پدیده : فساد و پوسیدگی جوش، هنگامی که فولاد زنگ نزن پایدار شده با Nb یا تیتانیم جوش داده می شود ،

در نواحی اطراف جوش ، بطور ناگهانی کاربیدها به داخل محلول (در دمای بالاتر از 1225°C) مهاجرت کرده و

هنگام سرد کردن سریع در محلول باقی می مانند . هنگامی که نواحی جوش داده شده در دمای بحرانی قرار می

گیرد ، (به عنوان مثال در جوش چند لایه و یا آنیل تنش زدایی) رسوب کاربید کرم بوجود می آید . بنابراین ، این

نواحی (نواحی جوش داده شده) به خوردگی بین دانه ای حساس هستند .

روش اصلاح : از فساد و پوسیدگی جوش فولاد زنگ نزن پایدار شده به کمک روشهای زیر می توان جلوگیری کرد:

عملیات حرارتی بعد از جوش تا 1065°C به نحوی که کاربید کرم حل شود و کاربید تیتانیم تشکیل شود . بعد از آن

، نرخ سرد کردن فاکتور مهمی محسوب نمی شود ، همچنین با انتخاب مواد مناسب تر می توان از فساد جوش

جلوگیری به عمل آورد .

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (W-Nr. ۱,۴۵۷۱ , AISI ۳۱۶ Ti)

سیستم : دستگاه زباله سوز لجن در یک واحد تصفیه فاضلاب

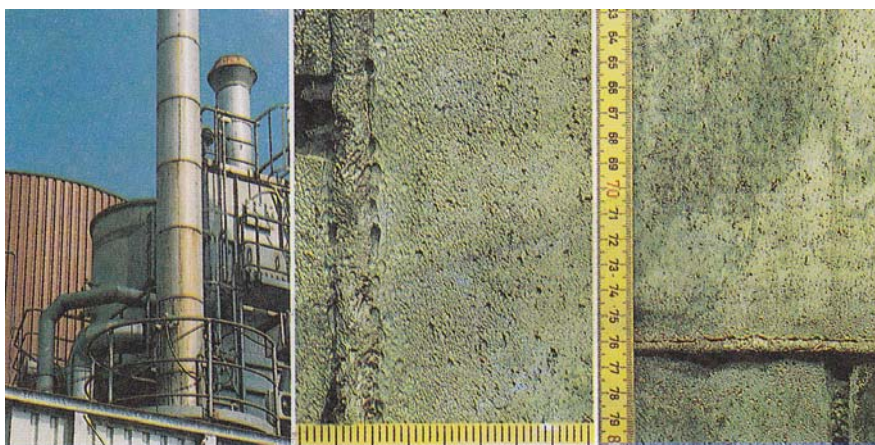
قسمت : دودکش ایزوله شده با پشم معدنی (Mineral wool-insulated stack) در مسیر گاز خروجی

پدیده : حمله کلریدی و خوردگی شیار چاقویی مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : عکسهای سمت چپ : خوردگی خارجی پوشش آلومینیمی؛ وسط: خوردگی حفره ای که بیشتر در

نزدیکی گرده جوش می باشد و سمت راست : خوردگی بسیار تیز (Razor-Sharp) که در کنار جوش می باشد .

محیط : گازهای دودکش مرطوب حاوی کلرور ، دما : 80°C - 60°C .



علت پدیده : وجود آب در گازهای خروجی که حاوی 560 ppm کلر می باشد و pH آن نیز $2/8$ است ، باعث خوردگی حفره ای فولاد زنگ نزن می شود ، نشتهای اولیه مربوط به نواحی است که جوش داده نشده است و این منجر به خوردگی صفحات آلومینیمی عایق می شود . خوردگی فاسد شدن جوش را می توان با اضافه کردن تیتانیم ممانعت کرد . ولی خوردگی شیار چاقو چنین نیست و با تیتانیم نمی توان از آن جلوگیری کرد .

روش اصلاح :

- دودکش زیاد بلند ساخته نشود و همچنین از فولاد کربنی ساخته شود .
- قلیایی کردن آب خروجی
- ساخت تنوره با تیتانیم
- در صورتی که گاز خروجی حاوی HF باشد، کاربرد تیتانیم یا فایبر گلاس یا پلاستیکهای تقویت شده با شیشه انتخاب مناسبی نمی باشد .

مورد ۱.۲.۴۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : مدار تمیزکاری (Cleaning circuit)

قسمت : لوله

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : ۲ هفته

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت ، اچ شدن سطح و از بین رفتن کامل درز جوشکاری شده.

محیط : تمیزکاری (اسیدسولفامیک ۶٪ در دمای 20°C).



علت پدیده : فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در برابر اسیدسولفامیک ۶٪ مقاوم نمی باشد .

روش اصلاح : لوله از فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۷

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (نوع آن معلوم نیست)

سیستم : واحد تصفیه فاضلاب

قسمت : قسمتی از پمپ (worm of worm gear pump)

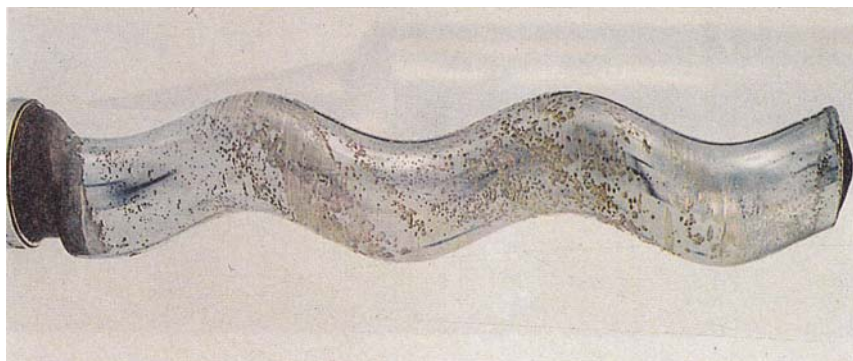
پدیده : حمله کلریدی و سایش مدت کارکرد : چند ماه

ظاهر نمونه : به وجود آمدن خوردگی حفره ای همراه با شیار

محیط : لجن حاصل شده از واحد تصفیه فاضلاب که به این لجن کلرورفریک بمنظور کنترل بوی بد آن (

در اثر (H_2S) اضافه می شود. PH کلی محلول حدود ۷ می باشد ، ولی در داخل پمپ می تواند به کمتر از

این مقدار برسد .



علت پدیده : خوردگی حفره ای در اثر مقدار کلرور و پایین بودن pH و وجود $FeCl_3$ می باشد . سایش نیز

در اثر حضور ذرات شن و ماسه در لجن به وجود می آید .

روش اصلاح : با ساختن ای قسمت از پلاستیک این مشکل مرتفع می شود .

مورد ۱,۲,۴۶

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (۳۱۶ Ti)

سیستم : دیگ بخار فشار بالا

قسمت : محور شیر کاهش دهنده فشار که برای نمونه برداری آب دیگ بخار از آن استفاده می شود .

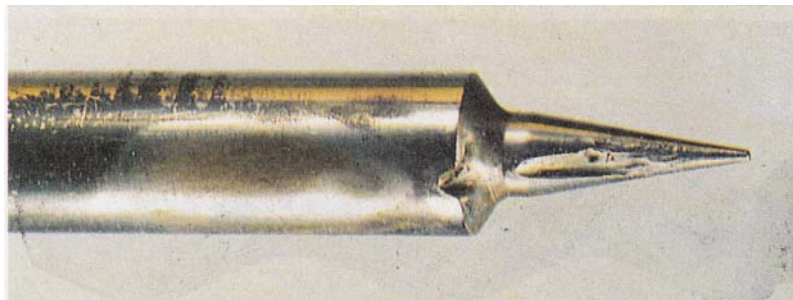
پدیده : سایش

مدت کارکرد : چند ماه

ظاهر نمونه : نقاطی از محور بمقدار زیاد دچار سایش شده است و در نتیجه خاصیت آب بندی خود را از

دست داده است .

محیط : آب دیگ بخار که همراه با ذرات مگنتیت (Fe_3O_4) می باشد .



علت پدیده : محور باید از آلیاژ استلایت (آلیاژ کبالت - کرم) مقاومت زیادی در برابر خوردگی سایشی

دارد ، ساخته شود . ساختن این محور از آلیاژ فولاد آستنیتی که دارای قابلیت شکل پذیری بالا بوده ولی

در برابر خوردگی سایشی مقاومت کافی ندارد ، باعث به وجود آمدن این خوردگی شده است .

روش اصلاح : ساختن محور با آلیاژ استلایت (stellite)

مورد ۱,۲۴۷

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

قسمت : Cascade Jacket

سیستم : هوازداى آب تغذیه دیگ بخار (بویلر)

مدت کارکرد : نامعلوم

پدیده : خوردگی تنشى (درون دانه ای) زیر عایق بندی

ظاهر نمونه : ترک خوردن شاخه ای

محیط : داخلی : آب نرم شده که دمای آن 105°C می باشد .



علت پدیده : بخار شدن آب تغذیه دیگ بخار که به زیر عایقها نفوذ کرده است ، باعث به جا گذاشتن مقدار

زیادی نمک که منجر به خوردگی تنشى درون دانه می شود .

روش اصلاح :

- تعویض صفحات خورده شده

- با به کار بردن یک فولاد زنگ نزن حفاظت شده با یک پوشش خارجی اضافی می توان از این خوردگی

جلوگیری کرد .

مورد ۱,۲,۴۸

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶ Ti) سیستم : مبدل حرارتی

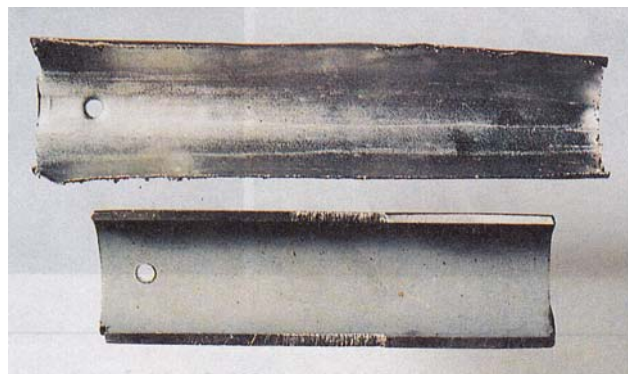
قسمت : لوله آسیب دیده همراه با یک لوله نو که برای مقایسه در زیر آن قرار دارد .

پدیده : خوردگی اسیدی مدت کارکرد : ۱۴ روز

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت .

محیط : اطراف لوله: بخار °C ۱۴۰ ، داخل لوله : ماده پاک کننده مصنوعی ، اسید سولفوریک و گاهی اوقات

حاوی مقدار کمی اسیدسولفوریک . pH محلول کمتر از ۱ می باشد .



علت پدیده : در این دما ، فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶ Ti در برابر مقدار کم اسیدسولفوریک مقاومت ندارد

. خوردگی در نواحی ورودی بخار که دما، در آن مناطق بالا است ، رخ می دهد .

روش اصلاح:

- در صورت امکان ، کاهش دما
- بهبود مرحله خنثی کردن اسیدسولفوریک قبل از رسیدن به مبدل
- استفاده از مواد مقاومتر در برابر خوردگی برای مثال هاستولی B-۲

مورد ۱.۲.۴۹

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

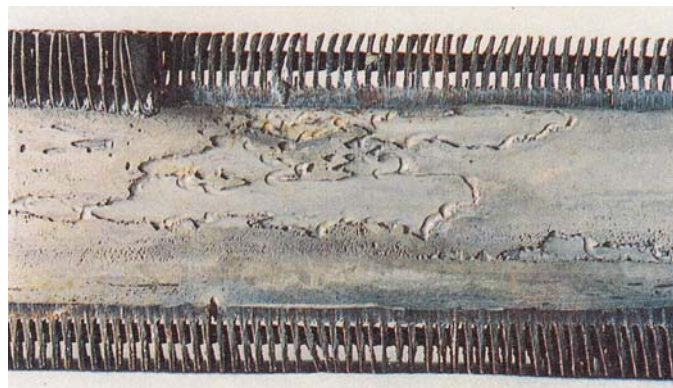
سیستم : واحد اسید سولفوریک

قسمت : واحد خنک کننده مبدل حرارتی اسیدسولفوریک که با هوا خنک می شود .

پدیده : خوردگی اسید مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت موضعی (Local uniform attack).

محیط : اسیدسولفوریک ۹۸/۵-۹۶٪ ، دما ۸۰-۸۵ °C ، سرعت تقریبی ۱ m/s ،



علت پدیده : فولاد زنگ نزن AISI Ti در دمای ۸۰ °C و محیط حاوی اسیدسولفوریک ۹۸/۵٪ مقاوم

نمی باشد .

روش اصلاح :

- ساخت خنک کن از آلیاژهای پایه نیکلی که حاوی Cr و Mo باشد ، بعنوان مثال هاستلوی

C (Hastelloy C) که گران می باشد یا

- به کاربردن حفاظت آندی

مورد ۱.۲.۵

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶ L)

سیستم : واحد چسب سازی

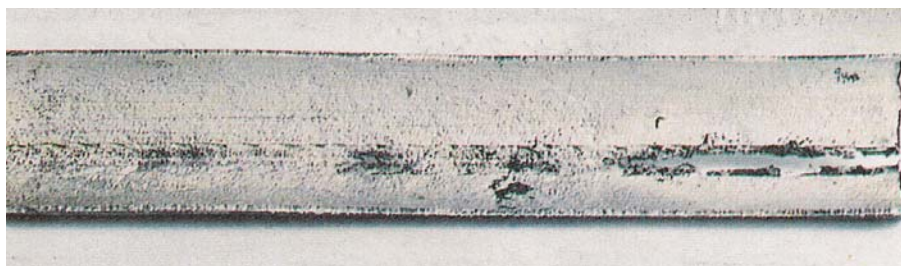
قسمت : لوله تخلیه اتوکلاو

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : ۴ ماه (۲۰۰۰ ساعت کاری)

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت

محیط : اسید فسفریک ۷۵٪ که دمای آن بین 110°C - 20°C می باشد .



علت پدیده : فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L در برابر اسید فسفریک ۷۵٪ در دمای 110°C مقاوم نمی باشد .

روش اصلاح : ساخت لوله از فولاد زنگ نزن (W- Nr. ۱,۴۵۶۳)

مورد ۱,۲,۵۱

صنعت : نفت

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : فیلترزغالی فعال شده (activated charcoal filter)

قسمت : ناحیه دیواری

پدیده : خوردگی گالوانیک

مدت کارکرد: نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای موضعی .

محیط : زغال فعال شده ، هیدروکربنهای کلرینه شده و بخار چگال شده .



علت پدیده : در حین احیاء کردن فیلتر با بخار آب ، کندانسه شدن بخارات باعث ایجاد یک لایه بر روی

دیواره سرد فیلتر می شود که این لایه باعث تشکیل یک پیل گالوانیک بین زغال و فولاد زنگ نزن می شود

.

روش اصلاح : آب بندی و پوشش دیواره فولادی با یک پوشش سخت شونده گرم

(Hot-hardened coating)

جنس نمونه: فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴L)

سیستم: واحد تصفیه فاضلاب

قسمت: کانال هواکش و محفظه هواکش سیستم تهویه

پدیده: حفره دار شدن در اثر یون کلرید مدت کارکرد: ۲ سال

ظاهر نمونه: خوردگی حفره ای همراه با مناطقی که از محصولات خوردگی پوشیده شده است.

محیط: هوای مرطوب که با یون کلرید H_2S و گازهای دیگر آلوده شده است. دما حدود $20^{\circ}C$ - $5^{\circ}C$ عمل

تقطیر و بخار شدن به خوبی انجام می شود.



علت پدیده: خوردگی حفره ای (که به دلیل بالا بودن مقدار یون کلرید موجود در هوا که در نتیجه تبخیر

فاضلاب ایجاد می شود صورت گرفته است.

روش اصلاح: سیستم هواکش از پلاستیک ساخته شود.

مورد ۱۰۲.۵۳

صنعت : آب و فاضلاب

جنس نمونه فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

پدیده : حمله کلریدی

سیستم : واحد تصفیه فاضلاب بطریقه فیزیکی - شیمیایی

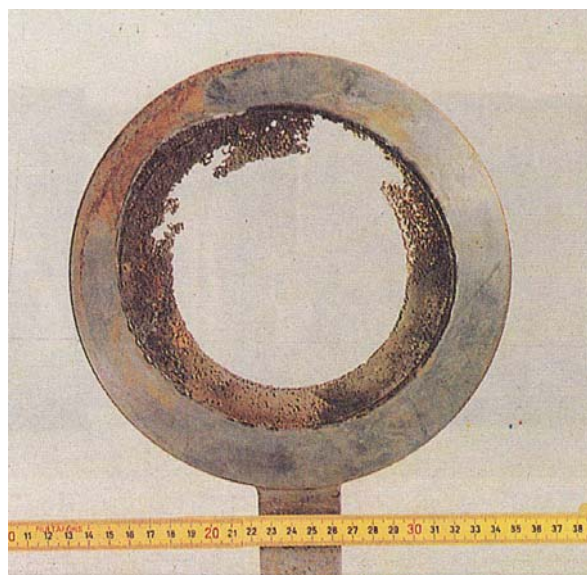
قسمت : فلانچ مخلوط کن در خط لوله پس آب (waste water)

مدت کارکرد: ۶ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای در مناطق زیادی از فلانچ

محیط : پس آب در دمای $25-30^{\circ}\text{C}$ که به این آب محلول FeCl_3 ۴۳٪ اضافه می شود تا غلظت آن در آب

به حدود ۵۰۰-۱۰۰۰ برسد .



علت پدیده : خوردگی حفره ای در اثر ترکیب شدن دو عامل خورنده به وجود می آید این دو عامل ، یکی

بالا بودن غلظت کلرور و دیگری کم بودن pH می باشد .

روش اصلاح : جایگزین کردن فلانچ خورده شده با یک فلانچ پلاستیکی .

مورد ۱.۲.۵۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (فولاد ۱۲٪ کرم : AISI ۴۱۰) قسمت : محور پمپ

سیستم : برج شستشو دهنده دی اکسید کربن (Carbon dioxide Scrubbing)

پدیده : خوردگی سایشی مدت کارکرد : تقریباً ۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی

محیط : محلول مونواتانول آمین (MEA) در آب که CO_2 جذب این آب شده است .



علت پدیده : تماس فولاد با یک محلول خورنده که سرعت آن بالا است و تلاطم زیادی نیز در سیستم

وجود دارد .

روش اصلاح : با در نظر گرفتن مواد اقتصادی می توان روشهای زیر را به کار برد :

* استفاده از مواد آلیاژی با درصد بالا (High alloyed material) .

* بهبود فرآیند ساخت .

* توجه به عمر قطعات در طراحی و نهایتاً تعویض مرتب آنها .

مورد ۱.۲.۵۵

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶)

سیستم : خنک کننده روغن

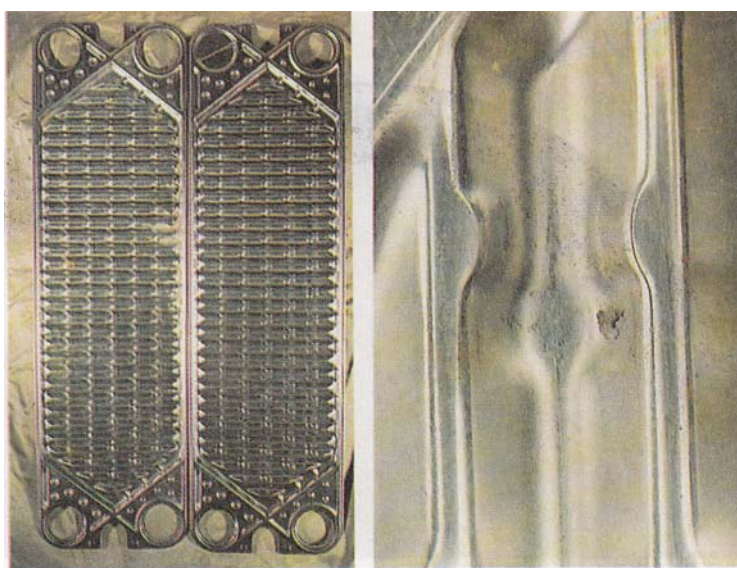
قسمت : صفحات مبدل حرارتی

پدیده : خوردگی شیاری

مدت کارکرد : ۱ سال

ظاهر نمونه : حفره دار شدن در سمت آب خنک کن

محیط : آب حاوی اکسیژن و کلرور که مقدار کلرور آن ۱۰۰ ppm می باشد .



علت پدیده : به دلیل وجود شیار در مبدل حرارتی ، این قطعه نسبت به خوردگی شیاری و حفره دار شدن

به وسیله یون کلرور حساس می باشد . در این حالت حفره دار شدن به صورت خوردگی شیاری رخ می

دهد .

روش اصلاح : استفاده از یک طراحی بهتر و یا ساخت لوله ها از مواد بهتر (نظیر تیتانیم) .

مورد ۱,۲,۵۶

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶) سیستم : کندانسور بخاری نیروگاه

قسمت : پله های داخل هدر آب (Step inside water header)

پدیده : حمله کلریدی مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای .

محیط : آب دریای سرد .



علت پدیده : بالا بودن مقدار یون کلرید در آب دریا باعث به وجود آمدن حفره می شود . این خوردگی با وجود موجودات دریایی و اتصال الکتریکی با لوله های تیتانیومی که باعث ایجاد خوردگی گالوانیک می شوند ، تشدید می گردد.

روش اصلاح :

* پوشش دادن پله ها با لاستیک های مناسب (Rubberized)

* برداشتن پله ها و استفاده از یک نردبان (Ladder) موقت به منظور بازرسی .

مورد ۱.۲.۵۷

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : راکتور برای تولید کاتالیست

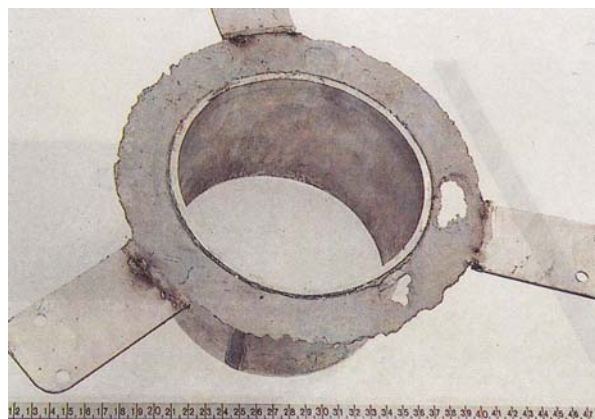
قسمت : نگه دارنده هم زن

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : چند سال

ظاهر نمونه : لبه ها به طور یکنواخت آسیب دیده است . در حالی که میله ای که به صفحات جوش داده شده است . دچار خوردگی نگردیده است .

محیط : حاوی دوغاب آلومینیم - سیلیکا همراه با مقدار کمی اسیدسولفوریک . pH محلول حدود ۳ و دمای آن ۵۰ °C می باشد .



علت پدیده : انتخاب نامناسب مواد : همانند قسمت لوله و صفحات ، طوقه نیز باید از فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶ ساخته شود .

روش اصلاح : دقت در انتخاب مواد مناسب با مشخص کردن مواد در انبار و استفاده از استانداردها در انتخاب نوع ماده در زمان طراحی و ساخت.

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (Uranus Bb , W. Nr, ۱,۴۵۳۹)

سیستم : راکتور اختلاط

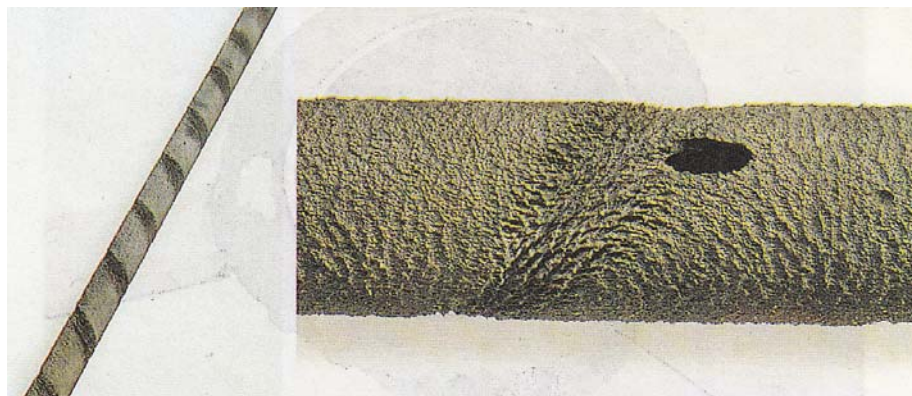
قسمت : لوله گرم کننده

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : ۳-۴ سال

ظاهر نمونه : سطح خشن و منافذ موضعی در نواحی مارپیچی به رنگ تیره پدید آمده است که این نواحی به شدت آسیب دیده است .

محیط : داخل لوله : بخار



خارج لوله : مخلوطی از اسید نیتریک و سایر اسیدهای معدنی اکسید کننده دما 110°C - 110°C و فشار اکسیژن بالا است .

علت پدیده : این ماده به این محیط مقاوم نیست . با قرار دادن یک ترموکوپل در سیستم مشاهده می شود که یک شکاف در آن قسمت سیستم وجود دارد ، در حالی که البته انتقال حرارت پایین است ، بنابراین دمای دیواره بالاتر می ماند به نحوی که خوردگی شدیدی در آن نواحی رخ می دهد .

روش اصلاح :

- نباید ترموکوپل را در اطراف نواحی مارپیچی لوله قرار داد .
- باید به طور متناوب قطعات را جایگزین کرد ، زیرا از حمله عمومی نمی توان جلوگیری کرد .

مورد ۱.۲.۵۹

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۴۱۰)

سیستم : واحد مولکول شکنی کاتالیزوری

قسمت : میله یک شیر ۴۲ اینچ

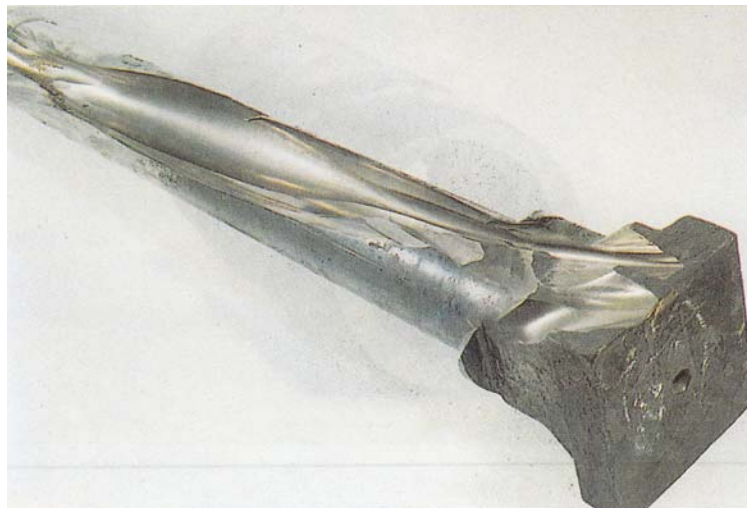
پدیده : سایش

مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : قطعه تا اندازه ای دچار سایش شده و میله در بعضی جاها یک شکل تیغ مانند پیدا کرده

است

محیط : بخار همراه با کاتالیزور پایه سرامیک ، دما 480°C می باشد .



علت پدیده : سایش در اثر نشتی از یک آب بند (gland) که باعث عبور کاتالیزور با سرعت زیاد می شود

، می باشد . بخار به منظور ایجاد یک محیط شناور به منظور جلوگیری از مسدود شدن دریچه تولید کک

به داخل سیستم تزریق می شود .

روش اصلاح : بازرسی منظم به منظور جلوگیری از نشتی و تعویض کردن میله با توجه به عمر آن .

مورد ۱.۲.۶۰

صنعت : دیگ بخار کارخانه

جنس نمونه : فولاد (۱۰ ۹ CrMo ۱۳)

قسمت : لوله سوپر هیتر

سیستم : دیگ بخار (لوله آب دیگ بخار) فشار ۶۱ بار و دما 430°C با سوخت نفت کوره

پدیده : سولفیداسیون

مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواختی در سطح خارجی لوله صورت گرفته است که به دلیل حرارت دیدن ،

ترک هایی نیز در روی آن ایجاد شده است .

محیط : محیط شامل رسوباتی است که در اثر استفاده از سوخت سنگین ایجاد شده است که این رسوبات

حاوی بیش از ۷۰٪ سولفات سدیم و ۴٪ اکسیدوانادیم است .



علت پدیده : حضور اکسید فلزات سنگین نظیر (V, W, Nb) ، اکسیداسیون در دمای بالا را تسریع می کند

سوخت سنگین شامل گوگرد، وانادیم و سدیم است . در دمای بیش از 600°C در روی دیواره لوله ، اکسید

وانادیم و سولفات سدیم ذوب شده و سبب خوردگی فولاد می شود .

روش اصلاح : تزریق افزودنیهای مختلف به سوخت می تواند مؤثر باشد . همچنین بکار بردن گاز طبیعی

بدون سولفور نیز به عنوان سوخت اصلی بسیار مفید است .

مورد ۱,۲,۶۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : ماده پایه فولاد آلیاژی با ترکیب (W-Nr.۱,۷۳۸۰ , ۱۰ ۹ CrMo ۱۰) است که این فولاد از

پهلو به فولاد زنگ نزن آلیاژی ۳۴۷ جوش داده شده است .

سیستم : واحد گوگردزدائی

قسمت : قالب آزمایش راکتور

پدیده : خوردگی سولفوری

مدت کارکرد : ۴ سال

ظاهر نمونه : حملات یکنواختی در فلز پایه صورت گرفته است .

محیط : شامل هیدروکربنها با H_2S و H_2 است . دما حدود $350-385^{\circ}C$ است . فشار جزیی هیدروژن

تقریباً ۳۰ بار است .



علت پدیده : در حضور هیدروژن ، فلز پایه مورد حمله گوگرد ، در دمای بالا قرار می گیرد.

روش اصلاح : فولاد پایه بایستی با فولاد زنگ نزن ۳۴۷ پوشش داده شود تا مشکل برطرف شود.

(Cladding)

مورد ۱,۲,۶۲

صنعت : تصفیه آب

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن

سیستم : سیستم لوله کشی آب داغ

قسمت : لوله ها

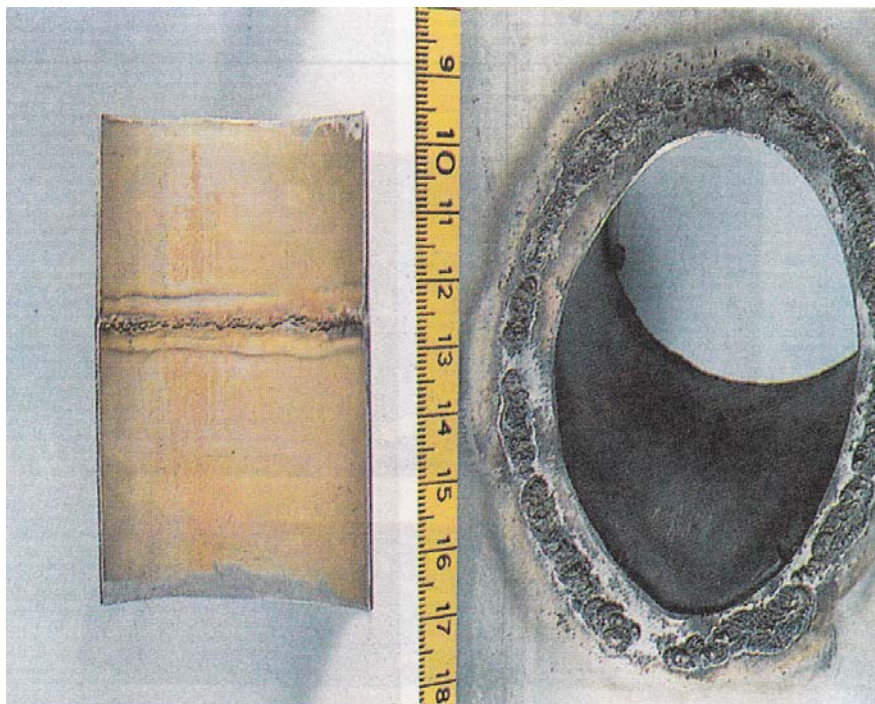
پدیده : خوردگی شیاری

مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : حفرات ریزی در مناطق جوشکاری بوجود آمده است .

محیط : آب قلیازدایی شده ، که تا 90°C گرم شده است . کیفیت آب $\text{PH} = 7/2$ و میزان کلرور برابر

۳۰ ppm است .



علت پدیده : جوشکاری ضعیف (وجود شیارها و درزها در خط جوش ، که علت آن انجام جوشکاری

بدون گاز محافظ است.)

روش اصلاح : با بکاربردن یک روش جوشکاری جدیدتر و بهتر (کارکردن تحت گاز محافظ و نیز بکار

بردن الکترودهای 316L) مشکل بر طرف می شود .

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

سیستم : کارخانه تصفیه فاضلاب

قسمت : اسکلت فلزی

پدیده : حمله کلریدی

مدت کارکرد : ۱/۵ سال

ظاهر نمونه : سطح خارجی نمونه با زنگ آهن به رنگ قرمز آجری در آمده است ، همچنین تعداد کمی حفره ریز نیز در روی نمونه قابل مشاهده است .

محیط : اتمسفر مرطوب صنعتی که باعث به وجود آمدن قطرات آب با $\text{PH}=4/6$ و حاوی 270 ppm کلر بر روی فولاد زنگ نزن می شود .



علت پدیده : بخارات اسید کلریدریک حاصل از کلرید آلومینیم که به منظور تصفیه فاضلاب به آن تزریق می شود محصولات خوردگی حاوی 20000 ppm کلر است .

روش اصلاح : با تمیز کردن و صاف کردن سطح سازه و سپس اسید شویی و روئین کردن سازه به وسیله روش غوطه وری ، بعلاوه جابه جا کردن مخزن کلرید آلومینیم به خارج از اطاق نیز می تواند مفید باشد . همچنین با پوشش دادن یا رنگ زدن فولاد زنگ نزن نیز می توان آن را حفاظت کرد .

به عنوان روش اصلاحی دیگر : ساختن سازه از چوب یا پلاستیک می باشد .

مورد ۱.۲.۶۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن AISI ۳۲۱

سیستم : دستگاه هواگیر محصولات

قسمت : لوله تبدیل ۴ اینچ به ۲ اینچ (آداپتور)

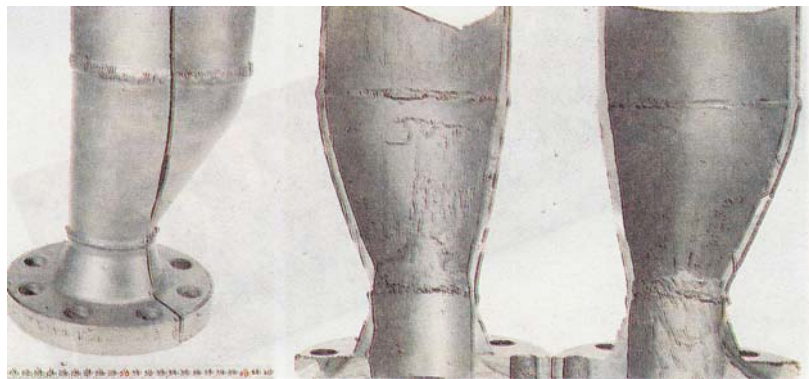
پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : این خوردگی در قسمتهای جوش داده شده شدیدتر است .

محیط: شامل مخلوطی از ایزوسیانات و کلروبنزن و مقدار کمی اسید کلریدریک است . رطوبت در محیط

وجود ندارد و دما 170°C است .



علت پدیده : خوردگی به علت مواد شیمیایی موجود در محیط صورت می گیرد . همچنین شکل نا متقارن

لوله باعث بوجود آمدن جریان اغتشاشی در سیستم و پدیده سایش می شود . تلفیق این عوامل ایجاد

خوردگی سایشی می کند .

روش اصلاح : باید لوله از جنس فولاد AISI ۳۱۶ و به صورت متقارن تر طراحی شود و همچنین

به صورت عمودی در سیستم نصب شود به جای آن که افقی نصب شود .

مورد ۱.۲.۶۵

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۲۱)

قسمت : لوله خنک کننده

سیستم : آب خنک کن یکبار گذر

مدت کارکرد : ۳ سال

پدیده : خوردگی زیر رسوبی

ظاهر نمونه : حمله موضعی در زیر رسوبها

محیط : آب خنک کن آب شور (آبی که مقدار کلرید آن بین آب شیرین و آب دریا می باشد).



علت پدیده : ذرات معلق آب خنک کن روی سطح فلز رسوب می کنند که سبب ایجاد خوردگی ناشی از اثرات گالوانیکی می شود (تشکیل قسمتهای آندی در زیر رسوبات) و نهایتاً خوردگی موضعی صورت می گیرد .

روش اصلاح : باید با افزایش سرعت آب از تشکیل رسوب جلوگیری کرد . همچنین می توان از موادی که مقاومت به خوردگی حفره ای بهتری دارد استفاده کرد .

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶L)

سیستم : آزمون اتوکلاو

قسمت : دیواره

پدیده : خوردگی تنشی (بین دانه ای و درون دانه ای) مدت کارکرد : ۲-۳ روز

ظاهر نمونه : شکافهایی روی نمونه ایجاد شده که باعث نشستی می شود (شکل سمت چپ داخل نمونه و

شکل سمت راست خارج نمونه را نشان می دهد).

محیط : آستری از جنس نیکل است و محتوی محلول NaOH ۱۰٪ است . دما °C ۳۲۰ است.



علت پدیده : به علت نشستی در آستری نیکلی ، سود سوزآور بین آستری نیکلی و جداره خارجی طرف که

از جنس فولاد زنگ نزن است وارد می شود .

در دما و فشار بالا ، حمله بین دانه ای در فولاد صورت می گیرد و کروم حل می شود و نهایتاً شکافهای

درون دانه ای نیز بوجود می آید .

روش اصلاح : باید آستری نیکلی را به خوبی آب بندی کرد .

مورد ۱,۲,۶۷

صنعت : کارخانه شیمیایی

جنس نمونه : فولاد زنگ نزن (AISI ۳۰۴)

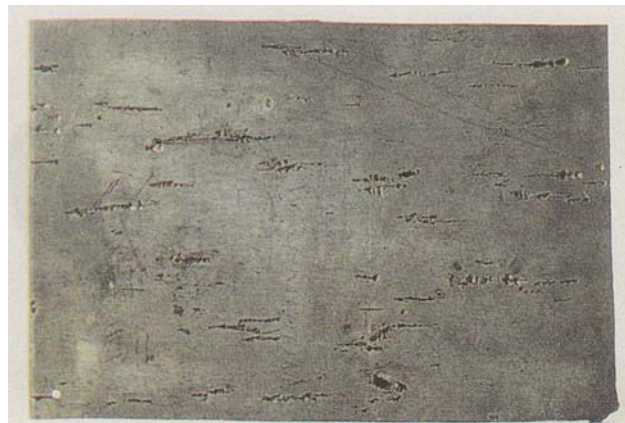
سیستم : خنک کن کندانسور در کارخانه اسیدنیتریک قسمت : (Cooler Jacket)

پدیده : حمله رسوبی مدت کارکرد : حدود ۵ سال

ظاهر نمونه: حفرات به صورت شیارهای عمودی در نمونه گسترده شده اند .

محیط : آب خنک کن حاوی ، یون کلرید (۶۰۰-۵۰۰ ppm یون کلر) دما حداکثر 40°C در سمت پوشش

است .



علت پدیده : محصولات خوردگی در جایی که سرعت جریان کم است رسوب می کنند . در زیر این روئین

رسوبات کمبود اکسیژن وجود دارد و در نتیجه لایه روبین توسط یون کلرید مورد حمله قرار می گیرد،

بنابراین خوردگی تسریع می شود(خوردگی زیر رسوبی) .

روش اصلاح : باید سرعت جریان آب در سیستم افزایش یابد (بیش از $1/5\text{ m/s}$) با عبور جریان آب خنک

از میان لوله ها همچنین باید جداره خارجی دستگاه خنک کن از مواد مقاوم به خوردگی (نظیر تیتانیوم)

ساخته شود) .

مورد ۱.۳.۱

صنعت : سیستم آب خنک کن کارخانه

جنس نمونه : چدن

سیستم : سیستم آب خنک کن

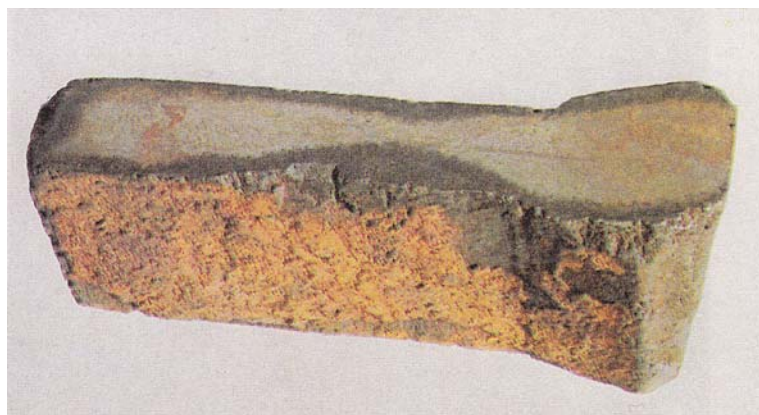
قسمت : شیر کنترل پمپ آب

پدیده : خوردگی گرافیتی

مدت کارکرد : ۶ سال

ظاهر نمونه : لبه های خارجی قطعه سیاه رنگ شده است که ناشی از خوردگی گرافیتی است.

محیط : آب رودخانه ، غلظت کلرور ppm ۳۰۰-۵۰۰ ،



علت پدیده : میزان کلر آب رودخانه بالا می باشد و حمله خوردگی به چدن توسط آب رودخانه صورت

می گیرد آهن حل می شود و کربن باقی می ماند .

روش اصلاح : با بکاربردن یک پوشش مناسب مشکل برطرف می شود .

مورد ۱.۳.۲

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : چدن

سیستم : آب سرد کننده مدار باز قسمت : فلانچ سرپوش (blind flange)

پدیده : خوردگی زیر رسوبی مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : وجود حفره های ریز و یکنواخت .

محیط : آب خنک کننده با شرایط : $pH=7/5-8$ ، هدایت 120 mS/m ، غلظت کلر 300 ppm ،



سختی کلسیم 500 ppm (CaCO_3) و حاوی رسوب های ماسه ای و لجن میکروبی .

علت پدیده : خوردگی و رسوبدهی آب بالاست . رسوبات موجود در روی چدن ایجاد سل خوردگی نموده

و سبب تخریب آن می شوند .

روش اصلاح : با تزریق پراکنده کننده و میکروب کش مشکل خوردگی برطرف می شود . همچنین استفاده

از فیلترهای شنی به منظور کاهش میزان مواد معلق بسیار مطلوب است .

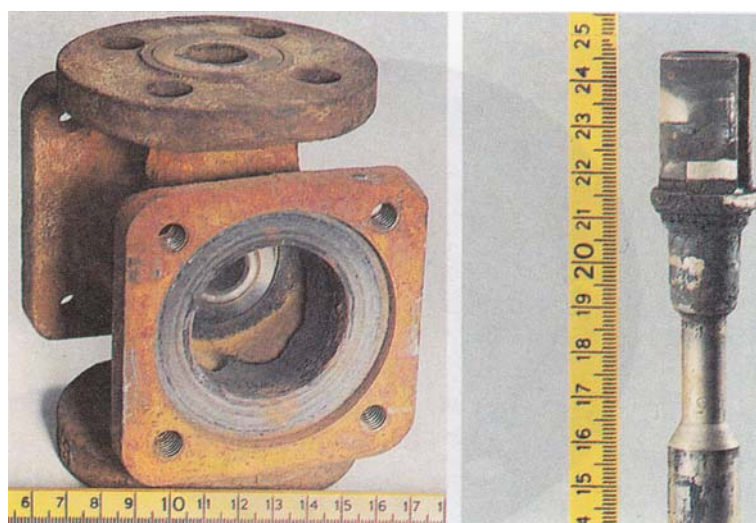
جنس نمونه : چدن ریخته گری شده و فولاد زنگ نزن (دریچه)

سیستم : سیستم بخار با فشار ۷ بار قسمت : شیر کنترل بخار

پدیده : جدایش مگنتیت مدت کارکرد : چند ماه

ظاهر نمونه : نشت رسوبات مگنتیت در روی شیر قابل مشاهده است .

محیط : بخار حاوی اکسیژن



علت پدیده : حضور بیش از حد اکسیژن در بخار سبب جدا شدن لایه مگنتیت لوله ها می شود . این

رسوبات در روی شیر راسب می شوند .

روش اصلاح : استفاده از مواد اکسیژن زدا و بهبود شرایط شیمیایی و همچنین با استفاده از دستگاه

هوازدا مشکل مرتفع می شود .

جنس نمونه : چدن خاکستری

قسمت : پروانه پمپ

سیستم : آب خنک کن

مدت کارکرد : ۳ ماه

پدیده : خوردگی گرافیکی همراه با سایش

ظاهر نمونه : اکثر سطوح با یک محصول خوردگی سیاه رنگ پوشیده شده و شکافهای عمیقی نیز در نقاطی از آن مشاهده می شود ، ضمن اینکه پدیده سایش همراه با خوردگی گرافیکی روی پره ها رخ داده است .

محیط : آب خنک کن $27-38^{\circ}\text{C}$ ، کلسیم 780 ppm ، سدیم 460 ppm ، منیزیم 220 ppm ، کلرید 1200 ppm ، سولفات 300 ppm ، $\text{pH} = 4/8$ ، هدایت الکتریکی 3500 mmhos/Cm .



علت پدیده : آب خنک کن مذکور از خوردگی بالایی برخوردار است ، ضمن اینکه مواد معلق موجود در آب سبب سایش و نهایتاً تشدید خوردگی گرافیکی می شود ، همچنین پایین بودن pH سبب تسریع خوردگی می شود . شکست پره ها یک پدیده مزمن بوده که هر ۳ یا ۴ ماه رخ می دهد .

روش اصلاح : بایستی از مواد بهتر فولاد ضدزنگ ۳۱۶ یا مواد مقاوم پلاستیکی نظیر تفلون استفاده شود .

مورد ۱.۳.۵

صنعت : نیروگاه بخاری

جنس نمونه : چدن

سیستم : کندانسور بخاری

قسمت : پروانه پمپ

پدیده : حفره دار شدن

مدت کارکرد : حدود ۶ ماه

ظاهر نمونه : سایشی موضعی روی سطح نمونه .

محیط : آب کندانسه ، دما بین 60°C - 90°C متغیر است .



علت پدیده : به دلیل نزدیک بودن پمپ به مخزن آب کندانسه سرباز ، و فشار غیر کافی ، حبابهای آب و

بخار در پمپ ایجاد می شود ، ترکیدن این حبابها سبب پدیده حفره زائی می شود .

روش اصلاح : با پایین آوردن محل پمپ و یا بالا بردن محل مخزن آب کندانسه ، مشکل برطرف می شود .

مورد ۱.۳.۶

صنعت : برق (دیگ بخار)

جنس نمونه : چدن حاوی CrNi

سیستم : آب تغذیه دیگ بخار

قسمت : پروانه پمپ تغذیه دیگ بخار

پدیده : خوردگی گرافیتی

مدت کارکرد : ۱/۵ سال

ظاهر نمونه : در روی سطح پروانه دانه های نرم سیاه رنگ مشاهده می شود و قطعه به میزان ۱ mm خورده شده است .

محیط : آب تغذیه دیگ بخار ، آب مقطر هوازدایی شده است ، حاوی فسفات دی سدیک و تری سدیک است .
pH سیستم ۷/۶-۸/۵ و میزان اکسیژن کمتر از ۰/۰۱ ppm و دما ۱۲۳°C است .



علت پدیده : چدن در pH پایین آب تغذیه مورد حمله قرار می گیرد و آهن حل شده و کربن باقی می ماند .
روش اصلاح : با افزایش pH آب تغذیه در دیگ بخار یعنی با افزودن آمونیاک میزان pH ۹/۵-۹ می رسد و این مسأله موجب کاهش خوردگی سیستم می شود . همچنین اگر پروانه ها از جنس برنز ساخته شوند مشکل مرتفع خواهد شد .

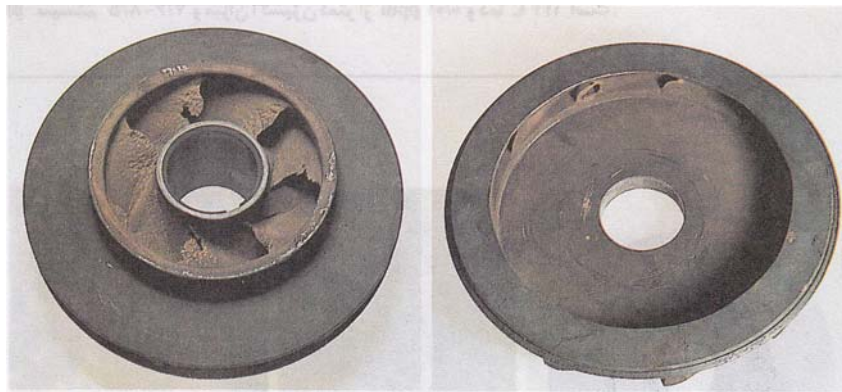
جنس نمونه : پروانه از جنس چدن آلیاژی دارای نیکل و کرم / رینگ از چدن معمولی .

سیستم : تغذیه دیگ بخار قسمت : اولین قسمت های پمپ آب ورودی (۶۵ متر مکعب بر ساعت و ۵۱ بار فشار)

پدیده : حفره ای شدن مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : سطح به طور موضعی ساییده و زدوده شده است .

محیط : آب تغذیه فاقد هوا و مواد معدنی ، دما 105°C .



علت پدیده : در نتیجه کم باری (Underloading) پمپ ، (کمتر از ۲۵٪ حداکثر ظرفیت) . هد مشکی

ایجاد شده برای جلوگیری از تشکیل بخار کافی نبوده ، در قسمت ورودی حفره زائی رخ داده است .

روش اصلاح :

- از Underloading جلوگیری شود ، به این صورت که به جای چند پمپ از یک پمپ تک تغذیه ای (single feed) استفاده شود .
- ظرفیت پمپ را در حداقل ۳۰٪ حداکثر بار آن نگاه دارید ، این کار توسط نصب یک شیر سرریز (overflow valve) در یک مسیر کنارگذر (bypass line) از سمت ورودی به قسمت مکش پمپ امکان پذیر است .

مورد ۱.۳.۸

صنعت : گاز

جنس نمونه : چدن چکش خوار

سیستم : تأمین گاز شهری (گاز رسانی)

قسمت : اتصالات زیر زمینی (underground coupling)

پدیده : خوردگی گالوانیک

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی شدید موضعی .

محیط : خاک



علت پدیده : اتصال گالوانیک به سیستم لوله کشی آب داخل منازل .

روش اصلاح :

- نصب یک قطعه پلاستیکی ایزوله کننده

- نوار پیچی (از جنس پلی اتیان با لاستیک بوتیلن) با حداقل ۵۰٪ برهم افتادگی (overlap)

جنس نمونه : چدن خاکستری

سیستم : سیستم تأمین گاز شهری (گاز رسانی) قسمت : لوله زیر زمینی

پدیده : گرافیتی شدن مدت کارکرد : ۲۹ سال

ظاهر نمونه : سمت چپ با تمیز کردن سطح لوله ، به خوبی در محل برش ، گرافیتی شدن قابل مشاهده است . سمت راست ، عمق حمله ، پس از تمیز کردن سطح لوله به خوبی قابل مشاهده است (مقاطع مختلفی از لوله) .

محیط : خاک بی هوای .



علت پدیده : باکتری احیاء کننده سولفات (SRB) ، سولفات را به سولفید تبدیل نموده و در نتیجه چدن

تحت حمله سولفید قرار گرفته ، خوردگی از نوع گرافیتی شدن رخ داده است .

روش اصلاح : لوله ها با لوله پلی اتیلن جایگزین شود و یا با پوشش مناسب پوشیده شوند.

مورد ۱۰.۳.۱

صنعت : آب خنک کن یک واحد صنعتی

جنس نمونه : چدن

قسمت : پروانه پمپ آب

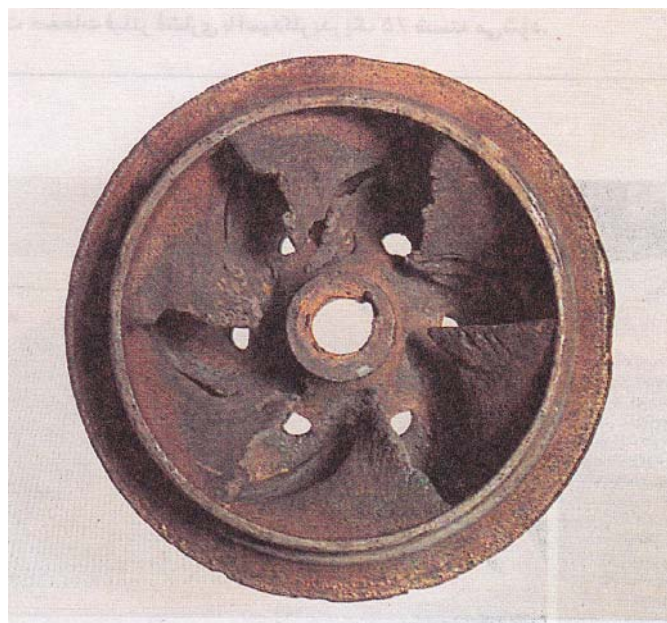
سیستم : آب خنک کن

مدت کارکرد : نامعلوم

پدیده : خوردگی سایشی

ظاهر نمونه : بطور شدیدی دچار خوردگی شده است .

محیط : آب خنک کن درجه حرارتی $15-20^{\circ}\text{C}$.



علت پدیده : به دلیل طراحی غیر صحیح ، و عدم ملاحظه در ارتفاع نصب پمپ و سطح آب پمپاژ شده ، هوا

به داخل آب نفوذ نموده و سبب خوردگی سایشی پروانه شده است .

روش اصلاح : وضعیت نصب پمپ نسبت به سطح آب بایستی تنظیم شود (پمپ در ارتفاع پایین تر قرار

گیرد).

جنس نمونه : چدن (پوششی نامناسب بر روی این ماده اعمال شده است) .

سیستم : قسمت تصفیه فاضلاب

قسمت : صفحات فیلتر فشاری یک دستگاه آب گیری فاضلاب

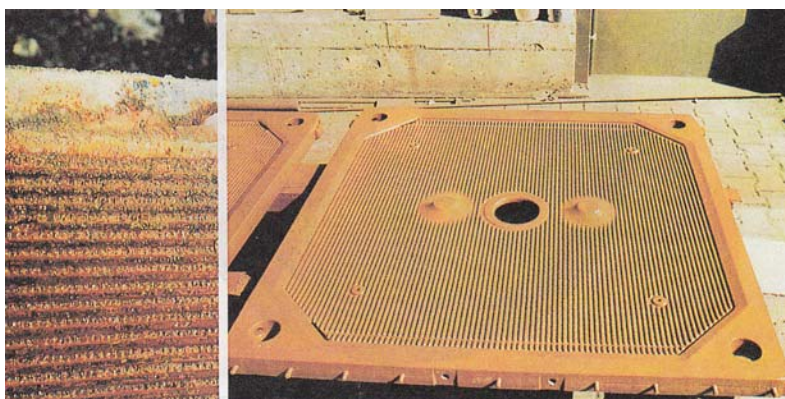
پدیده : خوردگی اسیدی و سایشی مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : تصویر سمت چپ: پوشش اولیه از بین رفته است و آسیب دیدن و خوردگی بوجود آمده

است . تصویر سمت راست : همان صفحه بعد از اعمال یک پوشش مصنوعی .

محیط : برای تصفیه فاضلاب ، از کلروفریک و آهک استفاده می شود . فشار ۱۶-۱۵ بار می باشد در هر

سال ، به مدت ۲۴ ساعت صفحات فیلتر فشاری با اسیدکلریدریک ۵٪ شسته می شود.



علت پدیده : مواد شیمیایی تزریقی خاصیت خوردگی آب را افزایش می دهند. ضمناً خوردگی در طی

عملیات شستشوی شیمیایی نیز اتفاق می افتد، نتیجه اینها آسیب شیمیایی و مکانیکی صفحات می باشد .

روش اصلاح : با به کار بردن پوششهای مصنوعی که دارای کیفیت خوبی هستند و به صورت گرم اعمال

می شوند می توان از این خوردگی جلوگیری نمود ضمناً آماده سازی سطح معینی قبل از اعمال پوشش از

اهمیت بسیار زیادی برخوردار است .

جنس نمونه : چدن

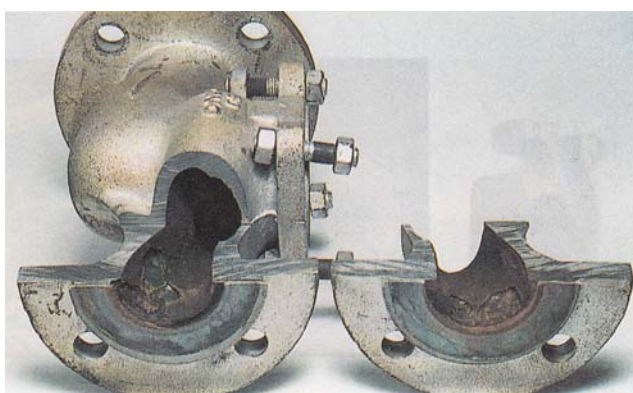
سیستم : کندانسور بخاری

قسمت : شیر لوله کندانسور

پدیده : خوردگی گالوانیک

مدت کارکرد : نامعین

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی شدیدی در فلانچ اتصال بوجود آمده است .

محیط : بخار نسبتاً خورنده می باشد. زیرا pH آن پایین و درجه حرارت بالاست $\text{pH} = 6/6$ ، دما 100°C .علت پدیده : دریچه چدنی به لوله ای از جنس فولاد زنگ نزن 304 در یک مبدل حرارتی مسی، متصل

است. اختلاف پتانسیل بین مس/ فولاد و چدن مسبب ایجاد خوردگی گالوانیکی در دریچه می شود. ضمن

آنکه بخار نیز نسبتاً خورنده است .

روش اصلاح : با انتخاب صحیح مواد مشکل برطرف می شود . دریچه باید از جنس فولاد زنگ نزن باشد .

مورد ۲.۱.۱

صنعت : فولاد سازی

جنس نمونه : فولاد کم آلیاژ پوشش داده توسط کادمیم (BV)

سیستم : سیستم گرمایش به وسیله روغن

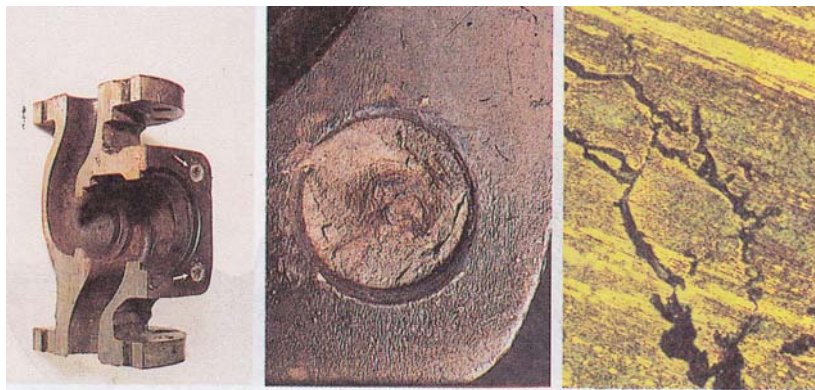
قسمت : پیچ های شیر

پدیده : تردی ناشی از فلز مذاب

مدت کارکرد : ۳۰ دقیقه

ظاهر نمونه : شکست ترد در پیچ ها به وقوع پیوسته است .

محیط : روغن گرمایشی ، دما 340°C .



علت پدیده : حمله و خوردگی توسط کادمیم مذاب که در بین دانه ها پراکنده شده و نفوذ نموده ، صورت گرفته است .

روش اصلاح :

- چنین پوششی برای این فولاد در این شرایط کاری مناسب نمی باشد ، استفاده از این نوع فولاد بدون پوشش توصیه می شود .

مورد ۲.۱.۲

صنعت : ساختمان

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه اندوده شده به روش داغ

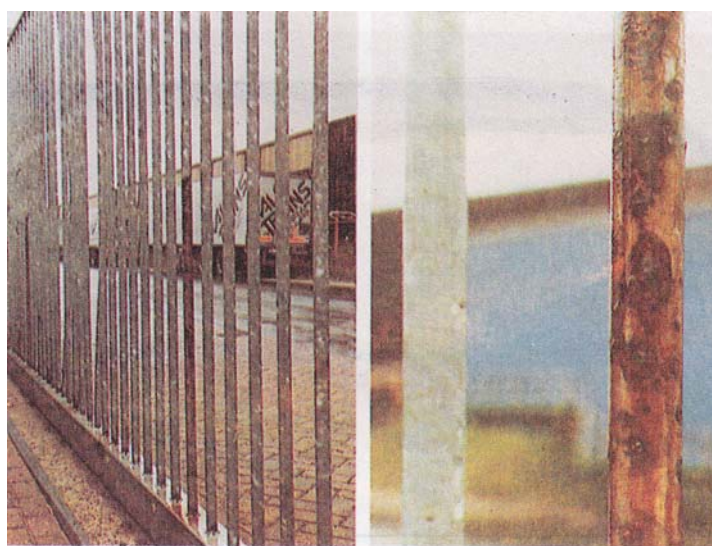
محل نمونه : حصار میله ای (لوله شکل)

مدت کارکرد : ۲/۵ سال

پدیده : حمله کلریدی

ظاهر نمونه : حفره هایی از نوع خوردگی کلریدی در نرده ها قابل مشاهده است .

محیط : اتمسفر معمولی



علت پدیده : در طول مراحل گالوانیزه کردن، کلرید روی و اکسید روی بر روی برخی نرده ها باقی می

ماند . این مواد زمانی که مرطوب شوند برای فولاد بسیار خورنده اند .

روش اصلاح : تعویض نرده های خورده شده و گالوانیزه کردن مجدد آنها به طور کامل .

مورد : ۲.۱.۳

صنعت : واحد تولید بخار

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه اندود شده به روش داغ

سیستم : سیستم آب داغ با دمای 160°C

قسمت : لوله گرمایش از محفظه آب جبرانی

پدیده : خوردگی گالوانیک

مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : خوردگی به صورت حفره های ریز بر روی لوله مشاهده می شود (حمله حفره ای Pitting

attack)

محیط : آب نرم با دمای 60°C ، هیدرازین به آب تغذیه اضافه می شود .



علت پدیده : پدیده معکوس شدن پتانسیل در زوج روی / آهن در دمای بالا به وجود می آید (آب داغ با

دمای 160°C از میان لوله ها می گذرد) و در نتیجه فولاد گالوانیزه به دلیل تخلخل و نیز فعالتر بودن

مورد حمله قرار می گیرد . همچنین باید توجه داشت که فلز روی توسط آب نرم به شدت مورد حمله قرار

می گیرد .

روش اصلاح : باید جنس لوله ها از فولاد زنگ نزن مناسب انتخاب و طراحی شود یا تزریق آب از سیستم

آب داغ به تانک آب جبرانی مستقیماً صورت پذیرد .

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه اندود شده به روش داغ

سیستم : لوله های سیستم آب سرد

قسمت : لوله

پدیده : خوردگی گالوانیک

مدت کارکرد : ۱۵ سال

ظاهر نمونه : قسمتی از لوله در محل اتصال با دریچه کنترل (از جنس برنج) به شدت در سمت چپ دچار

خوردگی شده و در سمت راست آن شکستگی ایجاد شده است .

محیط : داخل لوله : آب سرد، در حال جریان ، خارج لوله : رطوبت ناشی از کندانسه شدن .



علت پدیده : در اینجا پیل هایی در اثر اتصال فولاد گالوانیزه با برنج به وجود می آید ، همچنین برنج تحت

تأثیر پدیده روی زدایی قرار می گیرد و باعث تشدید خوردگی می گردد. احتمالاً این پدیده ناشی از تشکیل

پیل های اختلاف دمشی در زیر قطرات متراکم نیز می باشد .

روش اصلاح : باید لوله ها از جنس مس با پلاستیک ساخته شوند .

مورد ۲.۱.۵

صنعت : تأسیساتی (تهویه مطبوع)

جنس نمونه : فولاد کربنی گالوانیزه شده به روش غوطه وری داغ

سیستم : دستگاه چگالش بخار

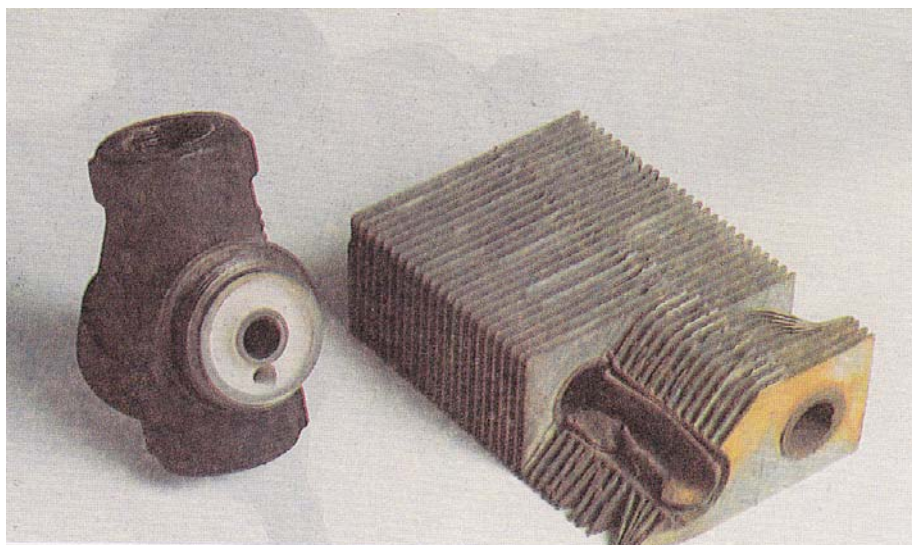
قسمت : رادیاتور

پدیده : خوردگی اسید کربنیکی

مدت کارکرد : ۷ ماه

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت

محیط : آب مقطر خورنده با درجه حرارت $90-100^{\circ}\text{C}$



علت پدیده : آب مقطر سبب خوردگی بر فلز روی و هم چنین فولاد می شود . فلز روی با اکسیژن محلول

در آب ، اکسید روی را تولید نموده که این اکسید بر روی فلز راسب شده و نهایتاً گرفتگی لوله را سبب

می شود .

روش اصلاح :

* در صورت امکان بایستی از آبی که مقدار بی کربنات و CO_2 آن کمتر است استفاده شود .

* استفاده از آمین های نوع فیلمی (Film-forming) به منظور کاهش خوردگی آب نیز مفید است .

مورد ۲.۱.۶

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه به روش غوطه وری داغ

سیستم : ساره فلزی

قسمت : جوش

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد: ۴ سال

ظاهر نمونه : فقط قسمت جوشکاری شده به صورت یکنواخت خورده شده است .

محیط : هوای روستایی



علت پدیده : در زمان جوشکاری لایه محافظ روی صدمه خورده است . قسمت مذکور سازه به دلیل عدم

محافظت خورده شده است .

روش اصلاح : پس از جوشکاری فولاد گالوانیزه ، بایستی قسمت جوشکاری شده با رنگ مخصوص که

حاوی روی می باشد ، پوشانیده شود (Zinc Compound paint). این مشکل غالباً در اکثر تانکهای

گالوانیزه در ایران قابل مشاهده است .

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه به روش غوطه وری داغ

سیستم : سیستم آب گرم شهری قسمت : پوشش المنت های الکتریکی حرارتی

پدیده : خوردگی گالوانیکی (معکوس شدن پتانسیل) مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : خوردگی شدید در فولاد ضمن آنکه رسوبات نمک کلسیم بر روی پوشش و المنت ها ایجاد شده است .

محیط : آب گرم شهری . دمای بیشتر از 60°C .



علت پدیده : معکوس شدن پتانسیل زوج آهن / روی در دمای بیش از 60°C مسبب این نوع خوردگی است . در این درجه حرارت روی (کاتد) شده و خورده می شود .

روش اصلاح : این نوع فولاد گالوانیزه برای درجه حرارت بیش از 60°C مناسب نمی باشد. در لوله کشی های آب گرم شهری چنانچه درجه حرارت آب گرم از 60°C بیشتر نشود لوله های گالوانیزه عمر بسیار بیشتری خواهند داشت .

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه شده به روش غوطه وری داغ

سیستم : آب گرم شهری قسمت : لوله (مقاطع بریده شده لوله)

پدیده : خوردگی گالوانیکی (معکوس شدن پتانسیل) مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای موضعی در گرم ترین نقطه لوله .

محیط : آب خام در اطراف لوله و آب گرم 130°C از داخل لوله عبور می کند .



علت پدیده : معکوس شدن پتانسیل زوج آهن/روی، در این حالت خاص تا 60°C هیچ گونه خوردگی

مشاهده نمی شود، ولی بالاتر از این درجه حرارت ، پتانسیل فلز روی نسبت به آهن منفی شده و سبب

خوردگی شدید روی می شود .

روش اصلاح : به طور کلی نبایستی لوله های گالوانیزه در بالاتر از 60°C مورد استفاده قرار گیرند (برای

آب گرم شهری).

مورد ۲.۱.۹

صنعت : غذایی

جنس نمونه : فولاد پوشش داده شده با قلع

سیستم : تولید لبنیات

قسمت : داخل قوطی - قسمت کف .

پدیده : خوردگی گالوانیک .

مدت کارکرد : ۱ تا ۲ ماه

ظاهر نمونه : سیاه شدن برخی نقاط در اثر خوردگی .

محیط : شیر کم چرب پاستوریزه شده



علت پدیده : از آنجا که پوشش قلع ایجاد شده ، دارای تخلخل هایی می باشد . از این رو در مقابل خوردگی ایجاد شده به وسیله شیر کم چربی مقاوم نمی باشد . در صنایع غذایی دیگر ، خوردگی زمانی اتفاق می افتد که مدت زیادی گذشته است . دلیل این امر این است که این محصولات شامل کلوئیدی هایی است که به صورت باز دارنده عمل می کنند یا شامل ترکیباتی از قلع از جمله اسید بنزوئیک می باشد که خود نقش باز دارنده دارند. در این حالت (اضافه شدن ترکیبات قلع) قلع به صورت آندی عمل کرده و مانع از به وجود آمدن خوردگی سطوح فولادی می شود.

روش اصلاح :

* به کار بردن پوشش قلع ، بدون تخلخل (خیلی گران است) .

* به کار بردن پوشش لاک روی پوشش قلع ،

مورد ۲.۱.۱۰

صنعت : کشاورزی

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه شده به روش غوطه وری داغ

سیستم : سازه پیش ساخته

قسمت : حصارهای مزرعه

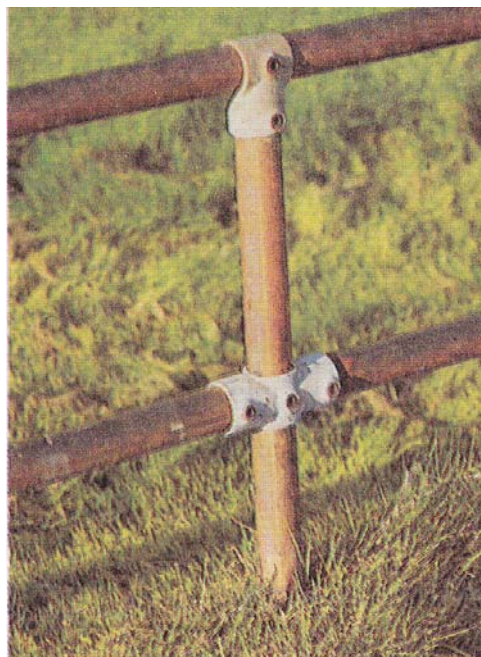
پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : ۱۴ سال

ظاهر نمونه : حصارها به صورت یکنواخت خورده شده اند و نواحی زنگ زده روی آن قابل مشاهده است

مفصل های اتصال خورده نشده اند .

محیط : آتمسفر صنعتی دریایی .



علت پدیده : اختلاف در ضخامت لایه روی ، بین دو جزء فولاد گالوانیزه سبب ایجاد خوردگی می شود .

حصارها با لایه روی به ضخامت ۷۵-۶۰ میکرون پوشیده شده است . مفصل های اتصال از جنس چدن

بوده و با لایه ای از ضخامت ۱۳۰-۹۰ میکرون از جنس روی پوشیده شده است .

روش اصلاح : از آنجایی که رنگ آمیزی سازه با رنگهای پوششی مناسب غیر اقتصادی است. لذا در تهیه

حصارهای جدید ، بایستی از لوله های فولاد گالوانیزه با کیفیت مطلوب استفاده شود .

مورد ۲۰.۱.۱۱

صنعت : تست آزمایشگاهی

جنس نمونه : فولاد با پوشش گالوالوم (روی/آلومینیم / سیلیکون)

سیستم : آزمایش هوا (Weather test)

قسمت : صفحه آزمایش

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : ۱۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی سطح .

محیط : هوای مرطوب دریایی (صنعتی) .



علت پدیده : در محل اتصال صفحه نگه دارنده و صفحه آزمایش پدیده خوردگی رخ داده است . این مطلب

به دلیل ایجاد پیل های اختلاف (دمشی) ایجاد شده است . منظور از این نوع پیل ، ایجاد اختلاف غلظت

اکسیژن در نقاط مختلف سطح می باشد . در قسمت بالای آن هیچ گونه پدیده خوردگی صورت نگرفته

است . ضخامت پوشش ۲۰ میکرون است .

روش اصلاح : در این حالت خاص اقدامی که مقرون به صرفه باشد قابل انجام نیست .

جنس نمونه : فولادی که به صورت پیوسته گالوانیزه شده است (Sendzimir Galvanized)

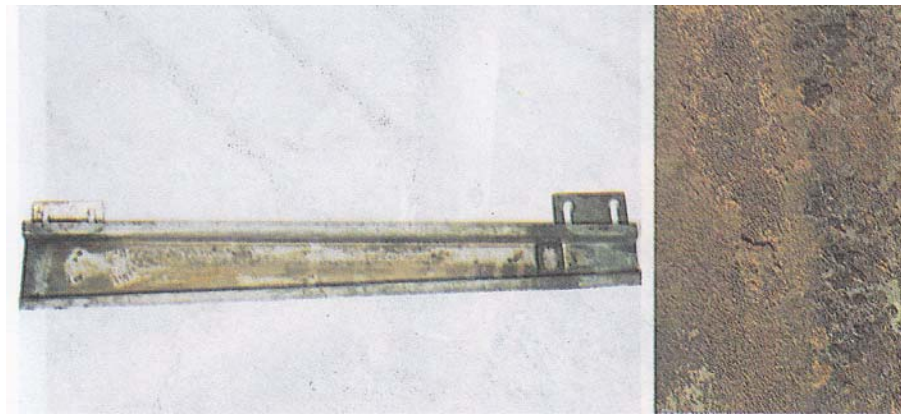
سیستم : مخزن تولید شیر و سیستم توزیع قسمت : صفحه نوار نقاله

پدیده : خوردگی در اثر آب قلیایی مدت کارکرد : ۶ ماه

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت همراه با تشکیل زنگ بر روی سطح .

محیط : سیستم به صورت روزانه با آب نرم پر فشار شسته می شود . به این آب مواد قلیایی اضافه می

شود به نحوی که pH آب را به ۱۰/۱-۱۱/۳ می رساند .



علت پدیده : فولاد گالوانیزه شده در مقابل آبی که pH آن بالاتر از ۸/۵ باشد مقاوم نیست . روش

گالوانیزه به کار برده شده ، باعث ایجاد یک لایه روی به ضخامت $20-25 \mu m$ می شود این نحوه

گالوانیزه کردن ایجاد یک آلیاژ آهن- روی در روی سطح نمی کند . از این جهت این پوشش مناسب شرایط

فوق نبوده و دچار خوردگی می شود ، ضمن آنکه آب نرم به تنهایی برای روی خورنده می باشد .

روش اصلاح :

* به کار بردن فولاد زنگ نزن یا استفاده از فولاد گالوانیزه شده گرم به نحوی که ضخامت پوشش روی

حدود $100 \mu m$ باشد.

* بهبود کیفیت آب شستشو

* زنگ زدایی و رنگ آمیزی سیستم به طور منظم

مورد ۱۳. ۲.۱

صنعت : دامپروری

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه به روش غوطه وری داغ

سیستم : آبشخور قسمت : پارابان جدا کننده آبشخور دامها .

پدیده : خوردگی آمونیاکی مدت کارکرد: ۱/۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی نامنظمی روی نمونه صورت گرفته است .

محیط : کود گاوی



علت پدیده : طراحی نادرست سازه ، (به کار بردن مفصل های پلاستیکی کوتاه در سیستم) و عدم

جابجایی منظم کودها سبب می شود که پوشش روی توسط آمونیاک محیط تخریب شده و زمینه خوردگی

توسط کودها بوجود آید و در نهایت فولاد مورد حمله خوردگی قرار گیرد .

روش اصلاح : با نصب کردن پارابانهای جدید ، و نیز بکار بردن مفصلهای پلاستیکی محافظ بلند تر (تقریباً

حدود ۱۰Cm روی میله پارابان) ، مشکل برطرف می شود .

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه شده به روش غوطه وری داغ

سیستم : جایگاه قرار گرفتن مواد شیمیایی در محوطه باز یک کارخانه

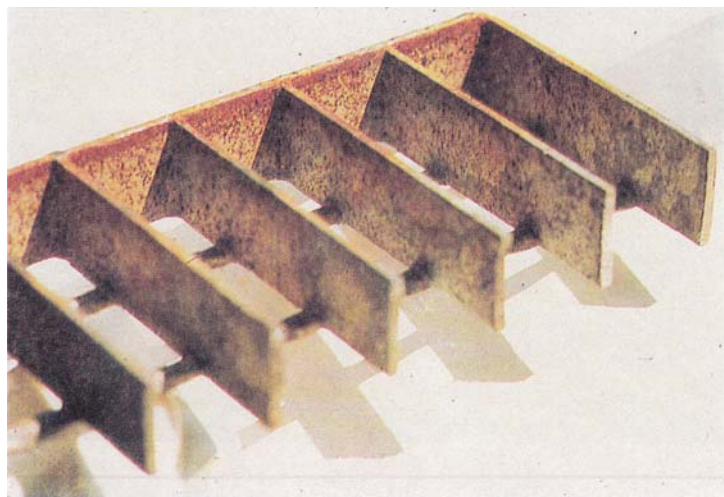
قسمت : سقف کاذب

مدت کارکرد : ۳ ماه

پدیده : خوردگی اتمسفری

ظاهر نمونه : مناطق قهوه ای رنگ اکسید در روی نمونه پدید آمده است .

محیط : اتمسفر صنعتی .



علت پدیده : خاک های خورنده که از فرآیندهای تمیزکاری و جوشکاری خطوط لوله بر روی جایگاه

مذکور باقی مانده است ، علت این خوردگی محسوب می شوند. ذرات آهن باقی مانده خورده شده و باعث

ایجاد رنگ قهوه ای روی سطح فلز روی می شوند .

روش اصلاح : این سازه مشبک به راحتی نمی تواند تمیز کاری شود ، مگر این که قطعات جدا شده و با

محلولی شیمیایی تمیز شوند و مجدداً گالوانیزه شوند .

مورد ۲.۱.۱۵

صنعت : آب و فاضلاب

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه شده به روش غوطه وری داغ (Hot-dip galvanized)

سیستم : شبکه لوله های آب سرد زیر زمینی

قسمت : لوله

پدیده : آب خورنده

مدت کارکرد : حدود ۲ سال

ظاهر نمونه : خوردگی شیاری در فواصل معین

محیط : آب زیر زمینی (پیوسته)



علت پدیده : اعمال پوشش ناقص در نوار پیچی لوله .

روش اصلاح : اطمینان از اینکه حداقل ۵۰٪ نوارهای پوشش ها روی هم قرار گرفته اند (Over lap) و یا

پوشش مضاعف به منظور اطمینان (استفاده از آهن گالوانیزه ، نه به روش غوطه وری داغ)

جنس نمونه : فولاد روی اندود شده (zinc electroplated steel)

سیستم : آزمایش هوازدگی

قسمت : قطعه

پدیده : حمله کلریدی

مدت کارکرد : ۸ ماه

ظاهر نمونه : لایه روی به صورت موضعی از بین رفته است و سطح فولاد زیرین به طور یکنواخت خورده شده است .

محیط : آب دریای ساکن و بدون هوادهی



علت پدیده : فولادی که با لایه نازک ۲-۳ میکرون ، روی اندود شده است . به آب دریا مقاوم نیست حتی در مدت زمان های کوتاه .

روش اصلاح :

* باید قطعات را با یک سیستم دوبلکس (فولاد گالوانیزه با لایه ای از جنس روی به ضخامت بیش از ۱۰۰ میکرون) و نیز پوشش اپوکسی یا قطران با ضخامت ۳۰۰-۵۰۰ میکرون به کار برد .

* اگر سطح فولاد به روش پاششی با یک لایه آلومینیم به ضخامت ۱۵۰-۱۰۰ میکرون پوشش داده شود ، مشکلی به وجود نخواهد آمد.

جنس نمونه : نمونه سمت چپ : فولاد آلومینایز شده به روش غوطه وری داغ ؛ نمونه سمت راست : فولاد

پوشش داده شده با آلومینیم به روش پاششی .

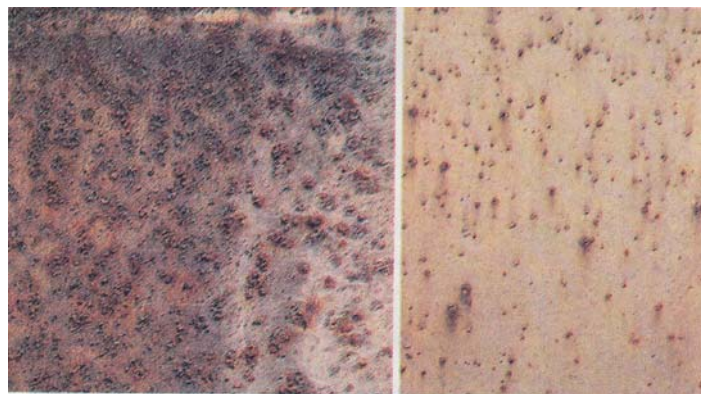
سیستم : آزمونهای هوا خوردگی (Weathering tests)

قسمت : قاب های آزمون

پدیده : خوردگی اتمسفری **مدت کارکرد :** به ترتیب ۸ و ۱۲ سال

ظاهر نمونه : حفرات خوردگی بر روی کل سطح به وجود آمده است .

محیط : اتمسفر دریایی صنعتی .



علت پدیده : در نمونه سمت چپ : لایه آلومینیمی به ضخامت ۳۰ میکرون در مقایسه با سطح فولاد زیرین

،نقش کاتد را دارد . این امر ناشی از تشکیل اکسید آلومینیم غیر محافظ است .

در نمونه راست : تخلخل هایی در پوشش آلومینیم به ضخامت ۱۰۰ میکرون به وجود آمده که باعث

خوردگی در سطح آهن شده است .

روش اصلاح : ابتدا بایستی سطوح با ماسه پاشی (سندبلاست) تمیز شوند و سپس با پاشش افقی یک لایه

آلومینیمی به ضخامت ۱۵۰-۲۰۰ میکرون بر روی آن، سیستم بهبود می یابد . همچنین می توان یک یا دو

لایه رنگ مقاوم شیمیایی به ضخامت کلی ۱۰۰-۲۰۰ میکرون به عنوان پوشش اعمال کرد (از نوع اپوکسی ،

لاستیک کلرینه شده ، پلی اورتان).

جنس نمونه : فولاد کربنی (پوشش داده شده در داخل کارخانه)

سیستم : واحد استخراج قسمت : مقطع لوله (قطر دیواره ۱۱ mm)

پدیده : خوردگی ناشی از اسید کربنیک (خوردگی شیرین)

مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : خوردگی شدید در لوله که منجر به سوراخ شدن لوله و از بین رفتن آن شده است .

محیط : آب حاوی CO_2 و O_2 ، درجه حرارت حدود 40°C .



علت پدیده : به دلیل از بین رفتن پوشش محافظ داخلی در زمان ساخت آن و یا حمل و نقل و یا نصب آن

آب خورنده مناطق آسیب دیده را به شدت مورد حمله قرار می دهد .

روش اصلاح :

* کنترل کیفیت پوشش در زمان حمل و نقل و نصب .

* تقلیل خوردگی محیط با استفاده از مواد بازدارنده .

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه به روش غوطه وری داغ و فولاد گالوانیزه به روش آبکاری الکتریکی .

سیستم : ساختمان

قسمت : نوارهای اتصال

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : ۴ تا سال

ظاهر نمونه : نوار بالایی دچار خوردگی عمومی شده است ، اما نوار پایینی ، صرف نظر از قسمت انتهایی

آن خوردگی قابل توجهی را نشان نمی دهد .

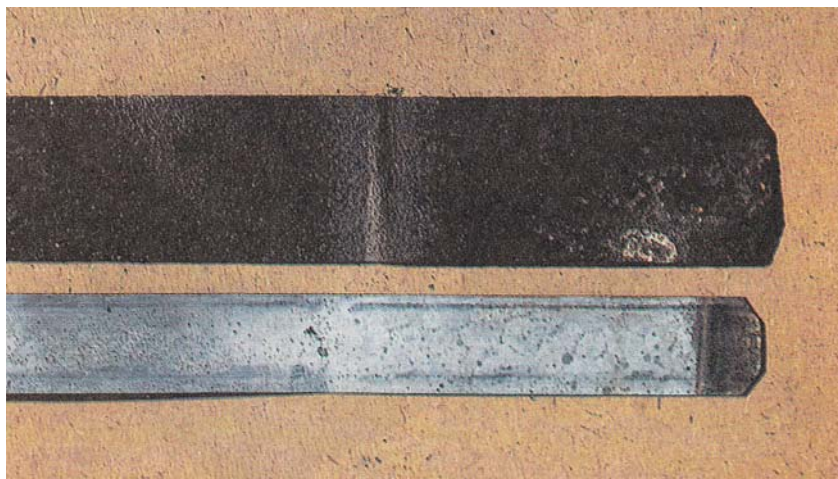
محیط : هوای شرجی (کنار دریا)

علت پدیده : فولاد گالوانیزه به روش آبکاری الکتریکی

(Zinc electroplated) مقاومت خوبی در هوای مرطوب کنار دریا ندارد (با ضخامت لایه روی $10\ \mu\text{m}$)

، در حالی که فولاد گالوانیزه شده به روش غوطه وری (با ضخامت لایه روی $50-40\ \mu\text{m}$) در شرایط فوق

، دارای مقاومت خوبی است .



روش اصلاح : در شرایط فوق الذکر بایستی حتماً از فولاد های گالوانیزه به روش غوطه وری داغ استفاده

شود .

مورد ۲۰.۱

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه به روش غوطه وری داغ

سیستم : خوردگی اتمسفری

قسمت : مخزن انبساط

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : تکه های زنگ آهن به صورت موضعی در روی نمونه قابل مشاهده است .

محیط : اتمسفر مرطوب



علت پدیده : زیر سازی و تمیز کردن ناقص فولاد قبل از گالوانیزه کردن آن سبب می شود که فلز روی

نتواند به صورت مطلوب به سطح فولاد چسبندگی داشته باشد و در نتیجه خوردگی موضعی رخ می دهد

که ناشی از وجود رطوبت بر روی سطح است .

روش اصلاح : باید مخزن انبساط ابتدا با ماسه زنی (Sand blast) و چربی زدایی و اسیدشویی تمیز شود

سپس مجدداً گالوانیزه شود .

مورد ۲.۱.۲۱

صنعت : خدمات شهری

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه شده به روش غوطه وری داغ

سیستم : تجهیزات شهری

قسمت : تیر چراغ برق

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : در حدود ۱۲ سال

ظاهر نمونه : محصولات خوردگی قهوه ای رنگ در روی تیر چراغ برق و در نزدیک شکاف و در اطراف

تیر چراغ برق مشهود است .

محیط : اتمسفر صنعتی ملایم و روستایی .



علت پدیده : اختلاف در هوادهی بین شکاف و بقیه سطح تیر چراغ برق سبب ایجاد پیل اختلاف دمشی می

شود و این امر سبب تشکیل زنگ می شود . همچنین باقی ماندن آب باران در شکاف پدیده خوردگی را

تسریع می کند .

روش اصلاح : با انتخاب صحیح مواد و طراحی مناسب تر و با اعمال پوشش رنگ مناسب مشکل برطرف

می شود .

مورد ۲۰۱.۲۲

صنعت : خدمات شهری

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه به روش غوطه وری داغ

سیستم : تجهیزات شهری

قسمت : سمت چپ : پایه صندوق پست ؛ سمت راست : تیر چذاغ راهنما

پدیده : خوردگی اتمسفری مدت کارکرد : به ترتیب ۲۰ و ۱۷ سال

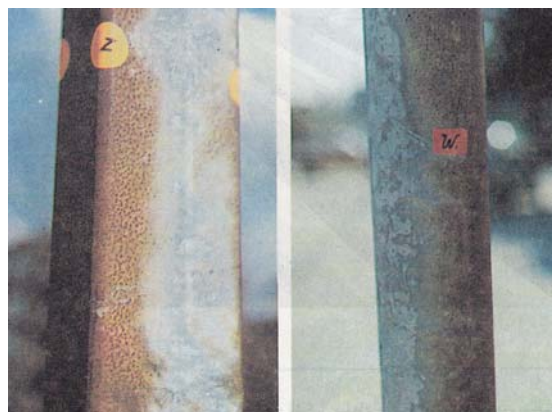
ظاهر نمونه : محصولات خوردگی قهوه ای رنگ به ترتیب در قسمتهای جنوب غربی و کناره های غربی

تیر قابل مشاهده است .

محیط : شامل اتمسفر صنعتی دریایی است . گازهای خورنده نظیر ، SO_2 و NO_2 ، کلریدها و فلوریدها

توسط بادهای غربی و بادهای جنوب غربی از یک ناحیه صنعتی واقع در ۱۵ کیلومتری این ناحیه به این

محل آورده شده اند .



علت پدیده : خوردگی پوشش روی و سطح فولاد توسط آلودگیهایی که باد به این ناحیه آورده شده اند

صورت گرفته است . یکی از علل این حمله جهت بادهای موضعی غالب و مرطوب شدن سازه توسط باران

اسیدی است .

روش اصلاح : با تعویض ساره های مذکور و یا اعمال یک یا دو پوشش رنگ (سیستم دوبلکس) مشکل

برطرف می شود .

جنس نمونه: فولاد گالوانیزه شده به روش غوطه وری داغ

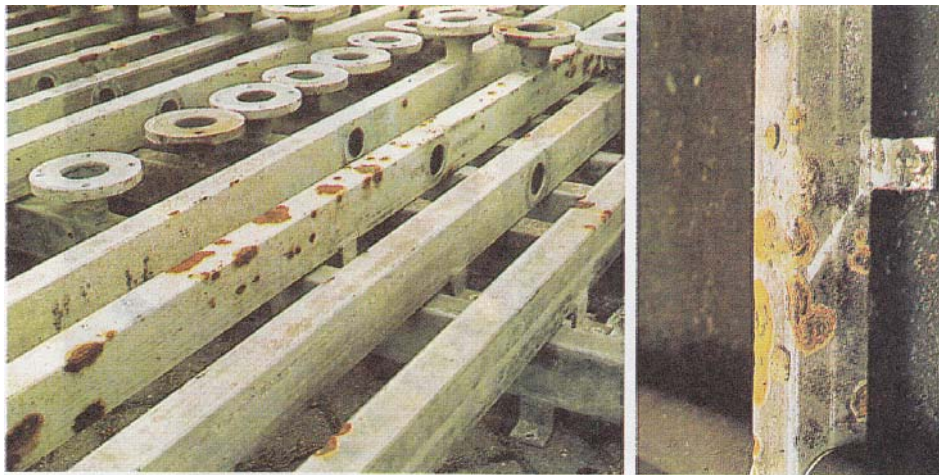
سیستم: تصفیه خانه فاضلاب قسمت: پخش کننده مخزن هوادهی

پدیده: خوردگی رسوبی مدت کارکرد: ۴/۵ سال

ظاهر نمونه: حفرات ریزی در زیر رسوبات لجن در روی قطعه پدید آمده است.

محیط: پس آب هوادهی شده با میزان کلر ۳۰۰ ppm، نیترات ۲۵ ppm و $\text{pH} = 7/9$ و حاوی ۴-۲ ppm

لجن فعال



علت پدیده: رسوبات لجن بر روی مجاری فولاد گالوانیزه تشکیل پیل های موضعی می دهد. در

زیر رسوبات، خوردگی حفره ای ایجاد می شود که در نتیجه واکنش خوردگی اکسید، روی هیدراته تشکیل

می گردد.

روش اصلاح: باید قسمت های مذکور به صورت مستقیم دوبلکس طراحی و ساخته شود (فولاد گالوانیزه

با پوشش مقاوم نظیر اپوکسی)

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه شده به روش غوطه وری داغ

سیستم : آبگرم خانگی

قسمت : لوله ها

پدیده : خوردگی گالوانیکی توسط سمانتاسیون

مدت کارکرد : حدود یک سال ظاهر نمونه :

حفرات ریزی در سرتاسر لوله به وجود آمده است .

محیط : آب چاه حاوی آهن بالا با دمای $45-60^{\circ}\text{C}$.



علت پدیده : راسب شدن ذرات مس (که ناشی از خوردگی لوله های مسی دیگ بخار می باشد) بر روی

لوله فولادی از نوع گالوانیزه سبب تشکیل پیل خوردگی می گردد. زیرا زوج گالوانیکی بین مس و لوله های

گالوانیزه به وجود می آید .

روش اصلاح : باید لوله های دیگ بخار از جنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶ ساخته شده و نیز عملیات نرم کردن

آب به منظور جلوگیری از تشکیل رسوبات انجام شود تا پیل های اختلاف دمشی تشکیل نشوند . همچنین

اگر لوله ها از پلاستیک مقاوم به حرارت یا فولاد پوشش داده شده ساخته شوند ، نیز به رفع مشکل کمک

می کند .

جنس نمونه : فولادی که به صورت غوطه وری گرم گالوانیزه شده

سیستم : سیستم بازیافت گرمای بویلر (بویلر واتر تیوب با فشار ۴۶ بار)

پدیده : خوردگی اسیدی

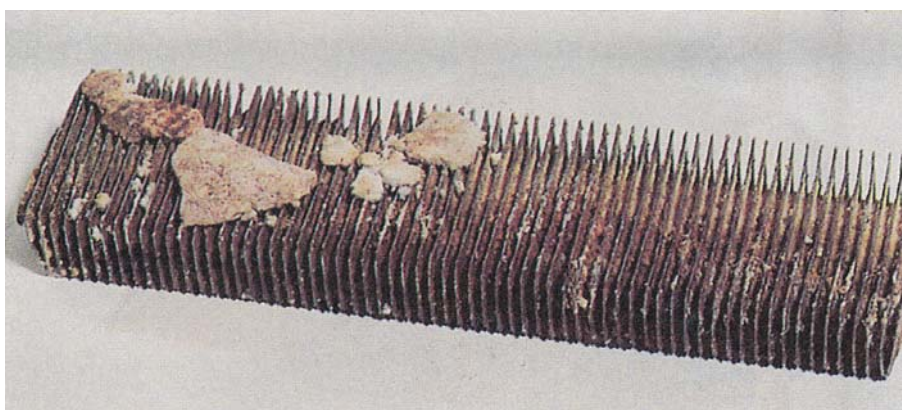
قسمت : مبدل حرارتی که از گاز خروجی (دود) استفاده می نماید .

مدت کارکرد : ۳ ماه

ظاهر نمونه : حمله یکنواخت .

محیط : اطراف مبدل گاز خروجی از بویلر با دمای $90-130^{\circ}\text{C}$ و $\text{pH}=3/8$ ، داخل مبدل ، آب گرم که

دمای آن از 50°C تا 120°C تغییر می نماید .



علت پدیده : کندانس شدن آب در داخل مبدل بر اثر توقف و شروع به کار متناوب سیستم ، به همراه

وجود ۳ میلی گرم HCl در هر متر مکعب از گاز ناشی از آلودگی هوای احتراق به تری کلرواتیلن باعث

خوردگی شده است . محصولات خوردگی موجب گرفتگی مبدل حرارتی در سمت گاز گردیده در نتیجه

ظرفیت بویلر را تا ۴۰٪ کاهش داده اند .

روش اصلاح : به دلیل اینکه ساختن مبدل حرارتی از مواد مقاوم به خوردگی (نظیر فولاد زنگ نزن پرآلیاژ

، مونل یا تیتانیوم و یا تصفیه هوای احتراق بسیار گران و غیر اقتصادی بوده است ، لذا در این مورد خاص

مدیریت کارخانه از باز یافت گرما منصرف شده است .

جنس نمونه: سه نوع فولاد گالوانیزه شامل: فولاد گالوانیزه شده به روش غوطه وری گرم، گالوانیزه شده به

طریقه آبکاری الکتریکی و گالوانیزه شده به طریق آبکاری الکتریکی پیوسته.

سیستم: آزمون آزمایشگاهی

قسمت: ۳ صفحه

پدیده: خوردگی اکسیژنی (Oxygen Corrosion)

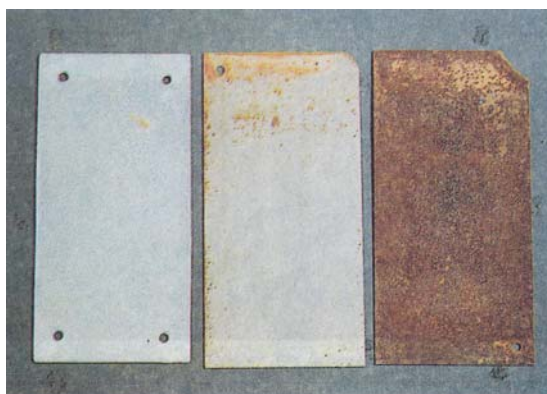
مدت کارکرد: ۱۸ ماه

ظاهر نمونه: صفحه سمت چپ (فولادی گالوانیزه شده به طریق گرم) خوردگی در آن مشاهده نشد. صفحه وسط

(گالوانیزه شده با آبکاری الکتریکی) مقدار کمی دچار خوردگی شد و صفحه سمت راست (گالوانیزه شده با

آبکاری الکتریکی پیوسته (Continous electroplated) به مقدار زیادی دچار خوردگی گردید.

محیط: آب خام، دمای محیط



علت پدیده: میزان خوردگی بستگی به کیفیت و ضخامت لایه روی ایجاد شده دارد. جدای از ضخامت لایه روی،

عاملی که بر خوردگی تأثیر دارد، آلیاژ روی - آهن می باشد که در فولاد گالوانیزه شده گرم به وجود می آید. این

آلیاژ مانع از خوردگی آهن می شود.

در صفحه سمت چپ ضخامت لایه روی $60-50 \mu m$ ، صفحه وسط، ضخامت آن $10 \mu m$ و صفحه سمت راست،

ضخامت لایه روی $1-2 \mu m$ می باشد.

روش اصلاح: جهت کاربرد در محیط آب خام و دمای محیط، بهترین انتخاب استفاده از فولاد گالوانیزه شده به

روش غوطه وری گرم (در مقایسه با روش های دیگر گالوانیزه) می باشد.

مورد ۲۰۱.۲۷

صنعت : مولد برق

جنس نمونه : فولاد

سیستم : دیگ بخار

قسمت : لوله سمت دیوار (sid wall

tube)

پدیده : خوردگی ناشی پایین بودن pH در زمان اسیدشویی مدت کارکرد : ۳۰ سال

ظاهر نمونه : مقطع نیمرخ از سطح داخلی در مناطق مورد حمله به صورت فرورفته و دنداندار است .

محیط : آب دیگ بخار که با فسفات مداوا شده است ، ولی علت زوال ربطی به آب دیگ بخار ندارد



علت پدیده : به دلیل عدم دقت در زمان اسیدشویی ، خوردگی اسیدی در مناطق جوش اتفاق افتاده است .

روش اصلاح : بایستی در زمان اسیدشویی تمهیدات لازم در مورد نوع اسید و بازدارنده با توجه به جنس

فلز به کار گرفته شود . ضمناً مدت زمان اسیدشویی ، درجه حرارت اسیدشویی و غفلت بازدارنده و

همچنین اسید بایستی مورد توجه قرار گیرد .

مورد ۲۸.۱

صنعت : کارخانه کاغذسازی

جنس نمونه : فولاد کربنی

سیستم : لوله اکونومایزردیگ بخار بازیاب

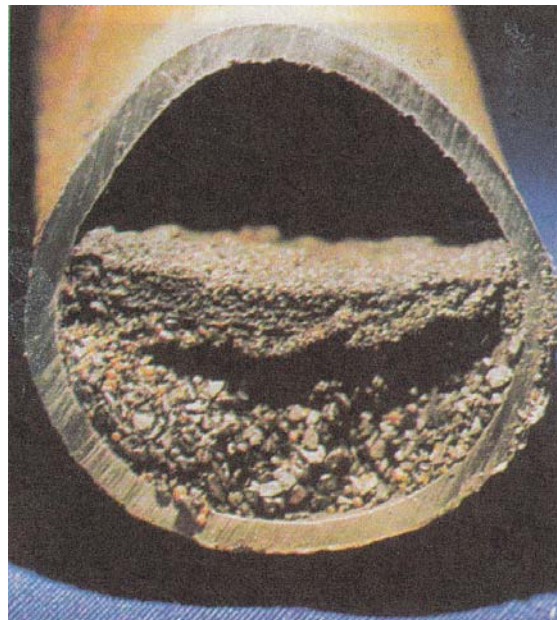
پدیده : خوردگی حفره ای

مدت کارکرد: ۱۰ سال

ظاهر نمونه : در داخل لوله ها ، رسوبات سنگین داخلی قابل مشاهده است. (لایه ای از اکسیدهای نرم و

ریز آهن که در زیر آن ، لایه اکسیدهای سیاه قرار دارد).

محیط : آب مداوا شده با شلانت ، فشار درام ۶۰۰ psi و فشار آب تغذیه ۸۲۰ psi است.



علت پدیده : در زیر رسوبات ، خوردگی حفره ای ناشی از حباب های آب جوش رخ داده است که این امر

منجر به تمرکز هیدروکسید سدیم شده است . همچنین پدیده سایش سطوح داخلی و خوردگی اکسیژنی نیز

مؤثر بوده است .

روش اصلاح: با انتخاب مواد مناسب تر از جمله فولاد زنگ نزن و یا ایجاد پوشش ضدسایش و مناسب بر

روی فولاد کربنی ، مشکل مرتفع می شود .

جنس نمونه: فولاد گالوانیزه شده به طریق غوطه وری داغ و فولاد پوشش داده شده دوگانه (duplex coated steel)

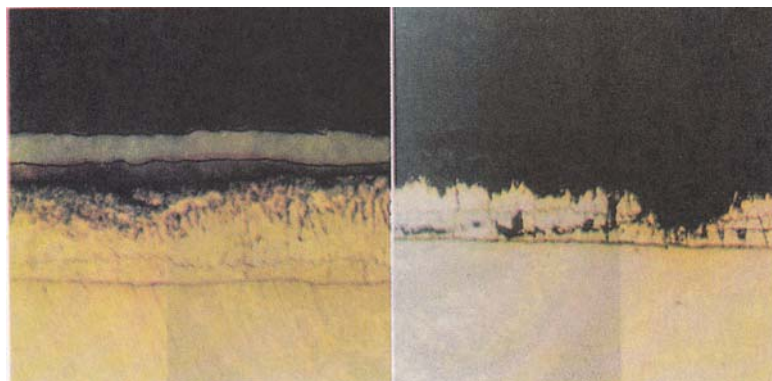
سیستم: دستگاه آزمون (test rig) قسمت: صفحات آزمون

پدیده: خوردگی اتمسفری مدت کارکرد: حدود ۱۲ سال

ظاهر نمونه: تصویر سمت چپ: سطح فولادی که از یک سیستم دوگانه تهیه شده است.

تصویر سمت راست: یک سطح فولادی که به طریق غوطه وری داغ گالوانیزه شده است.

محیط: اتمسفر صنعتی - دریایی.



علت پدیده: لایه روی (Zn) صفحه فولادی گالوانیزه شده به طریق گرم به وسیله اتمسفر خورنده مورد حمله قرار می گیرد. قسمتی از لایه آلیاژ زتا (لایه زیرین) و لایه دلتا-۱ هنوز موجود است. لایه روی خالص (لایه اتا) کاملاً خورده شده است. بعد از گالوانیزه کردن، صفحات سمت چپ مستقیماً با مواد زیر پوشش داده می شود:

یک آسترپلی وینیل بوتیرال، یک رزین کریسیلیک فرم آلدئید (ضخامت $10 \mu m$).

این سیستم دوگانه مانع از به وجود آمدن خوردگی و حمله به لایه روی می شود.

روش اصلاح: هنگامی که فولاد گالوانیزه شده به طریق گرم در معرض چنین محیط های خورنده ای قرار

دارد کاربرد سیستم دوگانه بهتر است و ترجیح داده می شود.

جنس نمونه: فولاد کربنی پوشش داده شده، فولادگالوانیزه شده دائمی به روش غوطه وری داغ و آلومینیم

سیستم: خط انتقال لوله به طول ۴۰ کیلومتر

قسمت: لوله فولاد کربنی که با زنگ سیلیکات روی پوشش داده شود، لوله فولاد گالوانیزه نبشی و لوله آلومینیم روکش شده با مواد عایق پشمی و معدنی.

پدیده: خوردگی زیر عایق

مدت کارکرد: بعد از ۱۱ سال نشستی در سیستم آشکار می شود.

ظاهر نمونه: سمت چپ: فولاد نبشی به شدت مورد حمله قرار گرفته است و به طور موضعی فرسوده شده است.

وسط: خط لوله انتقال به شدت مورد حمله قرار گرفته است. سمت راست: روکش به صورت موضعی فرسوده شده است.

محیط: محیط تا حدودی از رطوبت است، و واکنش های قلیایی ناشی از انحلال سیلیکات سدیم صورت می گیرد.



علت پدیده : به علت ورود کمی آب باران ، عایق مرطوب می شود به نحوی که لوله و روکش آن مورد حمله خوردگی قرار می گیرند . واکنش های قلیایی به همراه انتقال حرارت از سیمان سبب می شوند که فولاد نبشی گالوانیزه شده و آلومینیم روکش شده بیشتر تحت تأثیر خوردگی قرار گیرند .

روش اصلاح : چند راه برای درمان مشکل در این سیستم وجود دارد:

* عایق کاری مناسب شکاف ها با مواد مناسب و تعبیه سوراخ هایی برای خروج آب

* جایگزین کردن پشم (mineral wool) با شبکه شیشه ای (cellular glass)

* به کاربردن سیمان های منتقل کننده حرارت با پایه گرافیتی و رزین مصنوعی

* پوشش دادن لوله با اپوکسی و نوارهای PE

* به کاربردن طراحی مناسب تر .

جنس نمونه : فولاد کربنی پوشش دار (۳۵/۸)

سیستم : سیستم انتقال آمونیاک مایع قسمت : خط لوله

پدیده : خوردگی اتمسفری مدت کارکرد: ۱۵ سال

ظاهر نمونه : پوشش در محل پایه نگهدارنده ورقه ورقه شده و فولاد مورد حمله قرار گرفته است .

محیط : بیرون لوله : هوای مرطوب دریایی (صنعتی)

داخل لوله: محلول آمونیاک با 23°C و فشار ۶/۵ بار.



علت پدیده : رطوبت هوا که حاوی نمک ها و اسیدهای خورنده می باشد . به داخل پوشش بین لوله و نگهدارنده نفوذ نموده و سبب زوال پوشش و خوردگی لوله می شود . علت آلوده شدن رطوبت هوا دلیل: باران های اسیدی ایجاد شده و همچنین ذرات و قطرات آب برج خنک کن که در نزدیکی لوله می باشد ، است.

روش اصلاح : بایستی در محل اتصال لوله و پایه نگهدارنده از پوشش (نوارپیچی) استفاده شود که به طور کامل از نفوذ آب جلوگیری شود .

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه شده به طریقه گرم

سیستم : ساختمان

قسمت : بیمهای ساختمان

پدیده : پدیده ساندلین (sandelin phenomenon)

مدت کارکرد: بهره برداری نشده است.

ظاهر نمونه: تیرها به صورت غیرعادی در می آید به نحوی که رگه های خاکستری در آن به وجود می آید.

محیط : نا مشخص



علت پدیده : فولاد استفاده شده برای تیر حاوی مقدار زیادی Si ($0.02 - 0.045\%$) می باشد . در حین گالوانیزه کردن و بعد از آن لایه پیوسته ای از فاز زتا بر روی لایه اتا و روی خالص بر روی تیرهای عمومی تشکیل می شود . این فاز وقتی که فولاد کشته نشده باشد (non-killed steel) تشکیل می گردد . همین اثر برای فولادهایی که مقدار Si آن بین $0.03 - 0.11\%$ است و آلومینیم آن از بین نرفته اتفاق می افتد. روش اصلاح : به وجود آمدن فاز زتا که قدرت حفاظت خوبی دارد می تواند خوردگی را کاهش دهد ، ولی این فاز ، یک فاز ترد است و در موقع حمل و نقل به راحتی شکسته می شود . هنگامی که فولاد کشته شده برای گالوانیزه برده می شود ، کارخانه گالوانیزه کننده باید به این نکته توجه داشته باشد .

جنس نمونه : فولاد اندود شده به روش غوطه وری داغ

سیستم : آب گرم شهری

قسمت : لوله

پدیده : خوردگی گالوانیکی (پتانسیل معکوس)

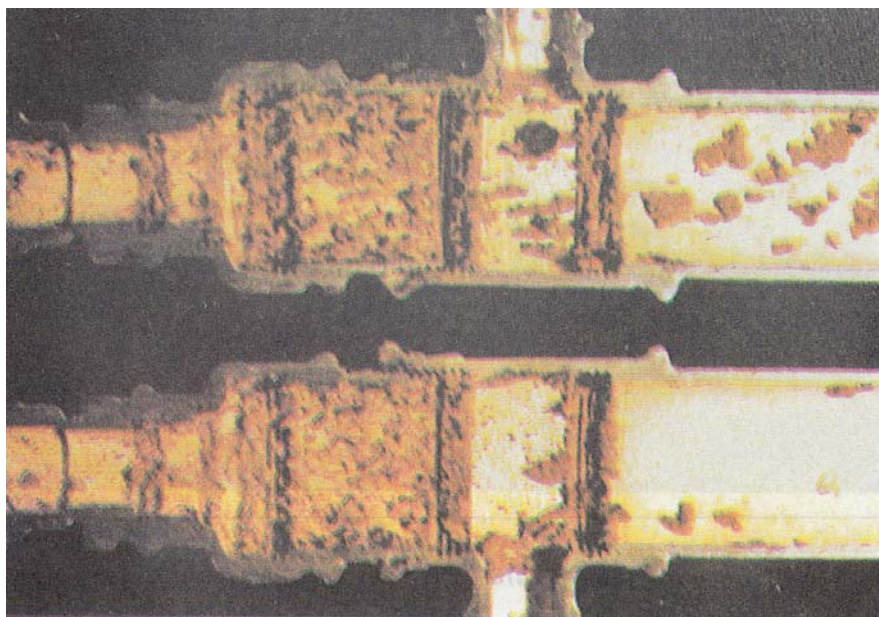
مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای روی نمونه صورت گرفته است .

محیط : مخلوطی از آب خام و آب نرم شده با کیفیت : سختی کل (CaCO_3 ppm ۱۷۵-۲۰۰) و بی

کربنات آب (CaCO_3 ppm ۳۲۰) است. برای کنترل خوردگی ترکیبی از فسفات و پلی فسفات ها به سیستم

اضافه می شود. دما $60-90^\circ \text{C}$ است .



علت پدیده : پتانسیل معکوس در زوج روی / آهن ناشی از تغییر هیدروکسید روی به اکسید روی در

بالتر از 60°C است . این خوردگی توسط تزریق مناسب فسفات ها کاهش می یابد ولی در این مورد

خاص مقدار فسفات کمتر از مقدار مورد نیاز بوده است .

روش اصلاح : با انتخاب مواد مناسب تر یعنی به کار بردن مواد مقاوم به خوردگی برای سیستم آب گرم

شهری بعنوان مثال با ساخت لوله ها از جنس مس ، فولاد زنگ نزن و یا پلاستیک مشکل مرتفع می شود .

جنس نمونه : فولاد کربنی اندود شده با روی به روشن غوطه وری داغ

سیستم : تأسیسات خنک کننده هوا به کمک آمونیاک

قسمت : تبخیر کننده (evaporater)

پدیده : خوردگی توسط آب خورنده مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : حمله یکنواختی روی فولاد و روی صورت گرفته است .

محیط : از آب چاه با خوردگی بالا استفاده می شود . اندیس لانگر آب ۲/۶ - و اندیس رایزنار ۱۱/۳ می

باشد .



علت پدیده : به علت خوردگی زیاد آب چاه و عدم تشکیل پوشش زنگار محافظ (پایانه نمک روی) خوردگی

در سیستم پدید می آید. خوردگی روی به علت وجود حفرات در پوشش روی تسریع می شود و در نهایت

شکاف در پوشش به وجود می آید . تنش حاصل از محصولات خوردگی پوشش روی را به کلی تخریب

می کند .

روش اصلاح :

- با گالوانیزه کردن مناسب تر تبخیر کننده و نیز کاهش خوردگی آب چاه به کمک حذف دی اکسید کربن

، مشکل سیستم برطرف می شود .

جنس نمونه : فولاد روی اندوده شده به روش غوطه وری داغ

سیستم : سیستم حرارت مرکزی

قسمت : لوله های گردشی که داخل و خارج آن گالوانیزه شده است .

پدیده : خوردگی سیلیکاتی

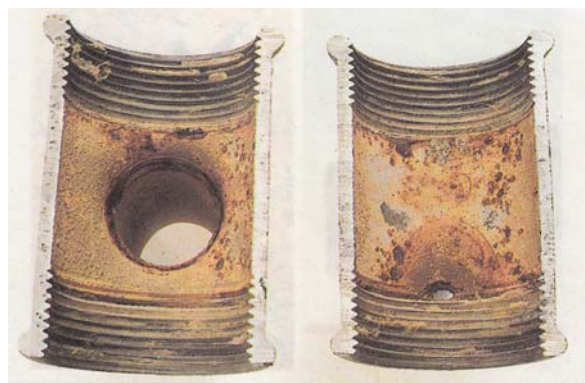
مدت کارکرد : ۲-۳ سال

ظاهر نمونه : نقاط خورده شده به رنگ قهوه ای و به شکل کورک بر روی سطح گالوانیزه پدید آمده است

. همچنین حفرات ریزی در زیر سطح و در نزدیک به شیارهای رزوه انتهایی بوجود آمده است .

محیط : آب دریا که به آن سیلیکات سدیم می گویند به عنوان بازدارنده خوردگی اضافه می شود . حداکثر

دمای سیستم 60°C است .



علت پدیده : استفاده از این بازدارنده در این محیط اصلاً به صلاح نیست ، زیرا یک محیط اسیدی در زیر رسوب

سیلیکاتی تشکیل می شود که نتیجه آن تبادل کاتیون ها از قبیل کلسیم و آهن و آزاد شدن یک اکسی والان یون

هیدروژن است . لذا سطح فلز مورد حمله قرار می گیرد که ناشی از افزایش اسیدیته است . این فرآیند هم بر روی

سطح فولاد سخت و هم بر روی فولاد گالوانیزه و هم در دمای پایین و هم در دمای بالا صورت می گیرد پدیده

خوردگی با افزایش سیلیکات به شدت افزایش می یابد .

روش اصلاح : تزریق سیلیکات سدیم قطع شود، سیستم به نحو مطلوب تمیز شود (با شستشوی شیمیایی) . قطعاتی

که بیش از حد خورده شده اند تعویض شوند . فولاد معمولی در شرایط فوق بهتر جواب می دهد .

مورد ۲۰۱.۳۶

صنعت : دامپروری

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه شده به روش غوطه وری داغ

سیستم : منبع آب در یک دامداری

قسمت : بدنه آبشخور

پدیده : زنگ سفید (White rust)

مدت کارکرد : ۳ هفته

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواختی به همراه تمرکز موضعی محصولات خوردگی روی در نمونه مشاهده

می شود .

محیط : آب باران .



علت پدیده : سیستم طوری طراحی شده است که مسیر گردش هوا برای تبخیر آب باران نا مناسب بوده و

این امر سبب می شود که پوشش روی مورد حمله قرار می گیرد و اکسید روی هیدراته (زنگ سفید)

تشکیل شود .

روش اصلاح : بازرسی سیستم نشان می دهد که کاهشی در ضخامت پوشش صورت نگرفته است و

گالوانیزه کردن مجدد ضروری نیست . باید مناطقی که زنگ سفید تشکیل شده است با برس تمیز شوند و

طراحی سیستم به نحوی تغییر یابد که مسیر گردش هوا به وجود آید .

مورد ۲.۱.۳۷

صنعت : غذایی

جنس نمونه : فولاد کربنی با پوشش نیکل ($70 \mu\text{m Cr} + 40 \mu\text{m Ni}$)

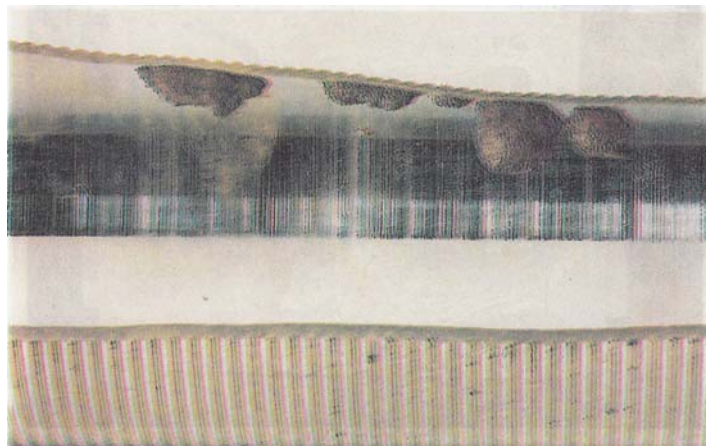
سیستم : کارخانه مارگارین سازی (روغن نباتی) قسمت : لوله خنک کن

پدیده : خوردگی کلریدی مدت کارکرد : شش ماه

ظاهر نمونه : حفره ای شدن شدید بر روی قسمت خارجی لوله

محیط : امولسیون مارگارین ، بصورت مخلوط در مدت زمان تولید و بصورت غیر مخلوط (آب و چربی

جدا از هم) در زمان توقف .



علت پدیده : در زمان توقف (در شب) ، فاز آب حاوی ۸ درصد نمک می باشد که در کف مخزن قرار گرفته

و نهایتاً سبب خوردگی پوشش مذکور می شود . ضمن آنکه با زوال و تخریب پوشش ، فرآیند خوردگی

فولاد به دلیل تشکیل پیل گالوانیکی تشدید می شود .

روش اصلاح : در مدت توقف باید به نحوی از جدا شدن آب از روغن جلوگیری شود (با گرم نگهداشتن)

و یا لوله از جنس (Stellite ۶) ساخته شوند .

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه اندود شده به روش داغ

سیستم : سیستم آب داغ

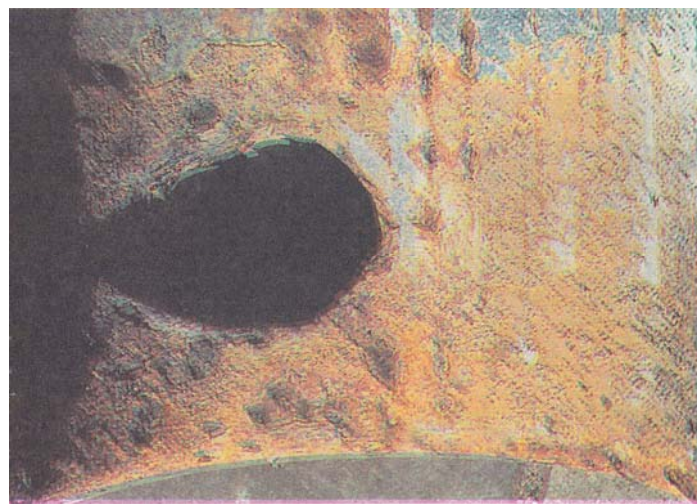
قسمت : دیواره مخزن ذخیره آب داغ

پدیده : خوردگی گالوانیک

مدت کارمرد : ۳ ماه

ظاهر نمونه : حمله به صورت موضعی و در نقاط منفصل از هم مشاهده می شود .

محیط : آب داغ ($40-70^{\circ}\text{C}$) .



علت پدیده : خوردگی گالوانیکی در اثر اختلاف پتانسیل بین دیواره که از جنس فولاد گالوانیزه اندود شده

است و پرچ های مسی به وجود می آید .

روش اصلاح : مخزن آب داغ دیگ بخار باید کاملاً از مس یا فولاد زنگ نزن ۳۱۶L انتخاب شود .

جنس نمونه : پوشش داده شده با قلع

سیستم : تأسیسات پاستوریزه کردن

پدیده : خوردگی گالوانیک (معکوس شدن پتانسیل)

قسمت : قوطی غذا

مدت کارکرد : تقریباً یک ساعت (مدت زمان پاستوریزه و سرد کردن قوطی)

ظاهر نمونه : به وجود آمدن نقاطی از زنگ در یک طرف قوطی

محیط : آب خنک کن در برج خنک کن جریان دارد . این آب به وسیله بخار تزریق شده در کف اتوکلاو به

۹۰ °C می رسد pH آن ۸/۷ (در دمای ۹۵ °C) مقدار کلرید (Cl^-) برابر با ۱۲۰ ppm و کلر آزاد (Cl_2) برابر

با ۲ppm می باشد .



علت پدیده : برای حذف اکسیژن آب ، بخار به داخل آب تزریق می شود . معکوس شدن پیل قلع/آهن تحت شرایط

غیر هوازی ، اتفاق می افتد . این معکوس شدن در قسمت بیرونی قوطی باعث می گردد که قلع بصورت آندی داخل

محلول گردد . با وارد شدن قلع به داخل محلول سبدهای فولادی و اتوکلاو به صورت کاتد عمل می کنند . بعد از

فرآیند قلع کاری مجدد (de-tinning process) زنگ زدن در اثر وارد شدن اکسیژن به داخل آب اتفاق می افتد .

روش اصلاح : جلوگیری از تماس بین قوطی ها با سبدهای فولادی با به کار بردن یک لایه پلاستیک یا قرار دادن

قوطی ها در داخل یک سبد پلاستیکی

به کار بردن یک کابل منیزمی در اتوکلاو که باعث می گردد قوطی ها را به صورت کاتدی حفاظت کند .

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه شده

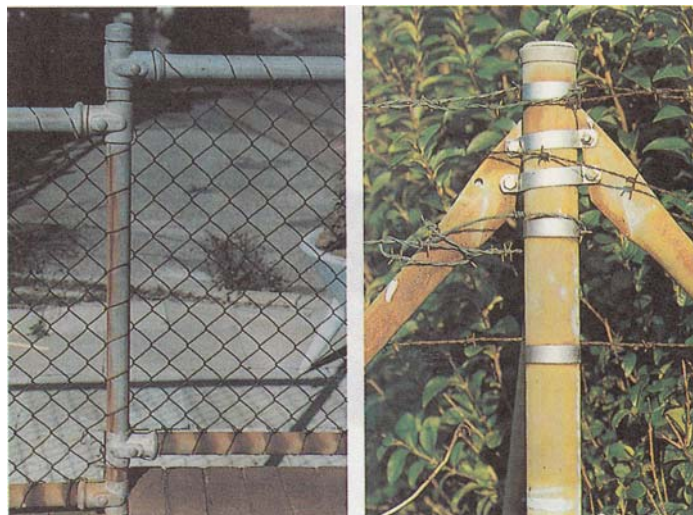
سیستم : حصار کشتی

قسمت : سمت چپ : تورهای سیمی بین حصارها: سمت راست : سیم خاردار

پدیده : خوردگی آتمسفری مدت کارکرد : به ترتیب ۱۰ و ۱۴ سال

ظاهر نمونه : بر روی سیم خاردار و تورهای سیمی ، زنگ آهن تشکیل شده است

محیط : محیط به ترتیب شامل آتمسفر دریایی و شهری است .



علت پدیده : تورهای سیمی گالوانیزه شده و سیم های خاردار بخاطر ضخامت کم لایه پوشش (۵-۸

میکرون) خورده شده اند . محصولات خوردگی این سیم خاردارها بر روی لوله های گالوانیزه که ضخامت

پوشش تنها ۵۰-۸۰ میکرون است ، رسوب می کنند . همچنین بست های حصارها که از جنس فولاد زنگ

نزن است سبب خوردگی گالوانیکی لایه فلزی روی در لوله های گالوانیزه می شود.

روش اصلاح : با انتخاب صحیح مواد یعنی بکار بردن تورهای سیمی و سیم خاردار از جنس روی

گالوانیزه شده و اعمال پوششی از جنس PVC بر روی آنها و نیز به کاربردن بست هایی از جنس فولاد

گالوانیزه شده مشکلی به وجود نخواهد آمد .

مورد ۲.۱.۴۱

صنعت : کشاورزی

جنس نمونه : فولاد کربنی که با روی بصورت غوطه وری داغ و دائمی ، پوشش داده شده است
(Sendzimir Process)

سیستم : گلخانه

قسمت : میله

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : حدود یک سال

ظاهر نمونه : حمله یکنواختی روی نمونه صورت گرفته است . این امر منجر به تشکیل زنگ شده است .

محیط : آتمسفر .



علت پدیده : پوشش روی از کیفیت مطلوبی برخوردار نمی باشد (ضخامت کم) ضمن آنکه گاز های دی اکسید کربن خروجی از دودکش یک دیگ بخار نزدیک محل سبب خوردگی نمونه شده است . لازم به ذکر است که سازنده برای لوله های مذکور ۲ سال ضمانت داده است .

روش اصلاح : فولاد مذکور که با روش فوق گالوانیزه شده است برای این شرایط کاری مناسب نیست . بهتر است از سازه های آلومینیومی استفاده شود . همچنین بعد از اسید شویی ، سازه خورده شده را می توان به روش غوطه وری داغ گالوانیزه کرد و سپس پوشش داد (سیستم دوبلکس) .

مورد ۲.۱.۴۲

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : فولاد گالوانیزه شده به طریقه گرم

سیستم : ساختمان

قسمت : بیمهای ساختمان

پدیده : پدیده ساندلین (Sandelin PHenomenon)

مدت کارکرد : بهره برداری نشده است

ظاهر نمونه : تیرها به صورت غیر عادی در می آید به نحوی که رگه های خاکستری در آن به وجود می

آید .

محیط : نامشخص



علت پدیده : فولاد استفاده شده برای تیر حاوی مقدار زیادی Si ($0.02 - 0.05$) می باشد . در حین

گالوانیزه کردن و بعد از آن لایه پیوسته ای از فاززتا بر روی لایه اتا و روی خالص بر روی تیرهای

عمومی تشکیل می شود . این فاز وقتی که فولاد کشته نشده باشد (non - killed stel) تشکیل می گردد .

همین اثر برای فولادهایی که مقدار Si آن بین $0.011 - 0.03$ ٪ است و آلومینیم آن از بین نرفته اتفاق می افتد

.

روش اصلاح : به وجود آمدن فاز زتا که قدرت حفاظت خوبی دارد می تواند خوردگی را کاهش دهد ، ولی

این فاز ، یک فاز ترد است و در موقع حمل و نقل به راحتی شکسته می شود . هنگامی که فولاد کشته

شده برای گالوانیزه برده می شود ، کارخانه گالوانیزه کننده باید به این نکته توجه داشته باشد.

مورد ۲.۲.۱

صنعت : پتروشیمی

جنس نمونه : فولاد کربنی عایق شده با پشم شیشه

سیستم: خط انتقال مرکاپتان

قسمت : مقطع لوله

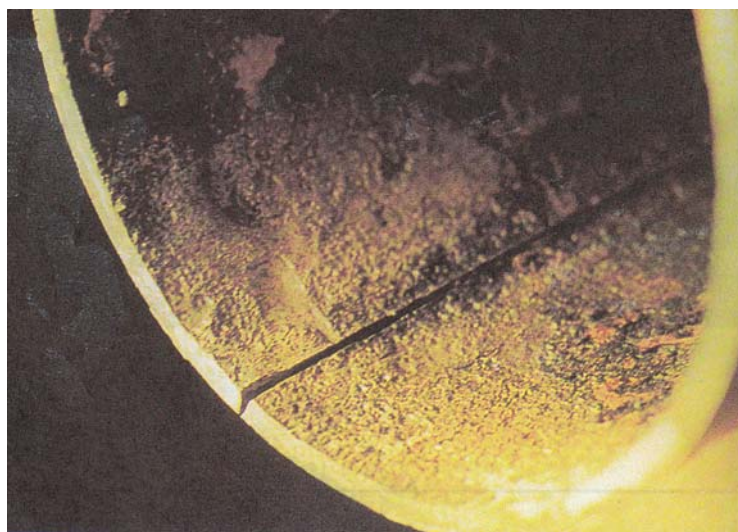
پدیده : خوردگی در زیر عایق بندی (حرارتی)

مدت کارکرد : ۶ سال

ظاهر نمونه : خوردگی عمومی نامنظم

محیط : داخل لوله ، مرکاپتان در دمای 50°C

خارج لوله : رطوبت ناشی از باران ، که از عیوب و ترک های موجود در عایق بندی نفوذ کرده و منتشر شده است .



علت پدیده : خیس شدن مرتب سطح لوله توسط آب آلوده باران (باران اسیدی) که روی سطح لوله گرم

تبخیر می شود . باعث خوردگی گردیده است . این لوله بر اثر کاهش ضخامت جداره آن شکسته است .

روش اصلاح :

- روی سطح لوله ، ابتدا از یک پوشش پلی اتیلنی استفاده نموده ، سپس آن را عایق بندی کنید .

جنس نمونه : فولاد کربنی، با پوشش کول تاراپوکسی

پدیده : خوردگی گالوانیکی

سیستم : تأسیسات تصفیه فاضلاب

قسمت : لوله مربوط به انتقال تانک ته نشینی

مدت کارکرد : ۱/۵ سال پس از قرار دادن کلاhek از نوع فولاد زنگ نزن

ظاهر نمونه : پوسیدگی و کنده شدن موضعی پوشش ، به همراه خوردگی حفره ای فولاد .

محیط : فاضلاب غلیظ با هدایت بالا



علت پدیده : پس از نصب کلاhek از جنس فولاد زنگ نزن ، اتصال گالوانیکی (اتصال دو فلزی) بین منافذ

موجود در پوشش و فولاد برقرار شد که واکنش را به سوی خوردگی گالوانیکی هدایت می کند .

روش اصلاح : ترمیم پوشش و پس از آن

* ساخت کلاهکی غیر فلزی (پلاستیکی) یا

* اعمال حفاظت کاتدی و انجام بازرسی های فنی به منظور عملکرد صحیح آن .

مورد ۲.۲.۳

صنعت : پتروشیمی

جنس نمونه : فولاد کربنی پوشش دار (۳۵/۸)

سیستم : سیستم انتقال اسید سولفوریک

قسمت : خط لوله

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : ۱۵ سال

ظاهر نمونه : پوشش در محل پایه نگهدارنده ورقه ، ورقه شده و فولاد مورد حمله قرار گرفته است .

محیط : اسید سولفوریک ۹۵٪ ، دما حداکثر 25°C ، دمای دیواره لوله 40°C .



علت پدیده : فولاد کربنی در برابر اسید سولفوریک در دمای اتاق و سرعت جریان پایین (کمتر از M/S

۰/۹) به دلیل تشکیل لایه محافظ سولفات فرو مقاومت خوبی را نسبت به خوردگی داراست . (نرخ خوردگی

۰/۵ mm/yr) در شرایط خاص (هنگامی که اسید قوی ساکن باشد) حباب های هیدروژن با نفوذ در لایه

مذکور سبب تخریب آن می شوند . در این حالت خوردگی موضعی می تواند تا حدود ۳ mm/yr و یا

بیشتر افزایش یابند .

روش اصلاح : استفاده از پوشش هایی از جنس شیشه یا Hypalon در مناطق مستعد به شیار هیدروژنی

* ساخت قطعات از جنس فولاد AISI ۳۱۶ برای غلظت های اسید سولفوریک از ۹۰٪ تا ۱۰۰٪ .

* استفاده از پوشش هایی در مخازن از آلیاژهای ۲۰۰-cb-۳ یا Carpenter alloy یا Hastelloy c۲۷۶

برای حفاظت در برابر اسید سولفوریک ۷۰-۱۰۵٪

جنس نمونه : لوله فولاد کربنی که داخل آن در کارخانه سازنده ، پوشش اپوکسی سیلیس

(epoxy-silica) اعمال شده است .

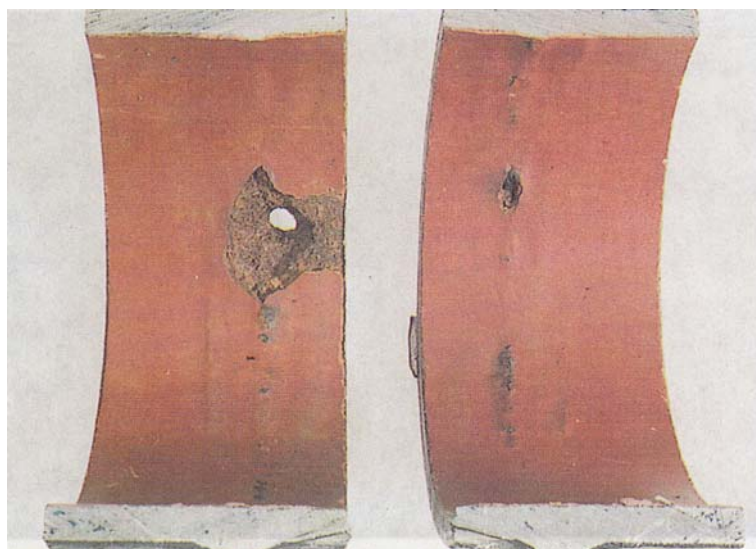
سیستم : شبکه فاضلاب صنعتی

قسمت : مقطع لوله با ضخامت (قطر دیواره ۶mm).

پدیده : خوردگی توأم اکسیژن و CO_2 مدت کارکرد : نامشخص

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای در اطراف محل جوشکاری .

محیط : حاوی اکسیژن ، دی اکسید کربن و همچنین نمک بالا (۱۵-۲۰٪) ، دما حدود 30°C .



علت پدیده : در محل کارخانه که پوشش مذکور اعمال شده است ، متأسفانه به دلیل عدم دقت ، حفرات هوا

در داخل پوشش در نزدیکی محل های جوش لوله ایجاد شده ، که به دلیل خورنده بودن محیط ، به زیر

پوشش مذکور نفوذ نموده و سبب تخریب پوشش و همچنین لوله شده است .

روش اصلاح : لوله های مذکور بایستی با توجه به شرایط محیطی از نوع اپوکسی فایبرگلاس باشد (glass

fibre –reinforced epoxy)

جنس نمونه : فولاد کربنی با پوشش اپوکسی پخته شده (baked epoxy coating)

سیستم : تانک انبساط دستگاه حرارتی مرکزی

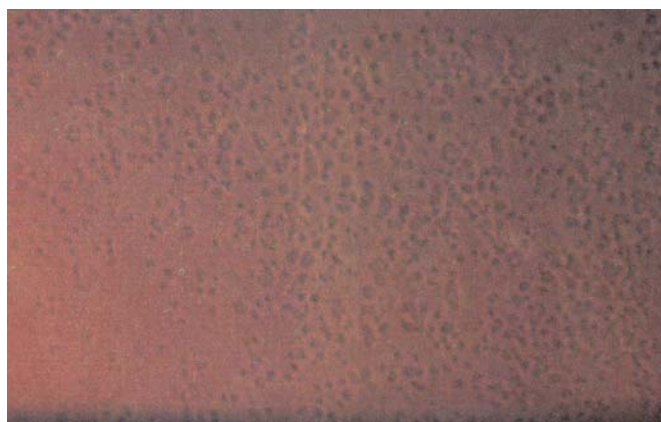
قسمت : سطح خارجی

پدیده : زوال پوشش

مدت کارکرد : کوتاه مدت

ظاهر نمونه : حدود ۳۰٪ از پوشش از حفره های ریز در کنار هم پوشیده شده است .

محیط :



علت پدیده : عدم تمیز کاری خوب سطح فلز قبل از اعمال پوشش پودری سبب چسبندگی کم پوشش به

سطح فلز می شود . این امر سبب شروع و ادامه خوردگی می شود . در این حالت خاص به دلیل استفاده از

مواد هیدروکربن های آروماتیک پلی سیلیک (PAHs) گریس زدایی از سطح مشکل می باشد و حضور

مواد گریسی در سطح سبب اختلال در اعمال پوشش می شود .

روش اصلاح : بایستی از رنگهای روغنی فاقد PAH استفاده نمود . ضمن آنکه مواد مذکور به محیط

زیست صدمه می زند .

جنس نمونه : فولاد با پوشش پخته شده از رزین فنل فرم آلدئید قسمت : صفحات نگهدارنده با پوشش

مذکور

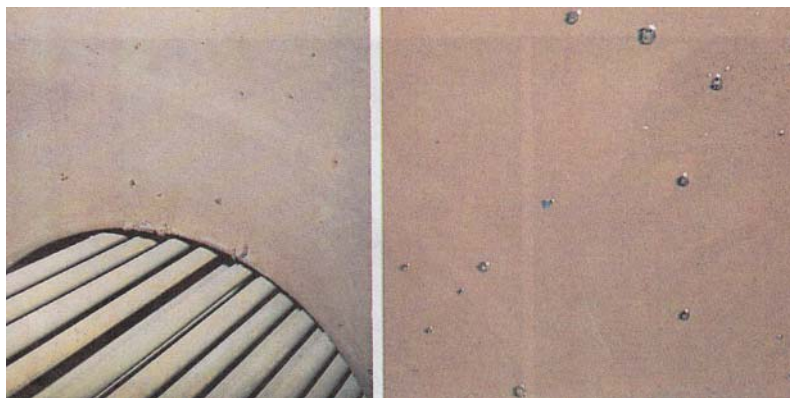
سیستم : دیگ بخار با لوله های مسی و صفحات نگهدارنده از جنس آهن پوشش داده شده

پدیده : زوال پوشش مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : وجود حفره به همراه خوردگی تاول گونه (Corrosion blisters)

محیط : آب خام تصفیه نشده در خارج لوله با درجه حرارت 80°C و بخار از درون لوله های

مسی عبور می کند .



علت پدیده : پوشش مذکور از کیفیت خوبی برخوردار نبوده است ، زیرا حفرات هوا در داخل پوشش در

زمان ساخت و اعمال آن ایجاد گردیده است . این امر سبب شده است تا تحت شرایط خوردگی گالوانیکی

(لوله های مسی و صفحات نگهدارنده فولادی) پوشش با سرعت بیشتری خورده شود .

روش اصلاح :

* بایستی پوشش مذکور با ماسه زنی (سندپلاست) برداشته شده و مجدداً پوشش با کیفیت خوب اعمال

شود . همچنین بایستی با دستگاه مخصوص آزمایش وجود حفرات در پوشش انجام شود (Spark-

testing).

* از روش حفاظت کاتدی استفاده شود .

جنس نمونه : فولاد کربنی پوشش داده شده

سیستم : سیستم آب خنک کن یکبار گذر

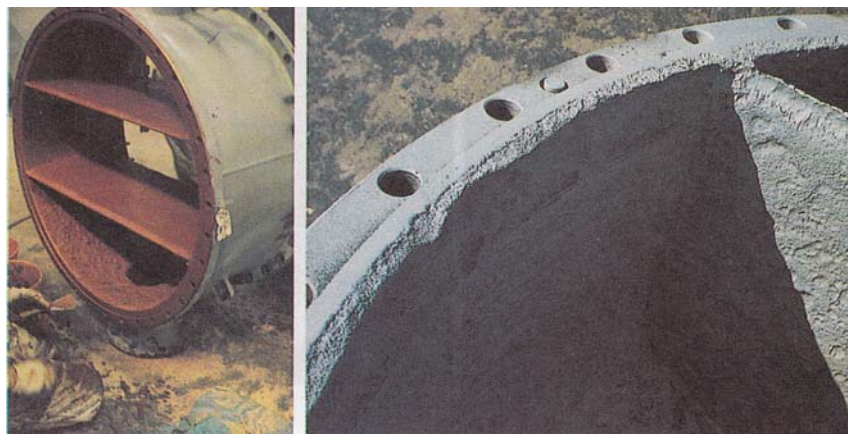
قسمت : لوله انتقال آب

پدیده : خوردگی گالوانیک

مدت کارکرد : ۳ ماه

ظاهر نمونه : حمله شدید در مناطق مخصوصی در نزدیکی صفحه لوله ها . تصویر سمت چپ ، قسمت بالایی کانال که به طور موقت پوشش داده شده است . تصویر سمت راست : همان قطعه بعد از شن پاشی می باشد .

محیط : آب لب شور که در داخل لوله جریان دارد . همچنین اطراف لوله ها ، اتیلن وجود دارد .



علت پدیده : باندل لوله ها از جنس کوپرونیکل است و داخل لوله پوشش دارد. اتصال این دو قسمت به

یکدیگر باعث به وجود آمدن خوردگی گالوانیک در نواحی آسیب دیده پوشش می شود .

روش اصلاح : برای جلوگیری از خوردگی بایستی باندلها نیز پوشش داده شوند (همانند پوشش داخل

لوله) و یا روش بهتر : ساخت باندلها از جنس فولاد معمولی و اعمال پوشش همانند پوشش داخل لوله .

جنس نمونه : فولاد رنگ شده

قسمت : نرده های محافظ

سیستم : پل (در شهر کبک کانادا)

مدت کارکرد : ۱۰ سال

پدیده : خوردگی اتمسفری

ظاهر نمونه : پوشش در زیر قسمت های زنگ زده ورقه ورقه شده است و نرده های فلزی دچار خوردگی

یکنواخت شده اند، در حالی که پیچ و مهره های گالوانیزه ، سالم مانده اند .

محیط : هوای روستایی



علت پدیده : به دلیل غیر محافظ بودن پوشش اعمالی و عدم آماده سازی سطح قبل از رنگ آمیزی ، بدنه

فلزی دچار خوردگی شده است . در حالی که کلیه تجهیزات آن از قبیل پیچ و مهره ، تیرکها و ... با داشتن

پوشش گالوانیزه سالم مانده اند .

روش اصلاح : این نوع خوردگی می تواند اتفاق نیافتد اگر کلیه تجهیزات قبل از نصب ، به صورت روش

غوطه وری داغ گالوانیزه می شدند .

جنس نمونه : فولاد کربنی با پوشش اپوکسی

سیستم : چاه نفت

قسمت : لوله چاه با ضخامت (۱۱ mm)

پدیده : خوردگی شیرین (خوردگی CO_2) مدت کارکرد : ۲-۴ سال

ظاهر نمونه : در مناطقی که پوشش دچار آسیب شده فولاد بصورت موضعی دچار خوردگی شدید شده است .

محیط : نفت خام حاوی آب (آب نمک و CO_2 دما حداکثر 50°C) .



علت پدیده : در نقاطی که پوشش دچار آسیب شده است به دلیل دی اکسید کربن بالا و همچنین آب نمک ،

سطح فولاد به شدت خورده شده است . پوشش در حالت های زیر می تواند تخریب شود و یا آسیب ببیند :

در زمان حمل و نقل و یا عدم پوشش دهی با کیفیت خوب در زمان اعمال .

روش اصلاح :

* ارتقاء بازرسی فنی (کنترل کیفیت) در زمان اعمال پوشش

* دقت در زمان حمل و نقل به منظور جلوگیری از خسارات و تخریب پوشش

* استفاده از بازدارنده در چاه نفت .

* استفاده از فولاد زنگ نزن دو فاز (دوتائی) .

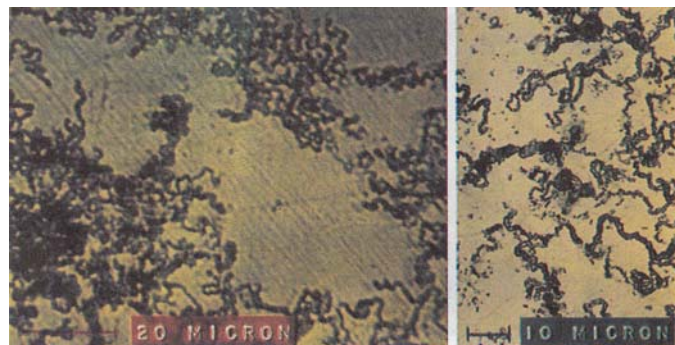
جنس نمونه : فولاد نورد سرد شده که با گریس تمیز شده و با یک پوشش پایه آنیل سلولز بدون رنگدانه پوشش داده شده است .

سیستم : آزمایش rig **قسمت :** صفحات کابین آزمایش

پدیده : خوردگی رشته ای (filiform Corrosion) **مدت کارکرد :** ۱ تا ۲ سال

ظاهر نمونه : پدیده خوردگی در زیر پوشش به شکل رشته های بسیار نازک اتفاق افتاده است .

محیط : اتمسفر مربوط داخلی با رطوبت نسبی ۸۰ تا ۹۰٪



علت پدیده : به دلیل تغییرات شدید در مقدار رطوبت هوا ، پیل های اختلاف دمشی به وجود می آید و اکسید آهن هیدراته در لبه های نمونه تشکیل می شود ، که این اکسید آهن هیدراته در زیر پوشش شروع به رشد می کند (خوردگی رشته ای) . هرگونه نفوذ رطوبت به زیر پوشش سبب می شود تا جوانه های اولیه برای شروع خوردگی رشته ای شکل گیرد) .

روش اصلاح :

- (۱) اگر رطوبت هوا به کمتر از ۶۵٪ کاهش یابد مشکل برطرف می شود (البته در صورت امکان) .
- (۲) همچنین با به کار بردن یک سیستم پوششی مقاوم (با حداقل دو نوع پوشش نظیر کول تاراپوکسی) مشکل برطرف می شود .

جنس نمونه : فولاد کربنی که در کارخانه پوشش شده است .

سیستم : ایستگاه تصفیه گاز (رسانی) قسمت : لوله (ضخامت ۷mm)

پدیده : خوردگی اکسیژنی مدت کارکرد: حدود ۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی در نزدیکی محل جوش جایی که پوشش تخریب شده است .

محیط : فاضلاب هوادهی شده که حاوی نمک بالا (۲۰-۱۵٪) بوده و pH آن برابر ۵ و درجه حرارت 35°C

است .



علت پدیده : در زمان جوشکاری ، محل های جوش به خوبی پوشش نمی شوند . این مسئله سبب می شود

تا آب خورنده به داخل پوشش نفوذ نموده و نهایتاً سبب تخریب پوشش و لوله شود .

روش اصلاح :

* کنترل کیفیت در زمان پوشش دادن .

* تزریق بازدارنده به فاضلاب مذکور به منظور کاهش خوردگی محیط .

* کاهش خوردگی محیط (فاضلاب) با حذف و هواگیری اکسیژن (مکانیکی یا شیمیایی) .

جنس نمونه : فولاد پوشش داده شده با رزین فنل اپوکسی

سیستم : برج خنک کن

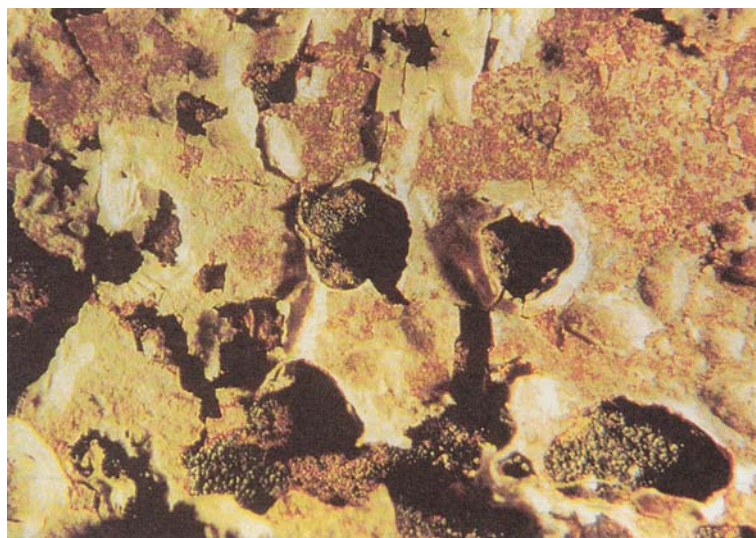
قسمت : لوله مبدل حرارتی

پدیده : خوردگی اکسیژنی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : پوشش رزینی به صورت تاول در آمده و نهایتاً پارگی و زوال صورت گرفته است .

محیط : درجه حرارت تقریباً $16-27^{\circ}\text{C}$ ، $\text{pH} = 7/5-8/2$ ، مقدار کلر آزاد بیش از $0/8 \text{ ppm}$.



علت پدیده : به دلیل عدم اعمال پوشش مناسب و دارا بودن خلل و فرج در پوشش این لایه صدمه دیده و

نهایتاً اکسیژن موجود در آب در زیر پوشش سبب تشکیل پیل غلظتی می شود .

روش اصلاح : بهتر است از پوشش مناسب کول تاراپوکسی استفاده شود . ضمن اینکه آماده سازی

سطح باید به مطلوب انجام شده و همچنین نحوه اعمال پوشش نیز بایستی کنترل شود .

مورد ۳.۱.۱

صنعت : شبکه آب شهری

جنس نمونه : آلومینیم

سیستم : خط لوله انتقال آب

قسمت : فلانچ فشاری

پدیده : خوردگی گالوانیکی

مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : حمله شدیدی بصورت خوردگی روی کل سطح صورت گرفته است .

محیط : محیط اطراف بسیار مرطوب است .



علت پدیده : اتصال بین خط لوله از جنس فولاد زنگ نزن و فلانچ فشاری آلومینیمی .

روش اصلاح : با به کار بردن فلانچ فشاری از نوع فولادی می توان از وقوع خوردگی گالوانیکی جلوگیری

کرد .

مورد ۳.۱.۲

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : آلومینیم آنودایز شده (AA ۶۰۶۳)

سیستم : ساختمان

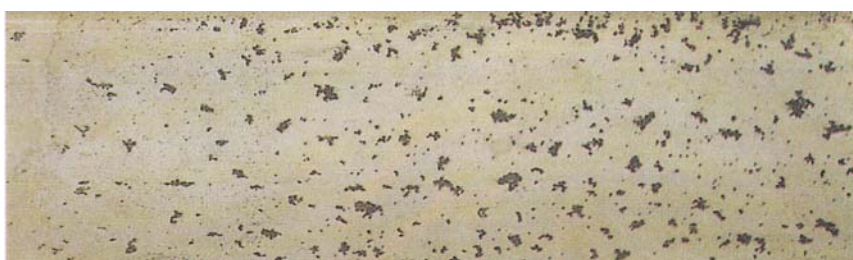
قسمت : قسمت بیرونی دیواره ساختمان

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : حفره دار شدن

محیط : هوای شرجی (کنار دریا)



علت پدیده : عملیات آنودایزینگ بطور مطلوب و دقیقی انجام نشده است ضمن آنکه حضور نمک (NaCl)

در کنار دریا سبب افزایش خوردگی می شود .

روش اصلاح : لایه محافظ (آنودایزینگ) بر روی آلومینیم بایستی بدون خلل و فرج بوده و در زمان

ساخت بایستی دقت لازم بعمل آید .

* اعمال حفاظت کاتدی و انجام بازرسی های فنی به منظور عملکرد صحیح آن .

مورد ۳.۱.۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : آلومینیم ($AlMg_3$)

سیستم : مخزن ذخیره محصول

قسمت : صفحه زیرین

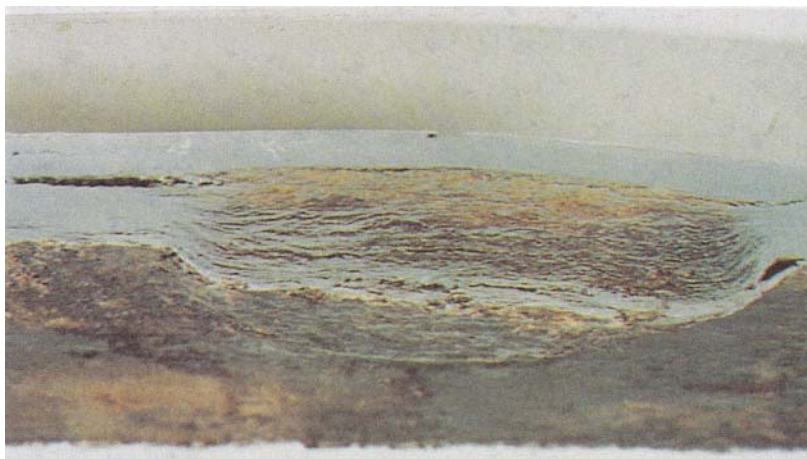
پدیده : پوسته ای شدن (خوردگی لایه ای)

مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی تورقی (لایه ای شدن موضعی که منجر به بادکردن ماده شده است).

محیط : خارجی: خاک مرطوب

داخلی : لاکتوم (lactam) ۱۰۰٪ دما : $80^{\circ}C$.



علت پدیده : رطوبت بین کف مخزن و صفحه منجر به ایجاد یک خوردگی کم شده که در نهایت منجر به

وجود آمدن خوردگی تنشی بین دانه ای سطح می شود . شکسته شدن و تورق سطح موادی که خورده

نشده به دلیل نیروی فشاری است که در اثر محصولات خورده شده به وجود می آید .

روش اصلاح : قرار دادن یک مخزن جدید که در کف آن لایه ای از قیر پوشش داده شده است .

مورد ۳.۱.۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : آلومینیم ۹۹٪

سیستم : مخزن

قسمت : قسمت خارجی مخزن نفت که با آزبست عایق شده است .

پدیده : خوردگی تورقی (Exfoliation)

مدت کارکرد : چند سال

ظاهر نمونه : خوردگی لایه ای .

محیط : اتمسفر



علت پدیده : به دلیل تر شدن منظم و مداوم عایق و تماس مستقیم با آزبست ، آلومینیم در معرض

خوردگی لایه ای قرار می گیرد و در نتیجه بیشتر و بیشتر لایه های اکسیدی تشکیل می شود .

روش اصلاح : با به کار بردن یک لایه پلاستیکی بین آلومینیم و آزبست می توان از خوردگی جلوگیری

کرد (امروزه استفاده از آزبست به عنوان عایق به دلیل خاصیت سرطانزا بودن آن به کار نمی رود).

مورد ۳.۱.۵

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : آلومینیم ۹۹٪

سیستم : مخزن اسیداستیک

قسمت : صفحه کف

پدیده : خوردگی تنشی

مدت کارکرد : ۶ تا ۷ سال

ظاهر نمونه : شکست در مرکز جوش ، در جهت طولی جوش .

محیط: اسید استیک غلیظ در دمای محیط .



علت پدیده : به علت بالا بودن سرعت سرد شدن در هنگام جوشکاری صفحات ، ترک هایی به وجود می آید . به علت وجود تنش باقیمانده در نوک ترک ، این ترک به وسیله اسیداستیک گسترش می یابد و موجب رشد ترک و خوردگی می شود .

روش اصلاح :

* با پیش گرم کردن و آرام سرد کردن صفحاتی که قرار است جوش داده شود می توان از به وجود آمدن ترک ها جلوگیری کرد .

* ترکهای به وجود آمده را می توان با ذوب مجدد از طریق فرآیند (TIG) از بین برد .

مورد ۳.۱.۶

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : آلومینیم (۹۹٪)

سیستم : دیگ بخار مرکزی با سوخت گاز

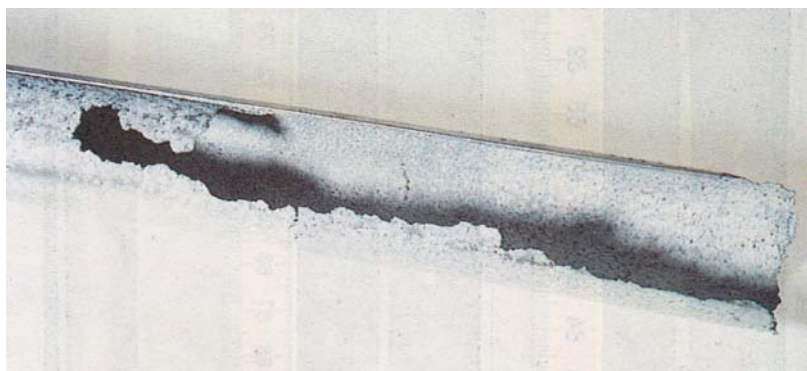
قسمت : لوله خروج گاز

پدیده : خوردگی اسیدی (Acid Corrosion)

مدت کارکرد : حدود ۱۲ ماه

ظاهر نمونه : خوردگی عمومی همراه با زبر شدن سطح .

محیط : گاز های خروجی که با اسید کلریدریک آلوده شده است .



علت پدیده : هوای احتراق با مواد آلی حاوی گاز کلر آلوده شده است ، هنگام احتراق ، اسید کلریدریک

تشکیل می شود و باعث آسیب رساندن به لوله آلومینیمی می شود .

روش اصلاح : استفاده از هوای تمیز و کنترل در مورد عدم آلودگی هوای احتراق .

جنس نمونه : آلومینیم (AA ۶۰۶۳ AlMgSi ۰,۵)

سیستم : سیستم گرم کن گلخانه

قسمت : لوله های تابنده (Radiant Pipes)

پدیده : حمله کلرید

مدت کارکرد : سه ماه

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای .

محیط : آب خام حاوی اکسیژن بالا که با مواد پراکنده ساز و همچنین مولیبدات سدیم (بعنوان بازدارنده)

مداوا شده است . دمای آب °C ۷۰-۴۰ ، pH برابر با ۹/۵-۱۱ .



علت پدیده : به دلیل رسوب اکسید آهن و بالا رفتن pH (در اثر اضافه کردن مولیبدات سدیم) حفره ها در

حضور اکسیژن و به وسیله کلرید جوانه می زنند. آب گرم شده حاوی ۷۰ppm یون آهن و ۷۰ppm یون

آلومینیم می باشد . به کار گیری مداوم غیر صحیح سبب ایجاد آسبی شده است که خسارت آن حدود

۱۱۰,۰۰۰ دلار می باشد .

روش اصلاح :

* تمام لوله های آلومینیمی عوض شود ؛ همچنین همراه با سیستم قدیمی یک مبدل حرارتی از جنس

فولاد زنگ نزن نیز استفاده شود .

* سیستم ثانویه با آب مقطر پر شده و مولیبدات سدیم به آن افزوده نشود .

جنس نمونه : آلومینیم

سیستم : سیستم آب داغ گردشی بسته که برای گرم کردن محصولات به کار می رود .

قسمت : لوله های آلومینیمی که با قطعاتی از جنس فولاد پوشیده شده با کادمیم اتصال داده شده است .

پدیده : خوردگی گالوانیک

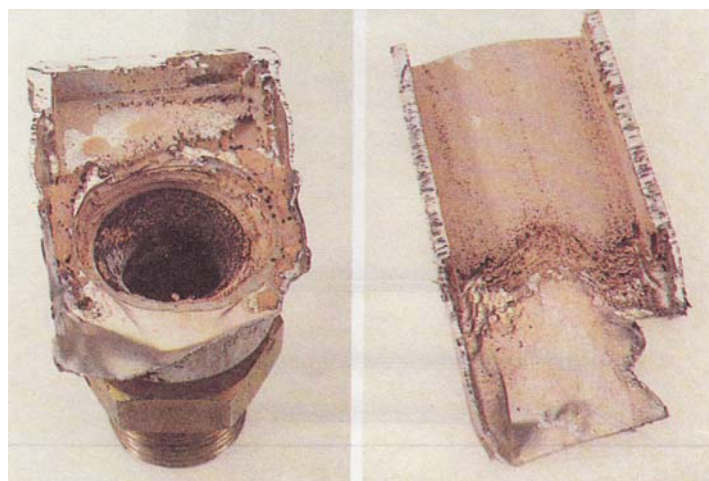
مدت کارکرد : حدود یک سال

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت به نحوی که ضخامت لوله از ۳ میلی متر به ۱ میلی متر کاهش یافته است

محیط : آب خام حاوی هوای محلول با شرایط : متوسط دمای این آب 50°C است که به 90°C نیز می

رسد.

pH آن نیز برابر با ۷/۳ می باشد .



علت پدیده : آب گرم هوادار باعث ایجاد خوردگی گالوانیک در فولاد / آلومینیم می شود (دانه های سیاه به

وجود آمده حاوی کربنات کلسیم پوشیده شده با اکسید آهن می باشد) .

روش اصلاح :

* ساخت سیستم از فولاد زنگ نزن و استفاده از آب نرم شده به جای آب خام ، می توان به جای آب نرم

از آب مقطر و یا آبی که املاح آن توسط دستگاه اسمز معکوس گرفته شده است ، نیز استفاده نمود .

مورد ۳.۱.۹

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : آلومینیم آنودایز شده (۹۹٪)

سیستم : ساختمان

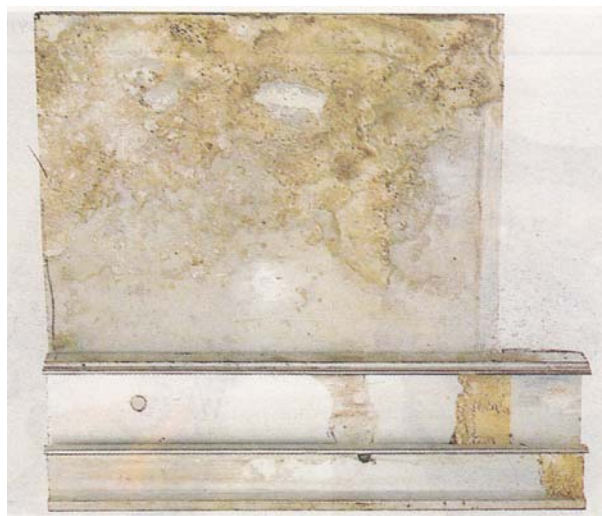
قسمت : زوار پنجره

پدیده : شکوفه شدن (blooming)

مدت کارکرد : کمتر از یک سال

ظاهر نمونه : یرفک (شکوفه های) سفید در روی سطح .

محیط : اتمسفر هوا .



علت پدیده : به دلیل شستشوی ناقص بعد از عملیات آنودایزینگ ، مقداری اسید در عملیات اسیدشویی در لایه های اکسیدی باقیمانده و این امر سبب خوردگی آن شده است . این پدیده به شکوفه شدن معروف است.

روش اصلاح : بهبود در زمان شستشو پس از عملیات آنودایزینگ یعنی آبکشی کامل تا حذف مواد اسیدی از روی سطح .

مورد ۳.۱.۱۰

صنعت: برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه: آلومینیم (۲,۵ AlMg, ۵۰۵۲)

سیستم: آب خنک کن یکبار گذار

قسمت: صفحه مبدل حرارتی.

پدیده: خوردگی سولفیدی

مدت کارکرد: حدود یک سال

ظاهر نمونه: حفره ای شدن (Pitting)

محیط: آب چاه خورنده حاوی سولفید و رسوب اکسید آهن، میزان سولفید (s^{-2}) ppm ۰/۸، آهن

(Fe^{+2}) ppm ۳۱، $pH=۶/۳$ ، دمای جداره حدوداً $۱۰۰^{\circ}C$.



علت پدیده: H_2S موجود در آب چاه، آلومینیم را مورد حمله قرار می دهد.

روش اصلاح: تبدیل سیستم به یک سیستم خنک کن بسته غیر مستقیم که به وسیله آب چاه از طریق یک

مبدل حرارتی خنک گردد.

جنس نمونه : آلومینیم آندایز شده

سیستم : استخر شنا

قسمت : کف پوش تخلیه آب

پدیده : حفره دار شدن در اثر کلرید

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : حفره دار شدن .

محیط : آب استخر شنا حاوی هیپو کلریت سدیم می باشد که به منظور ضد عفونی نمودن آب به آن

اضافه شده است .



علت پدیده : در فرآیند ساخت (آنودایزینگ) حفراتی در لایه اکسیدی ایجاد شده و تنش هایی در

زمان ساخت در این قطعه ایجاد شده است که این عوامل باعث به وجود آمدن خوردگی در کف پوش می

گردد .

روش اصلاح : بایستی در زمان ساخت ، دقت های لازم به عمل آید ضمن آنکه آب مذکور برای این نوع

فلز خورنده می باشد .

مورد ۳.۱.۱۲

صنعت : حمل و نقل

جنس نمونه : آلیاژ آلومینیم (AA ۷۰۷۵-T۶) (extrusion . ۱,۵ Cu Zn Mg Al)

سیستم : هواپیما

قسمت : نمونه ای از دم افقی هواپیما

پدیده : خوردگی تورقی (خوردگی لایه ای)

مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی لایه ای که از یک سوراخ پرچ شروع شده است .

محیط : اتمسفر .



علت پدیده : آلیاژ مذکور به دلیل ساختار فیزیکی ، مناسب برای ساخت بدنه هواپیما نمی باشد .

روش اصلاح : این آسیب می تواند موجب از کار افتادن قطعه شود که با روش های زیر می توان از به

وجود آمدن این خوردگی جلوگیری کرد :

* به کار بردن یک پوشش مناسب

* انتخاب مواد دیگر که در مقابل این خوردگی مقاوم باشند .

مورد ۳.۱.۱۳

صنعت : ساختمانی (تهویه مطبوع)

جنس نمونه : آلومینیم

سیستم : دستگاه تهویه مطبوع

قسمت : رطوبت ساز (humidifier)

پدیده : خوردگی در اثر بالابودن قلیائیت

مدت کارکرد: نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت

محیط : آب گردشی نرم شده (Softened Water) که pH آن ۹/۵ می باشد .



علت پدیده: اتمیزه شدن باعث بوجود آمدن آب گردشی قلیایی شده و سیستم دمش نامناسب باعث بوجود آمدن رسوبات بی کربنات سدیم و سودا می شود . این مواد باعث آسیب دیدن آلومینیم می شود . رسوبات ایجاد شده این آب که دارای قلیائیت بالایی است سبب خوردگی آلومینیم می شود (رسوبات حاوی بی کربنات و کربنات سدیم و سود سوزآور است) .

روش اصلاح :

* استفاده از آب مقطر به جای آب نرم.

* به نحو مطلوب از قلیائیت بالای آب کاسته شود.

* ساخت این قسمت از پلاستیک و یا فولاد پوشش داده شده .

مورد ۳.۱.۱۴

صنعت : کشاورزی

جنس نمونه : آلیاژ آلومینیم - روی (۵ تا ۶ درصد روی)

سیستم : شبکه آبیاری گلخانه ای

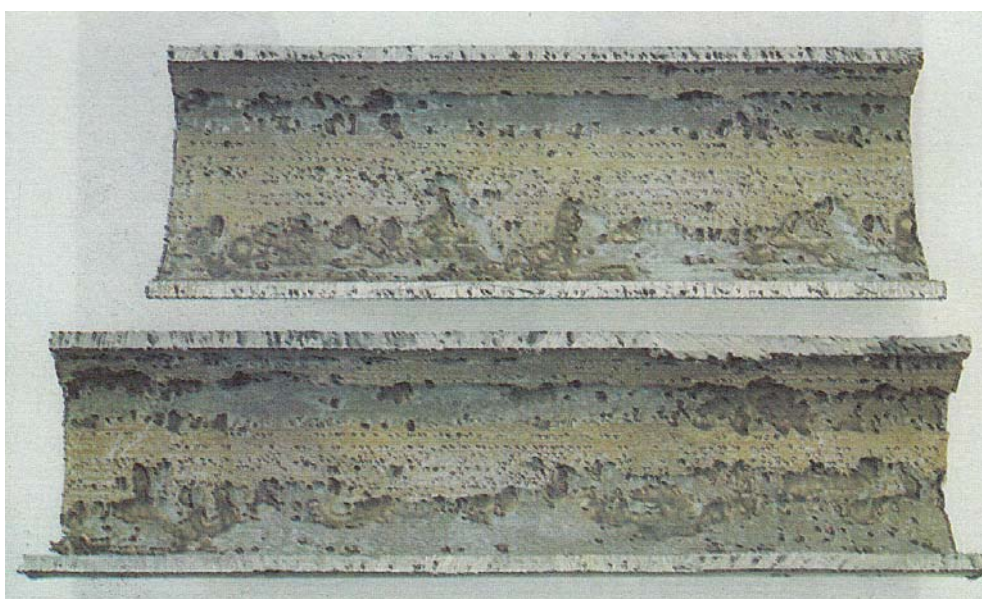
قسمت : لوله پخش کننده آب

پدیده : روی زدایی

مدت کارکرد : ۶ ماه

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت شدید به همراه حفرات عمیق در محل نشست آب .

محیط : آب حاوی کود گیاهی (نظیر نمک های آمونیم ، نیترات و مواد آلی) ، pH در حدود ۷/۵ تا ۸.



علت پدیده : روی زدایی در محل نشست آب.

روش اصلاح : برای چنین محیطی ، این نوع آلومینیم مناسب نبوده ، بلکه بایستی از آلومینیم خالص و یا

آلیاژ (Aluminium/Magnesium/Silicon) نظیر ۶۰۶۳ AA استفاده نمود.

مورد ۳.۱.۱۵

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : آلومینیم و برنز

سیستم : ساختمان

قسمت : لوله و مفصل درب

پدیده : خوردگی گالوانیکی

مدت کارکرد : ۱۰ سال

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت در محل و اتصال لولا

محیط : اتمسفر صنعتی



علت پدیده : ایجاد پیل به دلیل اتصال آلومینیم و مفصل هایی از جنس برنز .

روش اصلاح : بایستی جنس قطعات فوق از یک جنس باشد . هر دو از آلومینیم و یا هر دو از آهن

گالوانیزه از نوع (hot dip galvanized steel).

مورد ۳.۱.۱۶

صنعت : حمل و نقل

جنس نمونه : آلومینیم آنودایز شده (anodized aluminium)

سیستم : واگن راه آهن

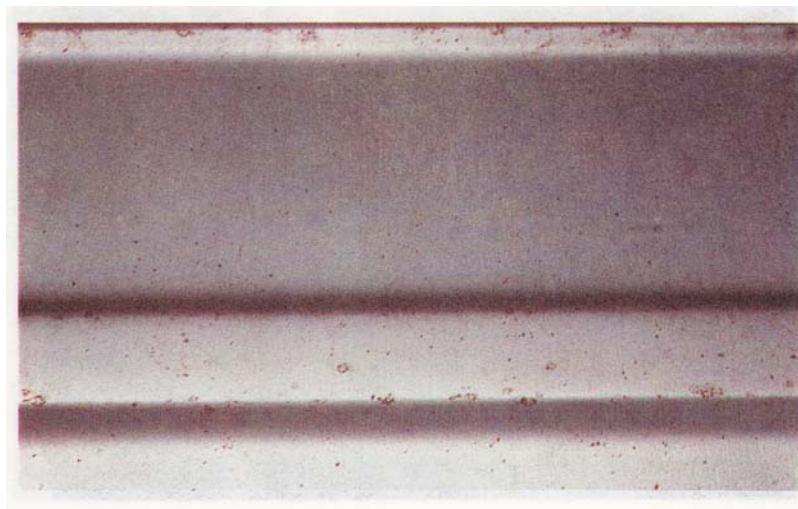
قسمت : دیواره خارجی

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : ۶ تا ۸ ماه

ظاهر نمونه : ایجاد حفرات ریز در روی بدنه (لبه ها)

محیط : اتمسفر



علت پدیده : صدمه دیدن ورقه های آندایز شده در زمان شکل دادن آن ها (بعد از عملیات آندکاری) .

روش اصلاح : ضرورت دارد عملیات آندکاری پس از شکل دادن ورق ها انجام شود .

مورد ۳.۱.۱۷

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : آلومینیم ۹۹٪

سیستم : ساختمان

قسمت : پوشش سقف

پدیده : خوردگی جریان سرگردان

مدت کارکرد : ۲ تا ۳ سال

ظاهر نمونه : سوراخ هایی در محل اتصال سیم آنتن به پوشش سقف مشاهده می شود .

محیط : اتمسفر .



علت پدیده : سقف آلومینیمی مذکور به دلیل وجود جریان های سرگردان ناشی از اتصال ناقص سیم آنتن

دچار خوردگی شده است .

روش اصلاح : اطمینان از برقراری صحیح سیم زمین و تخلیه جریان های سرگردان به زمین .

مورد ۳.۱.۱۸

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : آلومینیم

قسمت: سقف

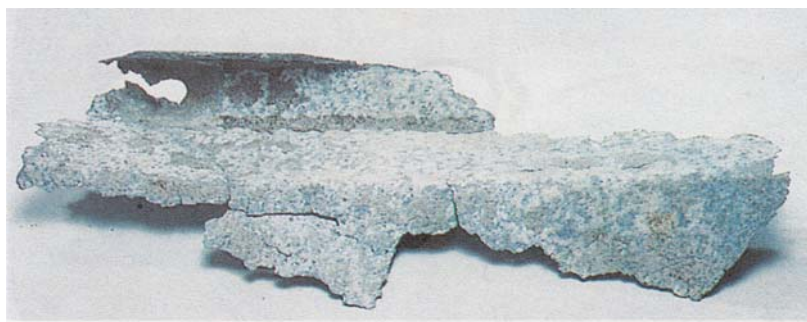
سیستم : ساختمان کارخانه تولید آلومینیم

مدت کارکرد : ۳ سال

پدیده : خوردگی اتمسفری

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت .

محیط : هوای مورد مصرف در کارخانه توسط بخارات شیمیایی آلوده شده است .



علت پدیده : این بخارات در حین فرآیند ساخت آلومینیم ایجاد شده اند (نمک های قلیایی حاوی کلرور) .

بخارات این نمک ها خوردندگی شدیدی بر آلومینیم دارند .

روش اصلاح : سقف مذکور مجدداً با پلی استر حاوی الیاف شیشه مرمت و ساخته شد . بعد از گذشت ۶

سال هیچ گونه مشکلی ایجاد نگردید و تنها عیب این ماده مقاومت کم مکانیکی آن و همچنین تغییرات آن در

مقابل نور خورشید می باشد .

مورد ۳.۱.۱۹

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : آلیاژ آلومینیم - روی (۵ تا ۶ درصد روی)

قسمت : سقف مشبک

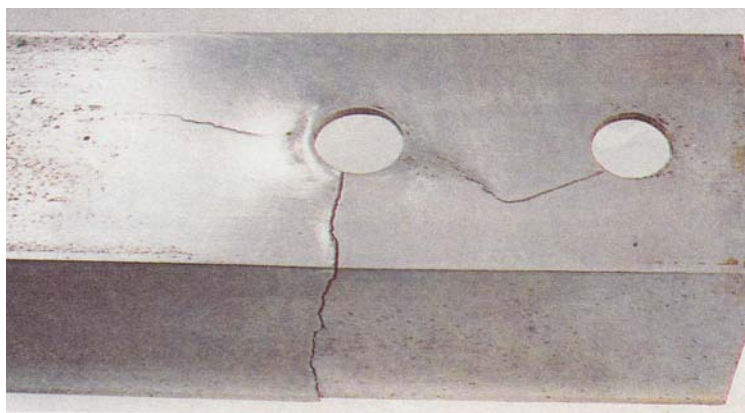
سیستم : سقف یک راهرو کارخانه

مدت کارکرد : ۲ سال

پدیده : خوردگی تنشی (بین دانه ای)

ظاهر نمونه : شکستگی دارد

محیط : هوای درونی ، دارای دما و رطوبت معمولی . بدون حضور آلودگی های شیمیایی .



علت پدیده : ناهماهنگی آلیاژ به دلیل میزان روی بالا .

روش اصلاح : استفاده از آلیاژ همگن بدون روی که مقاومت بیشتری در برابر خوردگی تنشی دارد . به

عنوان مثال آلیاژ $(AlMg_3)$ ۵۰۸۶ (AA) .

مورد ۳.۱.۲۰

صنعت : ساختمانی (تهویه مطبوع)

جنس نمونه : آلومینیم

سیستم : دستگاه تهویه مطبوع

قسمت : کف مخزن

پدیده : به وجود آمدن خوردگی در اثر رسوب نمک

مدت کارکرد : حدود ۴ سال

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت .

محیط : هوایی که رطوبت نسبی آن در سیستم تهویه هوا از ۸۷٪ به ۷۸٪ کاهش می یابد . کف خشک

می باشد هوا از کف عبور نموده . سپس به واحد تهویه بر می گردد .



علت پدیده : هوای مرطوب حاوی قطرات آب می باشد . به دلیل ایجاد رسوبات سفید رنگ $Al(OH)_3$ و

$NaCl$ بر روی سطح کف مخزن ، و حالت قلیایی بودن این نمک ها فلز آلومینیم کف مخزن به وسیله این

نمک ها مورد حمله و خوردگی قرار می گیرد .

روش اصلاح : اگر کف خشک باشد ، خوردگی رخ نخواهد داد . با برداشت رسوب ها از طریق تمیز کاری

با برس و یا شستن با آب مقطر این پدیده به وجود نخواهد آمد .

مورد ۳.۱.۲۱

صنعت : ساختمانی (تهویه مطبوع)

جنس نمونه : آلومینیم

سیستم : دستگاه تهویه مطبوع

قسمت : قسمتی از کانال هوا از جنس آلومینیم

پدیده : خوردگی نمکی (Salt Corrosion)

مدت کارکرد : نامشخص

ظاهر نمونه : حمله حفره‌ای

محیط : آب تبخیر شده .



علت پدیده : هوای مرطوب ایجاد شده توسط دستگاه تهویه مطبوع دارای قطرات آبی می‌باشد که این قطرات در زمان تبخیر در روی کانال ، رسوبات قلیایی تولید نموده و این امر موجب خوردگی کانال هوا که از جنس آلومینیم می باشد، می شود .

روش اصلاح : بدلیل اینکه نمی توان از نشستن قطرات جلوگیری کرد ، یکی از روشهای زیر را می توان جهت کاهش خوردگی به کار برد :

* استفاده از آبی که مقدار نمک آن کم باش (آب مقطر و یا آب نرم) .

* ساخت کانال ها از جنس پلاستیک یا فولاد پوشش داده شده .

مورد ۳.۱.۲۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : آلومینیم (۲,۵ Al Mg ۰,۵۲)

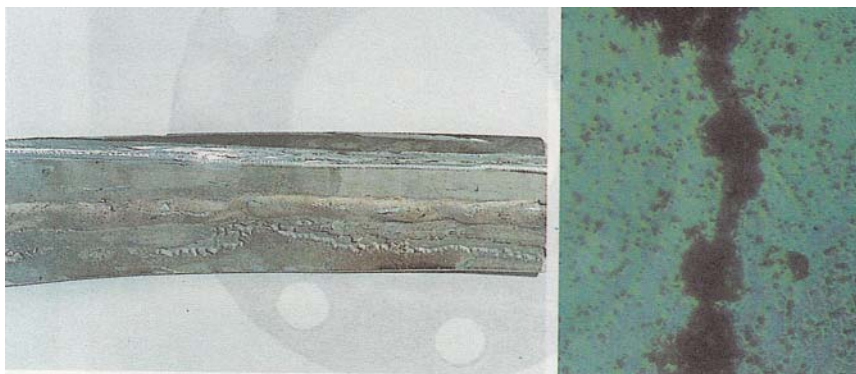
سیستم : شستشو دهنده گاز (gas Scrubber) قسمت : لوله تخلیه هوا

پدیده: زوال جوش مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : خوردگی زیاد اطراف جوش

محیط : هوا که دمای آن 25°C می باشد و رطوبت نسبی آن ۱۰۰٪ است . این هوا شامل مقدار کمی H_2S و

CS_2 و بعضی اوقات NaOH آب کندانس شده ۷/۵ است که بعضی اوقات به ۱۰ می رسد .



علت پدیده : به کار بردن دمای زیاد در زمان جوشکاری و سرد کردن نامناسب جوش باعث این خوردگی

گردیده است . این عامل باعث تغییرات ساختاری فلز و حساس شدن فلز به خوردگی می گردد . در هر دو

طرف جوش (در ۲ سانتی متری آن) سختی ماده به اندازه ۲۵٪ کاهش می یابد .

روش اصلاح : خنک کردن مناسب در حین جوشکاری باعث کاهش این خوردگی و از بین رفتن آن می

شود . ضمناً در این حالت خاص می توان از لوله های مقاوم پلاستیکی استفاده کرد .

مورد ۳.۱.۲۳

صنعت : شیمیایی

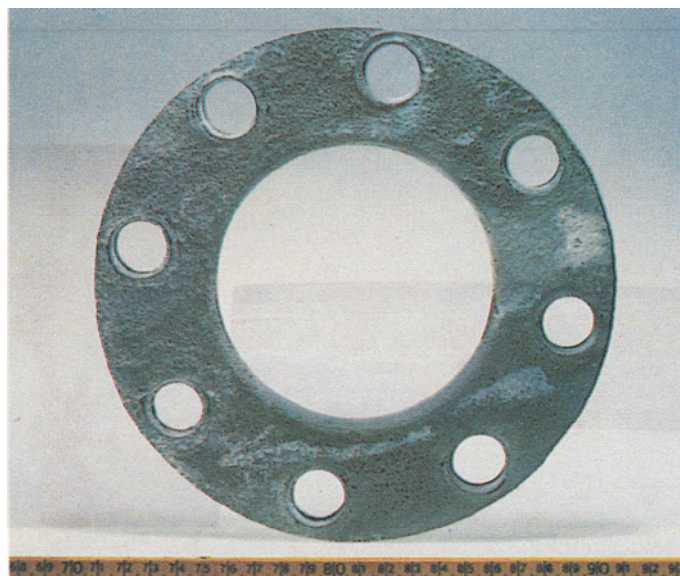
جنس نمونه : آلومینیم

سیستم : خط فولادی برای انتقال سود سوزآور قسمت : فلانچ فشاری

پدیده : حمله سود سوزآور مدت کارکرد : کوتاه

ظاهر نمونه : حمله یکنواختی در روی تمام سطح نمونه صورت گرفته است .

محیط : اتمسفر



علت پدیده : به علت آب بندی نامناسب ، فلانچ فشاری که از جنس آلومینیم است ، در تماس با سود

سوزآور قرار می گیرد و از آنجایی که آلومینیم دارای مقاومت کافی در برابر سود سوزآور نیست ، پدیده

خوردگی رخ می دهد .

روش اصلاح : با به کار بردن فلانچ فشاری از جنس فولاد مشکل بر طرف می شود .

مورد ۳.۱.۲۴

صنعت : دیگ بخار کارخانه

جنس نمونه : آلومینیم

سیستم : دیگ بخار گرم کننده آب

قسمت : پایه (تکیه گاه)

پدیده : خوردگی گالوانیکی (دو فلزی)

مدت کارکرد : ۳ ماه

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای شدیدی در قسمت پایه (تکیه گاه) قابل مشاهده است .

محیط : آب تصفیه نشده .



علت پدیده : پیل هایی بین پوشش فولاد زنگ نزن و پایه آلومینیمی تشکیل می شود ، و در نتیجه خوردگی

گالوانیکی صورت می گیرد .

روش اصلاح : باید پایه مذکور از جنس فولاد زنگ نزن ساخته شود .

مورد ۳۰۱.۲۵

صنعت : مولد برق (نیروگاه برق)

جنس نمونه : آلومینیم (۲/۵ AlMg و ۵۰۵۲)

سیستم : سیستم آب خنک کننده یک بار گذر

قسمت : صفحه مبدل حرارتی

پدیده : خوردگی سولفیدی

مدت کارکرد : حدود یک سال

ظاهر نمونه : حفراتی روی نمونه ظاهر شده است .

محیط : محیط خورنده شامل سولفید و رسوبات اکسید آهن است .

یون سولفید در حدود ۰/۸ ppm و یون آهن (Fe^{+2}) ۳۱ ppm است . دمای دیواره تقریباً $100^{\circ}C$ است ۶/۳

pH = .



علت پدیده : سولفید هیدروژن (H_2S) موجود در آب چاه به آلومینیم حمله می کند .

روش اصلاح : به دلیل آنکه خوردگی آب مذکور بسیار زیاد است ، لذا توصیه می شود در صورت امکان

از سیستم خنک کن بسته که با آب مقطر ، خنک خواهد شد استفاده شود . در این حالت بایستی از یک مبدل

حرارتی که با آب چاه خنک خواهد شد استفاده شود و لذا در این حالت می توان از لوله های فولاد کربنی

استفاده نمود .

مورد ۳.۱.۲۶

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : آلومینیم آندایز شده (AA ۶۰۶۳)

سیستم : ساختمان

قسمت : قسمتی از دیواره خارجی

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : حدود ۵ سال

ظاهر نمونه : حفره دار شدن

محیط : اتمسفر دریایی



علت پدیده : ناهمگونی در آلیاژ و آب بندی نشدن (unsealed) لایه آندایز شده ، همراه با بالا بودن مقدار

کلر در اتمسفر باعث ایجاد این نوع خوردگی می گردد .

روش اصلاح : با خوب انجام دادن فرآیند آندایزینگ و در نهایت آب بندی حفره های به وجود آمده در لایه

آندایزینگ ، خوردگی کاهش می یابد .

مورد ۳.۱.۲۷

صنعت : حمل و نقل

جنس نمونه : آلومینیم آندایز شده

سیستم : واگن راه آهن

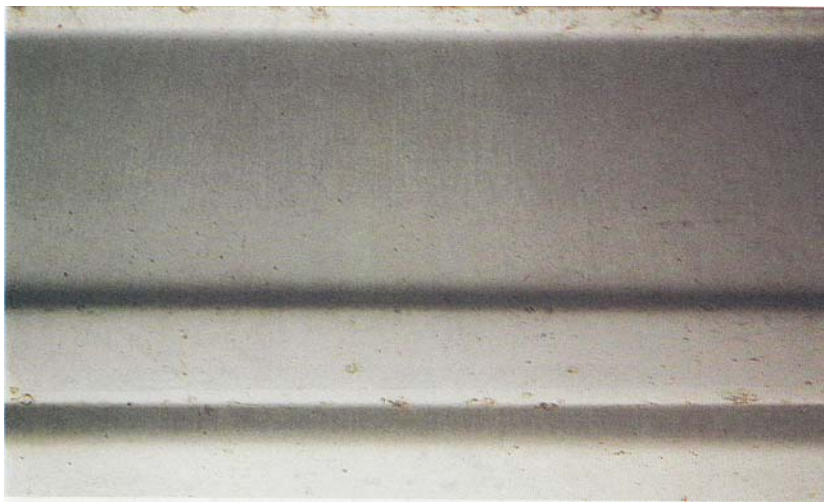
قسمت : دیواره خارجی

پدیده : خوردگی اتمسفری

مدت کارکرد : ۶ تا ۸ ماه

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای لبه های مقاطع.

محیط : اتمسفر.



علت پدیده : آسیب دیدن لایه آندایز شده در حین شکل دادن صفحات آندایز شده باعث به وجود آمدن

خوردگی حفره ای در لبه های مقاطع می گردد .

روش اصلاح : آندایز کردن صفحات بعد از شکل دادن آن . در این صورت لایه آندایز شده به صورت

سالم باقی می ماند و فلز را محافظت می کند .

مورد ۳۰۱.۲۸

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : آلومینیم ۹۹٪

قسمت : صفحه پخش بخار

سیستم: بخار تولیدی که در فرآیند ساخت پلی استایرن مورد استفاده قرار می گیرد .

پدیده : خوردگی قلیایی

مدت کارکرد : نا معلوم

ظاهر نمونه : خوردگی شدیدی در سراسر صفحه مشاهده می شود که سطح خشنی را ایجاد نموده است .

محیط : بخار اشباع با فشار ۱۰ بار که به طور دائم توسط آب بویلر که قلیایی می باشد آلوده می شود.



علت پدیده : به دلیل تغییرات و همچنین تولید بیش از حد بخار و عدم کنترل سطح درام ، آب بویلر که

قلیائیت آن بالا می باشد وارد بخار شده و آن را آلوده می کند. قلیائیت بیش از حد آب بویلر سبب

خوردگی آلومینیم می شود .

روش اصلاح : با تنظیم و کنترل سطح درام و همچنین ممانعت از کف نمودن آب بویلر مشکل مرتفع می

شود. ضمناً توصیه می شود تا صفحه مذکور از آهن نرم ساخته شود.

مورد ۳.۱.۲۹

صنعت : شیمیایی (ساخت فیلم پلی اتیلن)

جنس نمونه : آلیاژ آلومینیم

سیستم : مجرای عبور آب خنک کن

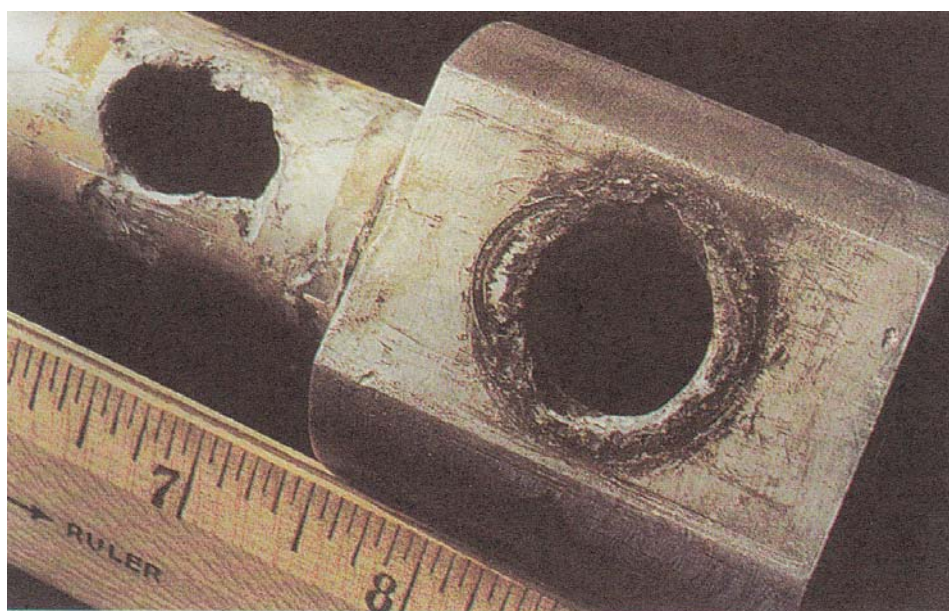
قسمت : لوله ی آندایز شده

پدیده : خوردگی قلیایی

مدت کارکرد : کمتر از یک سال

ظاهر نمونه : سوراخ بزرگ دایره ای شکل در طرف ماشین کاری شده مشاهده می شود .

محیط: آب خنک کن با درجه حرارت °C ۲۱-۳۸ (°F ۷۰-۱۰۰) .



علت پدیده : به دلیل برخورد آب و PH نسبتاً بالای آن (۹/۵-۱۰/۵) ، همچنین شدت اثر اغتشاش آب

حمله ی قلیایی روی آلیاژهای آلومینیم رخ می دهد.

روش اصلاح: برای آلیاژهای آلومینیم PHهای بالا اصلاً مناسب نمی باشد ، لذا بایستی از آلیاژهای دیگر

نظیر فولاد ضد زنگ و غیره استفاده شود.

جنس نمونه : آلیاژ آلومینیم (۱,۵ AA ۷۰۷۵-T۶; AlZnMgCu) که با یک سیستم پوششی ، روکش داده شده است.

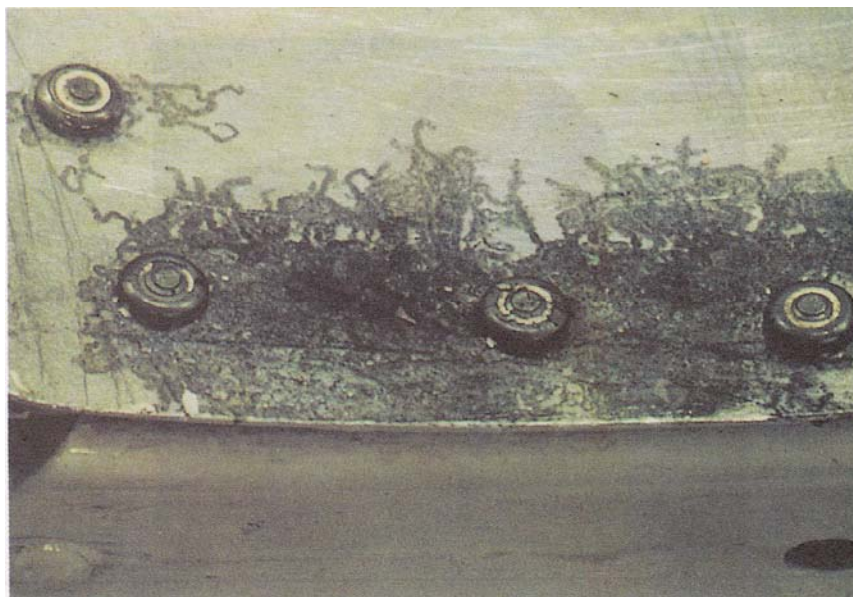
سیستم : هواپیما (جنگنده) قسمت : روکش بدنه چرخها

پدیده : خوردگی رشته ای (filiform Corrosion)

مدت کارکرد: ۵ سال (تعداد پروازها مهم نیست).

ظاهر نمونه : خوردگی رشته مانند به طور نا منظم در زیر پوشش مشاهده می شود.

محیط : اتمسفر .



علت پدیده : عدم پیوستگی سیستم پوششی در قسمت پرچ ها ، سبب می شود که رطوبت به زیر پوشش نفوذ کند و خوردگی رشته ای بوجود آید .

روش اصلاح: باید سیستم پوشش اصلاح شود و همچنین از بازدارنده خوردگی در سوراخ ها استفاده شود. (خوردگی رشته ای به تنهایی تهدید کننده نیست ، بلکه مسأله خطرناکتر این است که حمله به سیستم پوشش سبب می شود که زمینه برای وقوع انواع دیگر خوردگی نیز مهیا شود).

مورد ۳.۲.۱

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : مس

سیستم : کندانسور بخار

قسمت : انتهای لوله

پدیده : خوردگی در اثر اسید کربنیک

مدت کارکرد : حدود ۱/۵ سال

ظاهر نمونه : حمله شدید و نا منظم.

محیط : آب کندانسه اکسیژن دار و خورنده در دمای 90°C ، بویلر توسط آب هوا زدایی شده تغذیه می

گردد (مخلوطی از آب نرم شده و کندانسه).



علت پدیده : مس در برابر اسید کربنیک یا اکسیژن موجود در آب کندانسه برای هر یک به تنهایی دارای

مقاومت خوبی است ، ولی در برابر ترکیب این دو گاز اصلاً مقاوم نیست.

روش اصلاح : در این مورد به دلیل طول کوتاه خط کندانسور، آن را از فولاد زنگ نزن AISI ۳۰۴

بسازید.

(تحت شرایط مختلف ، کاهش قلیائیت آب جبرانی (Make – up water) ترجیح داده می شود .

جنس نمونه : جنس صفحات نگهدارنده فولاد کربنی و جنس لوله ها از مس می باشد .

سیستم : چگالنده (کندانسور) با فشار ۸ بار

قسمت : قسمت فوقانی گرم کننده هوا

پدیده : خوردگی گالوانیک

مدت کارکرد : ۱ تا ۲ سال

ظاهر نمونه: حمله به شکل شیاری شدن در قسمت فوقانی گرم کننده در محلی که لوله ها به آن متصل

شده اند واقع شده است . همچنین لوله ها دچار تغییر شکل گشته اند .

محیط : حاوی آب چگال اکسیژن دار و خورنده (دما حدوداً 100°C).



علت پدیده : خوردگی فولاد ناشی از خوردگی گالوانیکی بر اثر تماس مس/ فولاد در محیط آب خورنده

حاوی اکسیژن می باشد . تغییر شکل انتهای لوله های مسی نیز بر اثر ضربات چکشی آب بوده است.

روش اصلاح :

به کمک یکی از روش های زیر می توان مشکل خوردگی سیستم را بر طرف نمود :

- با ساخت قسمت فوقانی گرم کننده هدر از جنس مس و جلوگیری از امکان خوردگی گالوانیکی

- با افزایش کیفیت آب چگال بوسیله کاهش قلیائیت و هوازداپی مناسب و نیز جلوگیری از کف کردن آب دیگ بخار.

- با آب زدایی کامل از گرم کن های هوا .

- و یا کوتاه کردن لوله های مسی در قسمت فوقانی گرم کننده هوا .

مورد ۳.۲.۳

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : مس

سیستم : لوله های کندانسور

پدیده : خوردگی در اثر تشکیل اسیدکربنیک

مدت کارکرد : ۱۰ سال

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواختی در سطح نمونه ظاهر می شود .

محیط : آب چگال حاوی اکسیژن خورنده است . دما نیز $90-100^{\circ}\text{C}$ است. بخار با فشار پایین توسط

توربین های بخار تولید می شود . آب مورد استفاده ، آب نرم هواگیری نشده است . محیط گرمایش شامل

آب داغ 150°C است.



علت پدیده : مس دارای مقاومت خوردگی کافی در محیط آب چگال حاوی اکسیژن نیست و بنابراین به

سرعت می تواند خورده شود .

روش اصلاح : با هوا زدایی از آب تغذیه این مشکل می تواند بر طرف شود . این روش به دو طریق می

تواند انجام شود . به وسیله بکاربردن مواد جاذب اکسیژن (Oxygen Scavenger) نظیر سولفیت سدیم و

یا هیدرازین و همچنین با استفاده از هواگیرهای (Deaerator) مکانیکی . ضمناً کاهش بی کربنات آب

جبرانی (Make – up water) نیز می تواند در پایین آوردن مقدار دی اکسیدکربن کمک نماید .

مورد ۳.۲.۴

صنعت : مولد برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : مس

سیستم : لوله های کندانسور

پدیده : تغییر شکل (صدمه دیدن توسط قطرات آب) مدت کارکرد : ۷ ماه

ظاهر نمونه : فرورفتگی های عمیقی در سطح نمونه ، در سمت بخار قابل مشاهده است (این دگرگونی و

فرو رفتگی ها همیشه می تواند در سمت بخار به دلیل وجود ذرات آب در بخار به وجود آید) .

محیط : بخار (اطراف لوله ها) .



علت پدیده : به علت وجود آب در بخار .

روش اصلاح : با نصب یک سیستم تخلیه مناسب و یک زانویی بخار بلافاصله بالاتر از رگلاتور تغذیه

بخار در مبدل حرارتی می توان با حذف آب از بخار مشکل را بر طرف نمود.

مورد ۳.۲.۵

صنعت : مولد برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : مس

سیستم : کندانسور بخاری

قسمت : لوله های کندانسور

پدیده : تغییر شکل در اثر ضربات آب

مدت کارکرد : نا معین

ظاهر نمونه : نمونه کاملاً متورم است که در محل نشستی این تورم بیشتر است .

محیط : آب چگال با درجه حرارت $90-100^{\circ}\text{C}$.



علت پدیده : اشتباه در طراحی و سوار کردن قطعات سبب بروز این مشکل می شود . به منظور اتصال

لوله ها به یکدیگر و ایجاد لوله های هم قطر ، به کمک چکش کاری قطر یکی از لوله ها را کم می کنند . تنش

های مکانیکی موجود سبب تسریع در زوال لوله ها می شود.

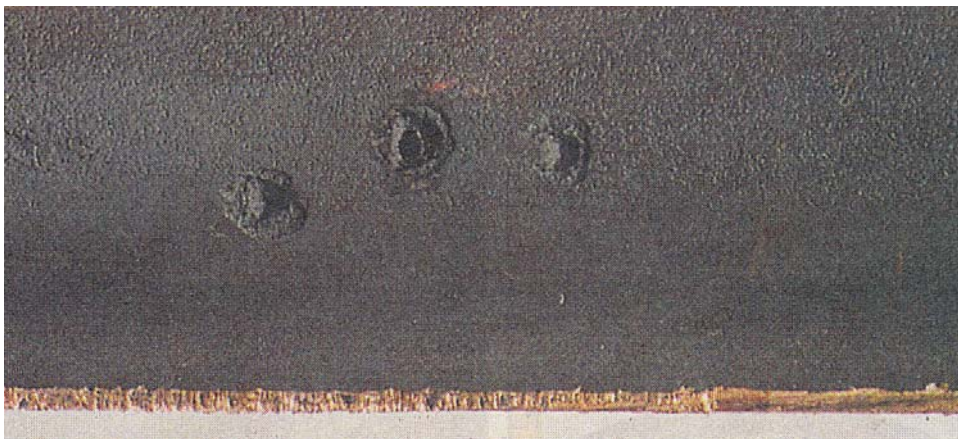
روش اصلاح : مونتاژ نمودن به وسیله اتصالات سرپیچی .

جنس نمونه : مس

سیستم : لوله کشی آب داغ (آب شیر)

پدیده : خوردگی حفره ای توسط آب خورنده مدت کارکرد : ۸ سال

ظاهر نمونه : حفراتی شبیه به جوش و کورک در روی نمونه قابل مشاهده است .

محیط : آب داغ در حال حرکت با دمای 70°C و کیفیت : $\text{PH}=6/8-7/2$ و حاوی بی کربنات (CaCO_3 as $100-150$ ppm) و یون کلرور ($\text{CL}^- = 100-200$ pmm) و یون سولفات ($\text{SO}_4^{2-} = 80$ ppm) .علت پدیده : این نوع آب ایجاد خوردگی حفره ای در مس می نماید (البته در دمای بالاتر از 60°C). این

امر به دلیل بالا بودن مقدار سولفات و کلرور و پایین بودن مقدار بی کربنات (قلیائیت) می باشد .

روش اصلاح : با تمیز کردن شیمیایی سیستم و خارج کردن محصولات خوردگی ، و بهبود کیفیت آب می

توان مشکل را بر طرف نمود .

استفاده از آبی با مقدار کلرید و سولفات کمتر ، می تواند به بهبود کیفیت آب کمک نماید . همچنین آبی با

قلیائیت آبی با قلیائیت بیشتر در این مورد موثر خواهد بود .

مورد ۳.۲.۷

صنعت : مولد برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : برنج

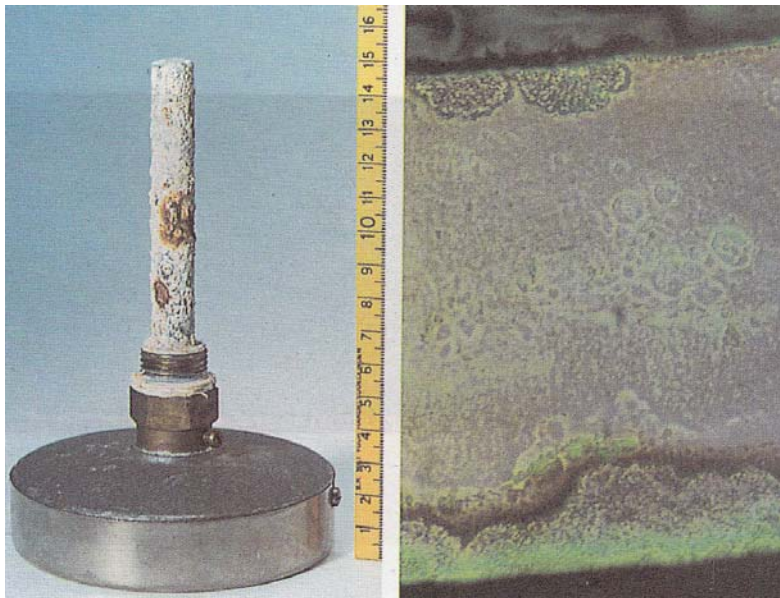
سیستم : لوله های مسی دیگ بخار

پدیده : روی زدایی از نوع موضعی (Plug-type dezincification)

مدت کارکرد : نامعین

ظاهر نمونه : حفرات ریزی در زیر رسوبات سفید بوجود آمده است .

محیط : آب داغ ، با دمای 60°C و سختی بالا .



علت پدیده : روی زدایی برنج در زیر رسوبات رخ داده است . این پدیده به علت اختلاف پتانسیل بین مس

و برنج گسترش می یابد .

روش اصلاح : بابه کار بردن ترمومتر مسی، می توان از این پدیده جلوگیری به عمل آورد .

جنس نمونه : دریچه ی آلومینیمی روی نشیمنگاه برنزی

سیستم : سیستم حرارت مرکزی

قسمت : شیر کنترل

پدیده : خوردگی گالوانیکی

مدت کارکرد: نامعین

ظاهر نمونه : خوردگی عمومی شدیدی در روی نمونه صورت گرفته است .

محیط : آب داغ (با دمای °C ۷۰-۹۰) در سیستم گردش بسته و با $PH = 9$



علت پدیده : به علت اختلاف پتانسیل بین آلومینیم و برنز در حضور اکسیژن پدیده ی خوردگی گالوانیکی

صورت می گیرد . منشأ این اکسیژن از تانک انبساط باز می باشد . علاوه بر این ، آلومینیم در آب قلیایی

مقاوم نیست . (و در PH بیش از ۸ خورده می شود).

روش اصلاح : با جایگزین کردن مخزن انبساط آب بندی شده به جای تانک انبساط باز و همچنین ساختن

دریچه ای از جنس برنز ، می توان از خوردگی گالوانیکی جلوگیری کرد .

مورد ۳.۲.۹

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : مس

سیستم : آب گرم شهری

قسمت : لوله مدفون در خاک

پدیده : خوردگی در زیر عایق حرارتی

مدت کارکرد : ۱۲ سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی شدید که منجر به سوراخ شدن لوله گردیده است .

محیط : عایق فومی پلی اورتان (PUR) تر (لوله در بالای سطح آب زیر زمینی مدفون شده است .)



علت پدیده : لوله مذکور توسط دو عایق فومی و دیگری عایق فلزی که عایق فومی را در بر دارد پوشیده شده است . شکسته شدن اتصالات لحیم شده عایق فلزی سبب تر شدن عایق فومی شده است . با توجه به دمای لوله که 80°C می باشد ، تری کلرواتیل فسفات موجود در فوم در شرایط فوق به اسید فسفریک و اسیدکلریدریک تجزیه می شود که سبب زوال لوله می شود .

روش اصلاح : استفاده از نوعی از PUR که در آن تری کلرواتیل فسفات موجود نباشد و یا به کار بردن یک عایق دیگر .

مورد ۳.۲.۱۰

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : مس

سیستم : آب گرم شهری

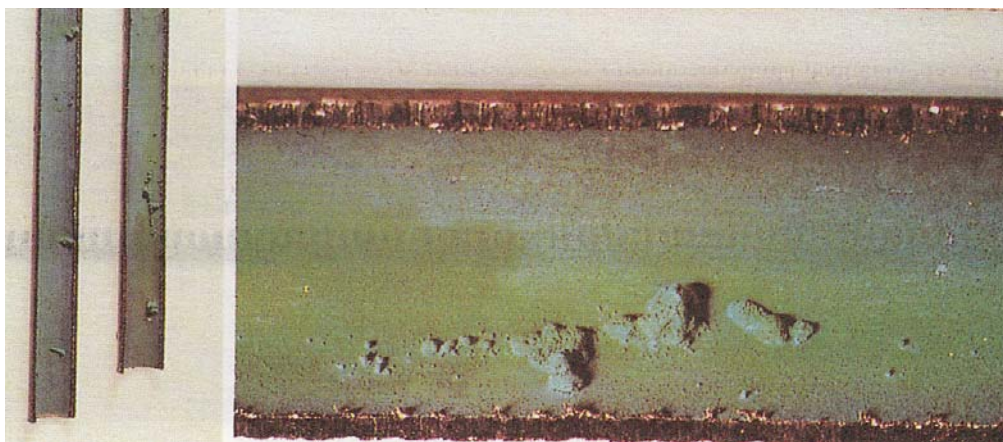
قسمت : لوله ها

پدیده : حفره دار شدن در اثر آب خورنده حاوی مس

مدت کارکرد : ۸ ماه تا ۲ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای در زیر برآمدگی های حاصل از خوردگی که فقط در قسمت بالایی لوله ها دیده می شود .

محیط : آب چاه که اشباع از اکسیژن می باشد . pH این آب ۷/۵ ، Co_2 خورنده ۷ ppm ، سختی کل (برابر با CaCO_3 ppm) قلیابیت متیل اورانژ با (144 ppm CaCO_3) مقدار کلرید ۳۶ ppm ، سولفات ۷۶ ppm و نیتрат $14/2 \text{ ppm}$ می باشد . مواد آلی در این آب وجود ندارد . دمای آن نیز برابر با 20°C می باشد .



علت پدیده : این آب برای این ماده خورنده می باشد مخصوصاً زمانی که مقدار اکسیژن محلول بالا باشد . محصولات خوردگی حاوی نمک های مس و همچنین کربنات کلسیم است .

روش اصلاح :

* بهبود کیفیت شیمیایی آب با تصفیه مقدماتی (افزایش pH و کاهش مقدار اکسیژن آب) .

* استفاده از لوله های پلاستیکی .

مورد ۳.۲.۱۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : برنج دریایی (۷۰ Cu, ۲۹ Zn, ۱ Sn)

سیستم : کندانسور پروپان

قسمت : لوله های کندانسور

پدیده : خوردگی سایشی

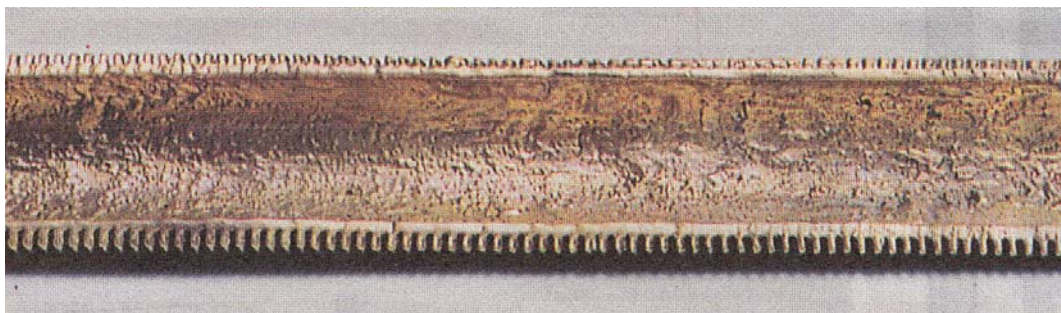
مدت کارکرد : ۸ سال

ظاهر نمونه : آسیب دیدن غیر منظم در سطوح داخلی .

محیط : آب خنک کن لب شور که حاوی فسفات و هیپوکلرید سدیم است ، مقدار NaCl آب برابر با ppm

۲۵۰۰ ، هدایت برابر با ۴۵۰ mS/m ، pH = ۷/۹ ، سختی برابر (۶۵۰ ppm CaCO_۳) سرعت آب خنک

۲ m/s .



علت پدیده : حداکثر سرعت آب برای این نوع برنج ها ۱/۵ m/s می باشد و سرعت ۲ m/s سرعت بالایی

است که موجب خوردگی سایشی می شود .

روش اصلاح : با استفاده از لوله های برنج آلومینیم دار (Cu Zn ۲,۰ Al) ، حداکثر سرعت آب برای این

لوله ها ۲ m/s می باشد . به جای این لوله ها می توان از کوپرونیکل ۳۰ (Cu Ni ۳۰ Fe۲ Mn۲) که می

تواند سرعت بالاتری را تحمل کند (حداکثر ۳/۵ m/s) استفاده کرد .

* به کار بردن فروسولفات به عنوان باز دارنده برای جلوگیری از خوردگی سایشی .

مورد ۳.۲.۱۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : مس

سیستم : واحد تولید اسید چرب

قسمت : صفحه پاشش توزیع کننده اسیدسولفوریک از یک طرف اسید چرب

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : چند سال

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت در سطوح داخلی (ضخامت اولیه : ۳ میلی متر که ضخامت نهایی به کمتر

از ۱ میلی متر رسیده است) .

محیط : اسید سولفوریک ۹۶٪ در دمای °C ۲۰ - ۱۵ (در صفحه پاشش)

دما در ظرف با دمش بخار به °C ۱۰۰ - ۹۰ می رسد .



علت پدیده : در دمای بالا ، مس به وسیله اسید سولفوریک ۹۶٪ آسیب می بیند . در اینجا خوردگی به

دلیل نقش سایشی بخار اسید سولفوریک که بر روی سطح صفحه پاشش می ریزد ، تشدید می شود .

روش اصلاح :

* تعویض منظم یا

* ساختن صفحه پاشش از پلیونیلیدین فلورید (PVDF) .

مورد ۳.۲.۱۳

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : برنز (۸۰ Cu, ۱۸,۵ Sn, ۱,۵ Zn)

سیستم : دستگاه اطفاء حریق

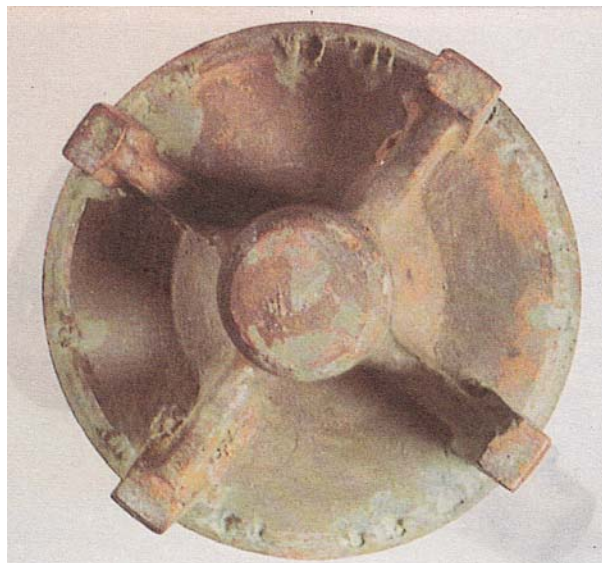
قسمت : شیر ورودی

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : ۲ تا ۳ هفته

ظاهر نمونه : لبه های آب بندی شیر خورده شده است .

محیط : آب دریا با درجه حرارت 25°C .



علت پدیده : شیر ورودی در یک سیستمی با فشار ۸ اتمسفر آب بندی شده است . آب بندی خوب این شیر

به علت تماس مستقیم برنز با برنز می باشد . این عامل و همچنین خوردگی آب دریا سبب خوردگی

سایشی در لبه ها شده است .

روش اصلاح : گذاشتن یک قطعه پلاستیکی (تفلون) به منظور آب بندی بهتر و جلوگیری از بوجود آمدن

خوردگی سایشی .

مورد ۳.۲.۱۴

صنعت : برق

جنس نمونه : برنج

سیستم : خنک کن دستگاه ترانسفور ماتور ۲۵۰ کیلوولت

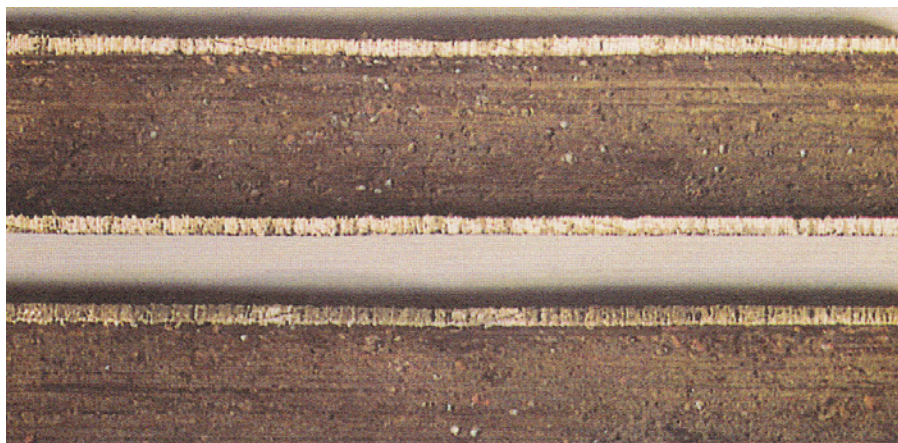
قسمت : لوله سرد کننده

پدیده : روی زدایی موضعی

مدت کارکرد : ۶ ماه

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی ، به همراه لکه های قرمز مس .

محیط : آب شور راکد .



علت پدیده : پدیده روی زدایی به علت میزان نمک بالای آب خنک کن و عدم حضور اکسیژن (هوادهی) و

ساکن بودن آب اتفاق می افتد .

روش اصلاح :

* هنگامی که دستگاه از مدار خارج می باشد ، بایستی آب آن تخلیه و با آب تمیز شستشو شود و سپس

بصورت خشک نگهداری شود .

* و یا تمهیداتی به کار گرفته شود تا آب به گردش درآید تا به نحو مطلوب هوادهی شود .

مورد ۳.۲.۱۵

صنعت : تأسیساتی (تهویه مطبوع)

جنس نمونه : مس

قسمت : لوله خروج آب

سیستم : پمپ خلاء

مدت کارکرد : ۳ سال

پدیده : خوردگی آمونیاک

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت خارجی ، به همراه محصولات خوردگی آبی رنگ .

محیط : هوای مرطوب .



علت پدیده : به دلیل نشت آمونیاک و متراکم شدن آن بر روی لوله مسی ، لوله مذکور توسط آمونیاک

مورد حمله قرار گرفته است (رنگ آبی به علت تشکیل کمپلکس مس / آمونیاک می باشد) .

روش اصلاح: پوشش دادن لوله ها و یا بکار بردن لوله های پلاستیکی .

مورد ۳.۲.۱۶

صنعت : گاز رسانی

جنس نمونه: مس

سیستم : سیستم گاز رسانی

قسمت : لوله زیر زمینی

پدیده : خوردگی گالوانیکی

مدت کارکرد : ۱۶ سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی (تغییر شکل مکانیکی در اثر بیرو کشیدن) .

محیط : خاک با مقاومت پایین ($10 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$) : رطوبت خاک بسیار بالا می باشد .



علت پدیده : اتصال گالوانیکی بین اکسید آهن ایجاد شده در بتن آرمه (آهن موجود در بتن زنگ زده است) با لوله مسی ، سبب خوردگی گالوانیکی مس می شود . در این حالت اکسید آهن نسبت به مس نجیب تر است .

روش اصلاح : از لوله های مسی محافظت نشده نبایستی در داخل خاک استفاده نمود. بایستی این لوله ها با پوشش مناسب نظیر پوشش های نواری پلی اتیلن پوشیده شوند .

مورد ۳.۲.۱۷

صنعت : غذایی

جنس نمونه : مس

سیستم : سیستم چگالش (۱۵ بار)

قسمت : قسمت خم لوله های آب گرم

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : ۱/۵ تا ۲ سال

ظاهر نمونه : خوردگی سایشی

محیط : مخلوط بخار و آب مقطر حاوی CO_2 بالا (۱۳۰ ppm) .



علت پدیده : به دلیل بالا بودن دی اکسید کربن ، آب و بخار مذکور خورنده می باشد ضمن آنکه سرعت بخار در زانویی بالا بوده و ایجاد اغتشاش و تلاطم می نماید .

روش اصلاح :

- * اقتصادی ترین روش ، ساخت لوله های مذکور از جنس فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶) می باشد .
- * چنانچه طراحی سیستم بهبود یابد (با کاهش سرعت آب و یا ساخت دستگاه با لوله های مستقیم نه با لوله های خم شده) مشکل رفع می شود . ضمناً تقلیل بی کربنات آب نیز بسیار مفید است (در این مورد خاص نمی توان از بازدارنده های شیمیایی استفاده نمود ، زیرا بخار برای مصارف غذایی استفاده می شود) .

مورد ۳.۲.۱۸

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : مس

سیستم : آب خنک کن یک بار گذر

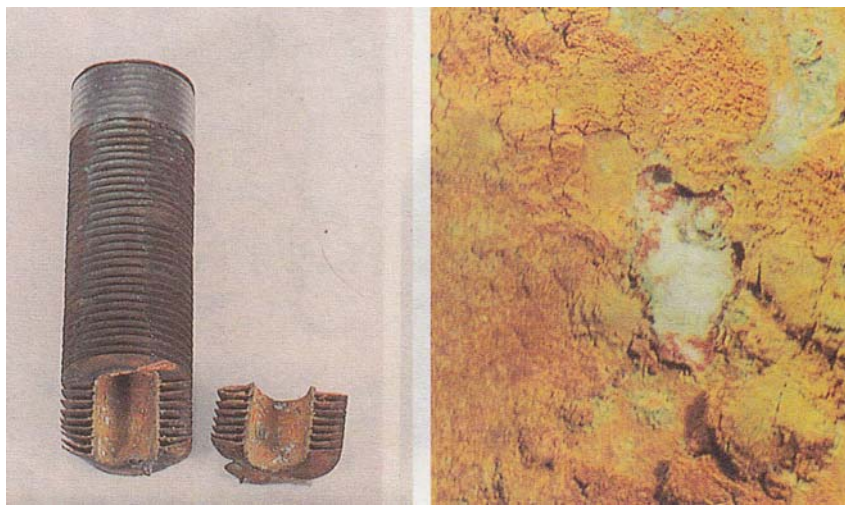
قسمت : لوله خنک کننده روغن

پدیده : خوردگی زیر رسوبی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای .

محیط : آب نرم حاوی اکسیژن (این نوع آب بر لوله مسی خاصیت خوردندگی ندارد).



علت پدیده : این آب قبل از رسیدن به خنک کن مذکور ، از لوله های فولادی عبور می نماید . به دلیل خورنده بودن آب مذکور برای لوله های فولادی ، لوله های مذکور خورده می شود. انتقال محصولات خوردگی حاصله از لوله های فولادی و راسب شدن آنها بر روی لوله های مسی سبب می شود تا در زیر رسوبات ، لوله های مسی خورده شوند (ایجاد پیل غلظتی) .

روش اصلاح : استفاده از لوله های پلاستیکی به جای لوله های فولادی ، سبب می شود تا لوله های مسی دچار تخریب و زوال نشوند .

مورد ۳.۲.۱۹

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : مس

قسمت : مقطع لوله

سیستم : آب خنک کن یک بار گذر کمپرسور

مدت کارکرد: یک سال

پدیده : ایجاد خوردگی به وسیله لحیم

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی در محل اتصالات لحیم

محیط : آب چاه حاوی اکسیژن .



علت پدیده : با توجه به شکل کمانی موضع خوردگی و محل آن (نزدیک اتصالات لحیم) ، محتمل ترین

علت را می توان مربوط به استفاده از لحیم اضافی یا نوع لحیم نامرغوب نسبت داد .

روش اصلاح :

* جایگزینی لوله های مسی آب خنک کن با لوله های پلاستیکی که در واقع ارزانترین راه حل برای مشکل

فوق می باشد .

* لوله های مسی باید به وسیله لحیم غیر خورنده لحیم کاری شوند .

مورد ۳.۲.۲۰

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : مس فسفوری دی اکسید شده (PHosphorous de-oxidized copper)

سیستم : دستگاه تقطیر الکل

قسمت : قسمتی از لوله گرم کننده

پدیده : خوردگی حبابی (کاویتاسیون)

مدت کارکرد : ۲ هفته

ظاهر نمونه : تمام طول لوله در قسمت بالایی ، به عرض ۳ - ۱/۵ سانتی متر دچار سایش شده است و در

بعضی مناطق لوله سوراخ شده است .

محیط : داخلی : بخار ؛ خارجی محصولات آلی که حاوی الکل می باشد ، دما °C ۶۰ .



علت پدیده : در اثر به تأخیر افتادن نقطه جوش ، پوسته اکسیدی سطح آسیب دیده است . خوردگی زمانی

رخ داده است که این محفظه به طور شیمیایی شسته شده است . بدون این مرحله ، محفظه تا یک سال

بدون مشکل کار کرده است . خوردگی زمانی رخ داده که عمل شستشو انجام شده است .

روش اصلاح :

* عوض کردن لوله .

* اضافه کردن یک ماده خنثی به منظور جلوگیری از به تأخیر افتادن نقطه جوش .

مورد ۳.۲.۲۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : برنز

سیستم : پمپ اسید شویی

قسمت : پروانه پمپ

پدیده : خوردگی اسیدی

مدت کارکرد : چند ساعت

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت شدید ، پروانه به طور وسیعی دچار خوردگی شده است .

محیط : اسید سولفوریک ۱٪ ، دمای ۳۰ °C .



علت پدیده : برنز در مقابل اسید سولفوریک مقاومت ندارد . قبلاً از مواد شیمیایی دیگری برای این اسید

شویی استفاده می شد و هنگامی که استفاده از اسید سولفوریک شروع شد ، در مدت کوتاهی پروانه پمپ

خورده شد .

روش اصلاح : استفاده از پروانه های ساخته شده از فولاد زنگ نزن ، AISI ۳۱۶ L .

مورد ۳.۲.۲۲

صنعت : ساختمانی (مسکونی)

جنس نمونه : برنج

سیستم : سیستم روشنایی منازل واقع در کنار کانال آب (در هلند)

قسمت : کاسه زینتی لوستر

پدیده : خوردگی تنش‌ی ترک خوردگی فصلی (Season cracking)

مدت کارکرد : چند دهه

ظاهر نمونه : ترک خوردگی

محیط : اتمسفر حاوی آمونیاک ، منبع تولید آمونیاک ، تجزیه گیاهان داخل کانال آب .



علت پدیده : آمونیاک موجود در هوا سبب خوردگی تنش‌ی در برنج شده است .

روش اصلاح : آلیاژهای مسی برای این محیط ها مناسب نمی باشند .

مورد ۳.۲.۲۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : برنج

سیستم : مخزن ذخیره

قسمت : اتصالات پیچ و مهره

پدیده : روی زدایی (خوردگی گالوانیکی)

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : تغییر رنگ پیچ

محیط : اتمسفر صنعتی .



علت پدیده : روی زدایی در پیچ برنجی پدید آمده است . علت این امر اتصال گالوانیکی پیچ از جنس برنج

و مهره از جنس فولاد زنگ نزده می باشد .

روش اصلاح : بایستی پیچ و مهره هر دو از جنس فولاد زنگ نزن باشند .

مورد ۳.۲.۲۴

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : مس

سیستم : سیستم آب گرم خانگی

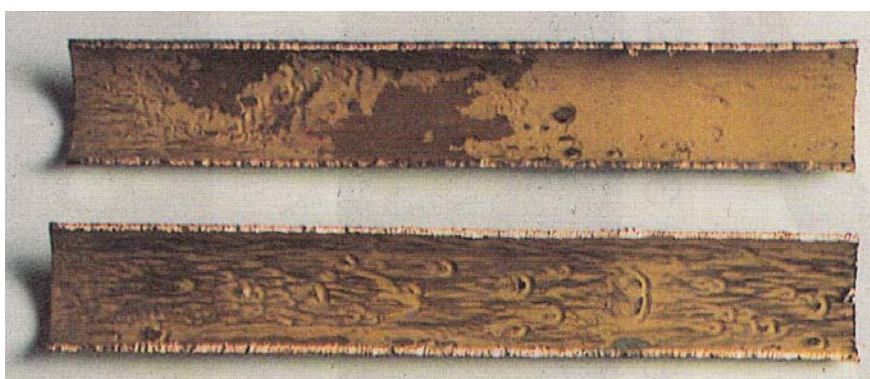
قسمت : مقطع لوله

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : شیار دار شدن سطح لوله با شکلی خواص .

محیط : آب گرم خانگی ، درجه حرارت 80°C ، سرعت جریان آب 6 m/s .



علت پدیده : خوردگی سایشی که به علت سرعت بیش از حد آب می باشد .

روش اصلاح :

* جایگزین نمودن لوله فرسوده با لوله ای قطر آن بیشتر است ، به منظور کاهش سرعت آب تا حد m/s

0.8 و یا تمهیدات دیگر به منظور کاهش سرعت آب و یا

* استفاده از فولاد زنگ نزن .

مورد ۳.۲.۲۵

صنعت : آب و فاضلاب

جنس نمونه : برنج آلومینیم دار (حاوی آرسنیک)

سیستم : سیستم توزیع آب آشامیدنی

قسمت : لوله

پدیده : خوردگی زیر رسوبی

مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای .

محیط : آب شهری ، ترکیب شیمیایی نا مشخص ، دما: $20^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$. سرعت آب 15 Cm/Sec .



علت پدیده : به علت سرعت کم آب در داخل لوله ، ذرات نا محلول ، داخل لوله را سبب شده و وجود

رسوبات ناخواسته سبب تشکیل پیل خوردگی (پیل های اختلاف دمشی) شده است .

روش اصلاح : لوله بایستی تعویض شده و سرعت آب به 1 m/Sec افزایش یابد .

مورد ۳.۲.۲۶

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : برنج آلومینیم دار ($\text{Cu}_2 \text{AlMn}$)

سیستم : کندانسور (توربین)

قسمت : پیچ

پدیده : خوردگی تنشی درون دانه ای

مدت کارکرد : ۳/۵ سال

ظاهر نمونه: پیچ ترد و شکسته شده

محیط : بخار کندانسه شده حاوی آمونیاک .



علت پدیده : آلیاژهای مسی در محیط های آمونیاکی دچار شکست ناشی از خوردگی تنشی می شوند)

ترک های فصلی) .

روش اصلاح : ساخت پیچ از موادی که حساس به حمله آمونیاکی نباشد ، به عنوان مثال فولاد زنگ نزن .

جنس نمونه : برنج آلومینیم دار (ASTM B III , CDA ۶۸۷ UNSC ۶۸۷۰۰)

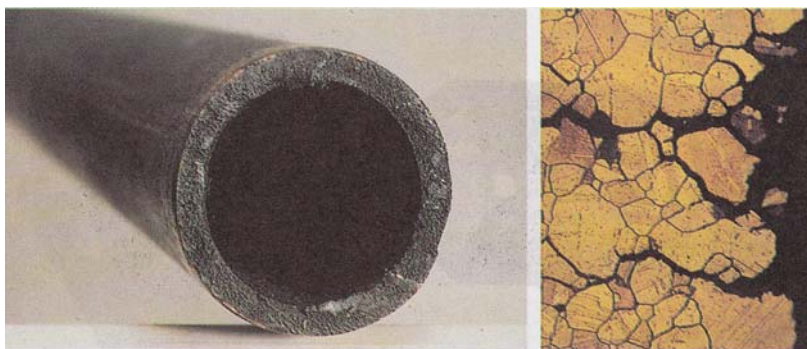
سیستم : سیستم آب خنک کن یک بار گذر قسمت : لوله های خنک کن نفت کوره

پدیده : خوردگی تنش (بین دانه ای) مدت کارکرد : ۲۰ سال

ظاهر نمونه : ترک خوردن ، همراه با شکسته شدن در عکس سمت چپ و خوردگی بین دانه ای در عکس سمت راست .

محیط : داخل لوله ، آب لب شور با مشخصات : $\text{Cond} = 663 \text{ mS/m}$, $\text{PH} = 7/8$. سختی کل برابر

(CaCO_3 ppm ۶۵۰) مقدار کلرید ppm ۱۴۶۰ ، سولفات ppm ۲۳۳ و مقدار آمونیم برابر با ppm ۰/۱ .



علت پدیده : برنج آلومینیم دار شامل ۰/۰۶۴٪ فسفر همراه با مقدار ۰/۰۱۸٪ آرسنیک می باشد . این عناصر باعث می گردند که برنج آلومینیم دار در آب دریای شور به خوردگی بین دانه ای حساس باشد و منجر به خوردگی تنش شود .

روش اصلاح : استفاده از لوله های مبدل حرارت کوپرونیل ۳۰ (UNS C۷۱۵۰۰ و W . Nr ۲/۰۸۸۲

Fe Ni۳۰ Cu) که متوسط ترکیب شیمیایی آن برابر با $\text{Cu} : 69/5$, $\text{Ni} : 30$ و $\text{Fe} : 0/5$. این ماده نسبت

به هر دو نوع خوردگی تنش و بین دانه ای مقاومت خوبی دارد .

مورد ۳.۲.۲۸

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : مس

سیستم : سیستم آب گرم خانگی

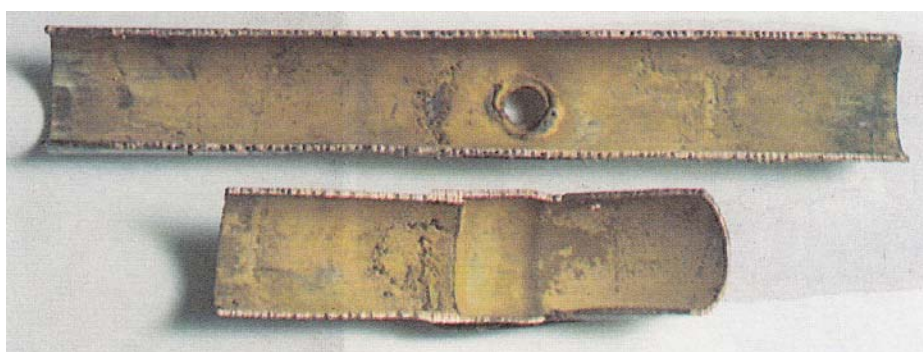
قسمت : لوله

پدیده : خوردگی فرسایشی

مدت کارمرد : ۱۰ سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی

محیط : آب گرم با درجه حرارت °C ۶۵ .



علت پدیده : سرعت زیاد آب در لوله مخصوصاً در محل اتصالات .

روش اصلاح: تقلیل سرعت آب به کمتر از ۰/۸ متر بر ثانیه .

مورد ۳.۲.۲۹

صنعت : برق (نیروگاه بخاری)

جنس نمونه : برنج

سیستم : سیستم آب خنک کن گردش

قسمت : لوله

پدیده : روی زدایی موضعی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای .

محیط : آب خنک کن که از هیپو کلرید سدیم برای کنترل رشد میکروبی استفاده می کند .



علت پدیده : بالا رفتن بیش از حد pH آب خنک کن (بیش از ۹) و همچنین گاز کلر سبب زوال لوله شده است .

روش اصلاح : بهبود در نحوه تزریق ماده هیپوکلرید سدیم با اندازه گیری منظم و یا استفاده از باکتری کش های آلی .

مورد ۳۰۲۰۳

صنعت : پتروشیمی

جنس نمونه : برنج (α and β brass $Zn > 37\%$)

سیستم : میله های برنجی نگهداری شده در انبار

پدیده : خوردگی تنش (شکست فصلی) مدت کارکرد : ۶ ماه

ظاهر نمونه : شکست در میله ها

محیط: هوای مرطوب در انبار با گاز آمونیاک آلوده شده است . منبع ایجاد این آمونیاک کودهای شیمیایی

موجود در انبار بوده است



علت پدیده : وجود آمونیاک و همچنین تنش های داخلی در میله های برنجی سبزوآل میله ها شده

است . نوع این زوال بصورت تنش (شکافی) می باشد .

روش اصلاح : این نوع برنج به آمونیاک حساس می باشد . ضمن آنکه آنیل نمودن این نوع برنج از

حساسیت آن می کاهد .

مورد ۳.۲.۳۱

صنعت : کابل سازی

جنس نمونه : مس

سیستم : واحد تولید کابل برق

قسمت : کابل

پدیده : خوردگی زیر عایق (Underneath the insulation) مدت کارکرد : ۱۵ سال

ظاهر نمونه : ذوب موضعی غلاف مسی .

محیط : آب باران



علت پدیده : آب باران به درون پوشش نفوذ کرده و غلاف مسی را مورد حمله قرار می دهد ، و به دلیل

ایجاد اتصال برقی ، سبب ذوب مس می شود .

روش اصلاح : استفاده از پوششی که در مقابل آب مقاوم باشد .

مورد ۳.۲.۳۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : برنج آلومینیم دار (Al-brass)

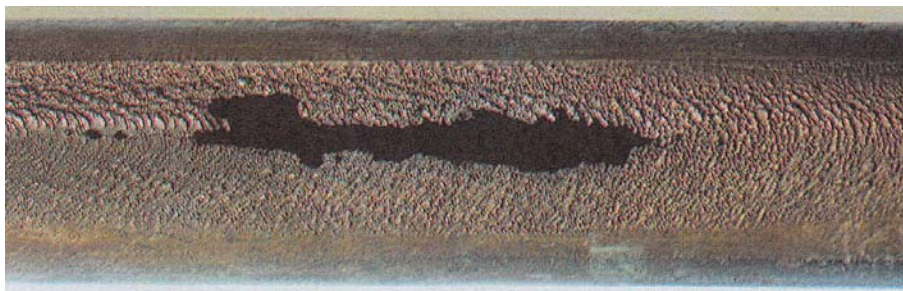
سیستم : دستگاه سرد کننده

قسمت : لوله

پدیده : خوردگی سایشی (خوردگی برخوردی یا تصادفی) مدت کارکرد : ۶ سال

ظاهر نمونه : خوردگی شدید

محیط : بخارات هیدروکربنی که با آمونیاک و سیانید آلوده شده است .



علت پدیده : سرعت بالای بخارات خورنده .

روش اصلاح : بهبود در طراحی (استفاده از صفحات به منظور کاهش سرعت سیال) .

مورد ۳.۲.۳۳

صنعت : تجهیزات دریایی

جنس نمونه : پوشش محافظ : برنج ، پیچ نگهدارنده ؛ نیمونیک A ۸۰ (آلیاژ کرم - نیکل)

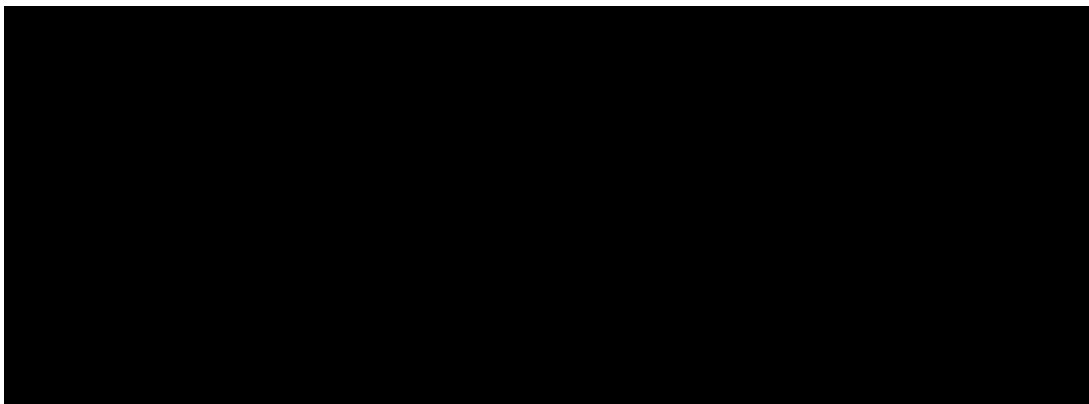
سیستم : جعبه محافظ دستگاه فرستنده و گیرنده که در یک منطقه دریایی واقع شده است .

پدیده : خوردگی گالوانیکی

مدت کارکرد : حدود یک سال

ظاهر نمونه : فرسایش موضعی بدنه جعبه

محیط : محیط دریایی با دمای °C ۲۰ - ۴ .



علت پدیده : اختلاف پتانسیل بین پیچ نیمونیک (Nimonic) و بدنه برنجی جعبه سبب ایجاد خوردگی

گالوانیکی شده که در این حالت به دلیل پایین بودن پتانسیل برنج ، این فلز خورده می شود .

روش اصلاح : استفاده از جعبه محافظ از جنس آلومینیم - برنز بجای نمونه برنجی .

مورد ۳.۲.۳۴

صنعت : آب و فاضلاب

جنس نمونه : مس

سیستم : سیستم آب آشامیدنی

قسمت : لوله

پدیده : حمله آمونیاکی

مدت کارکرد : نامعین

ظاهر نمونه : لکه هایی به رنگ سبز - آبی که ناشی از خوردگی غیر عادی می باشد ، در روی نمونه قابل مشاهده است .

محیط : اتمسفر در محیط روستایی (در نزدیکی محل نگهداری دام) .



علت پدیده : آمونیاک از کود حیوانات اهلی حاصل می شود و مس را مورد حمله قرار می دهد .

روش اصلاح : با به کار بردن لوله پلاستیکی ، می توان از خوردگی لوله ها جلوگیری کرد . در واقع با در

نظر گرفتن شرایط محیطی ، باید انتخاب مواد بهتری صورت پذیرد .

مورد ۳.۲.۳۵

صنعت: آب و فاضلاب

جنس نمونه: برنج

سیستم: سیستم آب آشامیدنی

قسمت: لوله شیر آب

پدیده: روی زدایی از نوع موضعی (plug – type dezincification)

مدت کارکرد: ۳ سال

ظاهر نمونه: حمله حفره ای موضعی در سطح نمونه رخ داده است.

محیط: شامل آب آشامیدنی است. آب در حال جریان و یا ساکن است، دمای محیط متغیر است.

$pH = 7/7$ و هدایت آب 62 mS/m است. یون کلر با غلظت 61 ppm در محیط موجود است.



علت پدیده: این حمله بیشتر در نزدیک نقاط لحیم شده متمرکز است و علت آن بکار بردن یک لحیم نا

مرغوب و زنگ زده است.

روش اصلاح: با به کار بردن یک لحیم مناسب تر، مشکل بر طرف می شود.

مورد ۳.۲.۳۶

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : برنج

قسمت : لوله

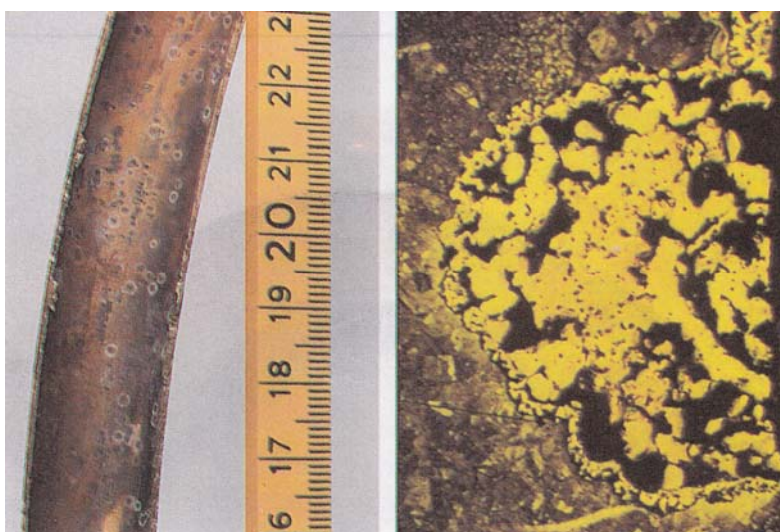
سیستم : آب خام

مدت کارکرد : تقریباً یک سال

پدیده : روی زدایی موضعی

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای

محیط : آب خام حاوی مقدار کمی بی کربنات (CaCO_3 ppm ۲۰)



علت پدیده : به دلیل کم بودن مقدار قلیائیت آب ، آب مذکور برای نمونه برنجی خورنده می باشد که شرایط فوق سبب پدیده روی زدایی برنج شده ، ضمن آنکه شرایط فوق سبب خوردگی حفره ای نیز می شود .

روش اصلاح : افزایش قلیائیت (و همچنین سختی آب) به نحوی که مقدار بی کربنات آن حداقل بایستی به $(\text{CaCO}_3 \text{ Ppm } ۷۵)$ افزایش یابد . لازم به ذکر است که آب غیر خورنده بایستی حاوی حداقل $\text{ppm } ۱۰۰$ قلیائیت (که می تواند OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} باشد) و همچنین حداقل $\text{ppm } ۵۰$ یون کلسیم باشد . البته مقادیر زیاد سبب افزایش رسوب دهی می شود که مطلوب نیست .

مورد ۳۰۲۰۳۷

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : مس

سیستم : لوله انتقال آب

قسمت : مقطع زانویی

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : داخل لوله به طور شدیدی خورده شده است .

محیط : آب سرد چاه با کیفیت : سختی کربناتی (CaCO_3 ppm ۵۰) ، CO_2 = ۶ ppm ، $\text{pH} = 7/3$ و

هدایت 16 mS/m .



علت پدیده : وجود حباب های زیاد هوا در داخل آب که اصطلاحاً به اینگونه آب ها ، آب سفید (White)

اطلاق می شود و همچنین سرعت زیاد آب سبب آسیب دیدگی سایشی شده است .

روش اصلاح : با تقلیل سرعت و همچنین حذف مقدار اکسیژن آب به طریق مکانیکی ، می توان مشکل

مذکور را مرتفع نمود . ضمناً نصب یک تانک آب ذخیره در پایین دست جریان آب می تواند به خارج شدن

اکسیژن آب کمک نماید .

مورد ۳۰۲۰۳۸

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : مس

سیستم : آب آشامیدنی سرد

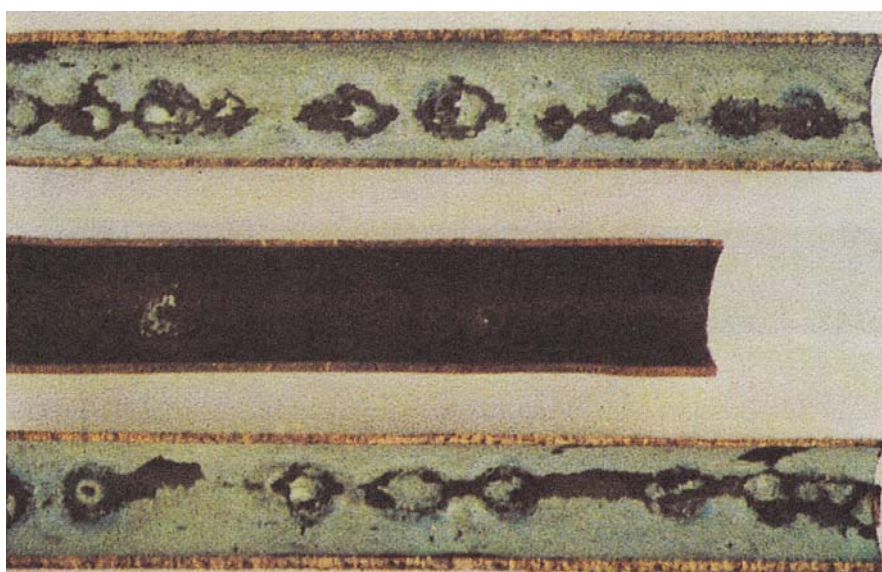
قسمت : لوله ها

پدیده : خوردگی رسوبی

مدت کارکرد : ۹ ماه

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای

محیط : آب چاه حاوی یون های مهاجم (Aggressive).



علت پدیده : در ابتدا سیستم از فولاد گالوانیزه شده ، ساخته شده بود و بعد از ۲ سال به دلیل خوردگی با لوله ها مسی جایگزین شد . به دلیل اکسید آهن ایجاد شده از لوله های آهنی ، مس دچار خوردگی حفره ای گردید . در زیر رسوب اکسید آهن ، مس به صورت آندی دچار خوردگی گردید و منجر به سوراخ شدن آن شد (خوردگی لوله های آهنی شبکه آب شهری ، سبب ایجاد رسوبات اکسید آهن می شود) .

روش اصلاح :

* گذاشتن فیلتر در مسیر آب به نحوی که ذرات بالاتر از ۰/۰۱ میلی متر نتواند وارد سیستم شود .

* جلوگیری از خوردگی لوله های فولادی با کاهش خوردگی آب (افزایش قلیائیت آب و یا تصفیه آن) .

مورد ۳.۲.۳۹

صنعت : برق (نیروگاه بخار)

جنس نمونه : مس

سیستم : سیستم آب داغ مرکزی (تهویه مطبوع)

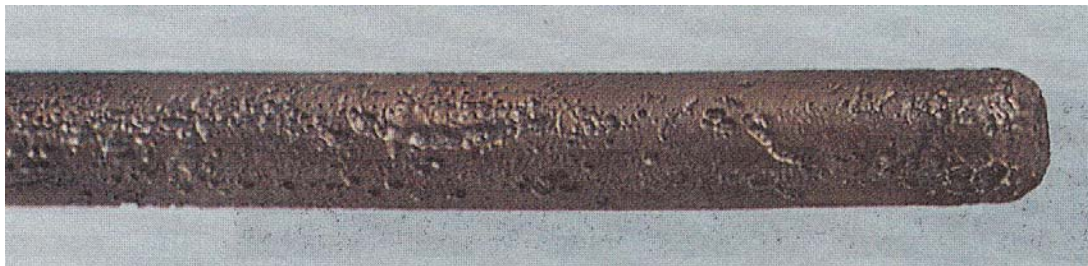
قسمت : دما سنج مخزنی (Thermometer bulb)

پدیده : خوردگی آمونیاکی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای

محیط : آب نرم داغ ($70 - 90^{\circ}\text{C}$) که به منظور جذب اکسیژن ، به آن هیدرازین اضافه شده است .



علت پدیده : وجود آمونیاک در آب (به علت تجزیه هیدرازین) در حضور مقدار کمی اکسیژن موجب این

خوردگی می گردد .

روش اصلاح :

* پایین نگهداشتن مقدار آمونیاک سیستم با استفاده از هیدرازینی که مقدار آمونیاک آن پایین می باشد.

* به نحو مطلوب با روش مکانیکی میزان اکسیژن کاهش یابد (استفاده از دستگاه هوازدا) .

مورد ۳.۲.۴۰

صنعت : مواد شیمیایی

جنس نمونه : مس برنز

قسمت : پروانه

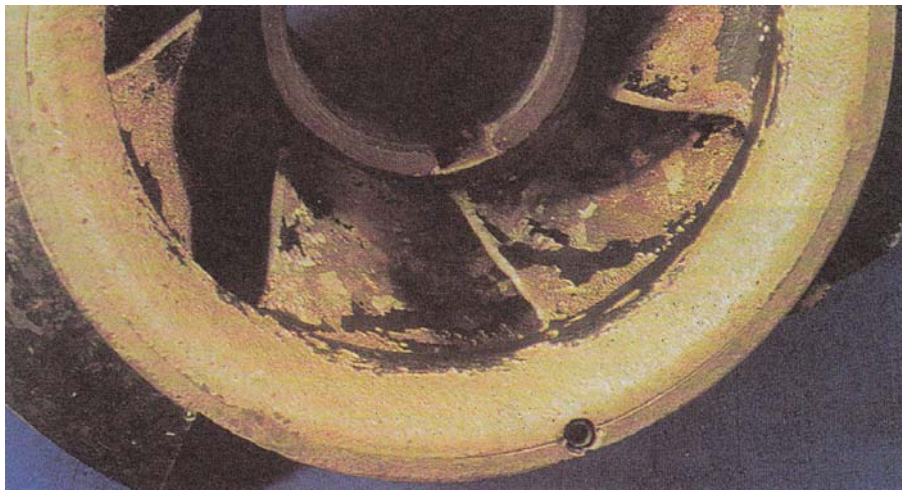
سیستم : پمپ آب تغذیه

مدت کارکرد : ۳ سال

پدیده : خوردگی عمومی

ظاهر نمونه : خوردگی و آسیب دیدگی عمومی بر روی قطعه مخصوصاً در نواحی لبه
می شود .

محیط : آب تغذیه که با ماده شیمیایی شلانت مداوا شده است .



علت پدیده : مسبب اصلی خوردگی وجود تلاطم در آب تغذیه می باشد (مخصوصاً این تأثیرات در لبه

های پروانه بیشتر است). ضمن آنکه مواد شلانت اضافی اثرات سوء بر برنز دارند .

روش اصلاح : طراحی صحیح به منظور جلوگیری از تلاطم و استفاده از سایر مواد بازدارنده به جای

استفاده از مواد شلانت .

مورد ۳.۲.۴۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : برنج

سیستم : سیستم آب خنک کن

قسمت : لوله آب خنک کن

پدیده : میکروبی

مدت کارکرد : ۱۸ ماه

ظاهر نمونه : در روی لوله رسوباتی مشاهده می شود که با برداشتن آنها ، سوراخ‌های ریزی در روی سطح تشکیل شده است .

محیط : داخل لوله : آب خنک کن با درجه حرارت حدود $\text{Ca}^{+2} = 270 \text{ ppm}$ ، $\text{Mg} = 150 \text{ ppm}$ ،

$\text{pH} = 7/3$ ، $\text{Cl}^- = 94 \text{ ppm}$ ، خارج لوله : الکل اتیلیک .



علت پدیده : آب مذکور حاوی مقدار زیادی باکتری‌های احیاء کننده سولفات

(Sulfate – reducing bacteria) است . این باکتری‌ها قادرند تا سولفات را به SH_2 تبدیل کنند ،

سولفید ایجاد شده خوردگی بسیار شدیدی دارد .

روش اصلاح : با تمیز نگهداشتن داخل لوله‌ها از رسوبات و کثافات و تزریق مداوم گاز کلر (به منظور از

بین بردن باکتریهای مذکور) مشکل مذکور مرتفع خواهد شد .

مورد ۳.۲.۴۲

صنعت : برق

جنس نمونه : برنج آلومینیم دار (Al – brass)

سیستم : آب خنک کن یک بار گذر (کندانسور)

قسمت : لوله

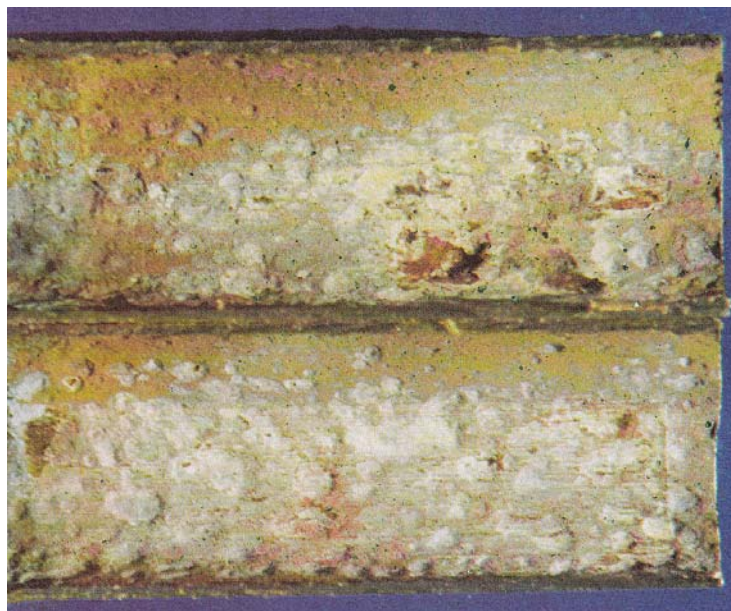
پدیده : روی زدایی (خوردگی حفره ای)

مدت کارکرد : ۷ سال

ظاهر نمونه : وجود حفره های ریز همراه با رسوبات زیاد در روی لوله .

محیط : داخل لوله : آب دریا (آب دریای خزر) خارج لوله : آب تغذیه که با هیدرازین و آمونیاک مداوا شده

است .



علت پدیده : روی زدایی برنج آلومینیم دار به دلیل حساس بودن آلیاژ به روی زدایی.

روش اصلاح : بهتر است برای آب دریا از برنج آلومینیم دار با درصد بیشتر آرسنیک (حداقل ۰.۰۲٪)

استفاده شود . ضمن آنکه برای آب دریا که کلرور آن بالا می باشد ، بهتر است از آلیاژهای کوپرونیکل

استفاده شود. ضمناً نحوه تزریق گاز کلر و همچنین نحوه شستشوی شیمیایی لوله ها برای حذف رسوبات

بسیار مهم است .

اعمال حفاظت کاتدی از نوع جریان اعمالی می تواند در رفع مشکل مؤثر باشد .

مورد ۲.۴۳.

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : برنج آلومینیم دار براس (۷۶-۲۲-۲+As)

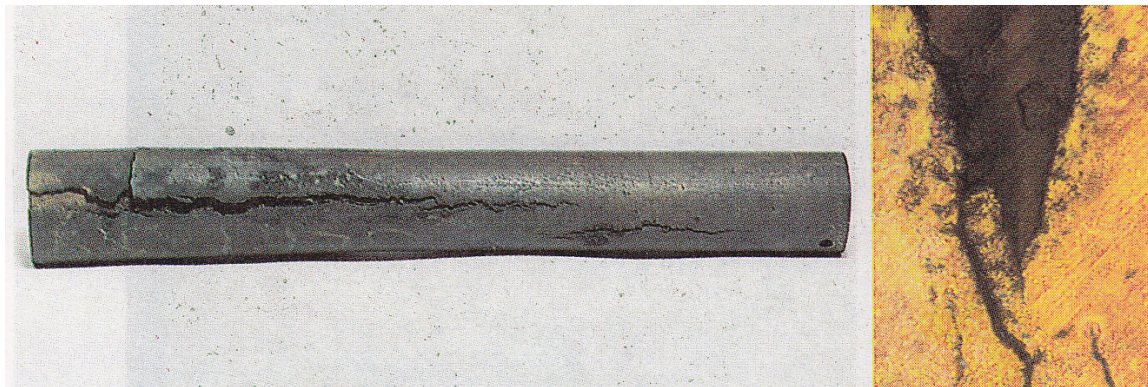
سیستم : خنک کن (با برج) تر قسمت : پوشش محافظ لوله های انتقال آب .

پدیده : خوردگی تنشی در پوشش برنج آلومینیم دار مدت کارکرد : ۲ ماه

ظاهر نمونه : ترک خوردگی

محیط : دور لوله : آب خنک کن حاوی کلرور و همچنین آمونیاک به داخل پوشش مذکور نفوذ نموده است

(نشت آمونیاک موقتی بوده است) .



علت پدیده : آمونیاک سبب خوردگی تنشی آلیاژهای مسی می شود .

روش اصلاح : از نشت آمونیاک بایستی جلوگیری شود .

مورد ۳.۲.۴۴

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : مس (نوع Cu – ETP)

سیستم : سیستم آب آشامیدنی

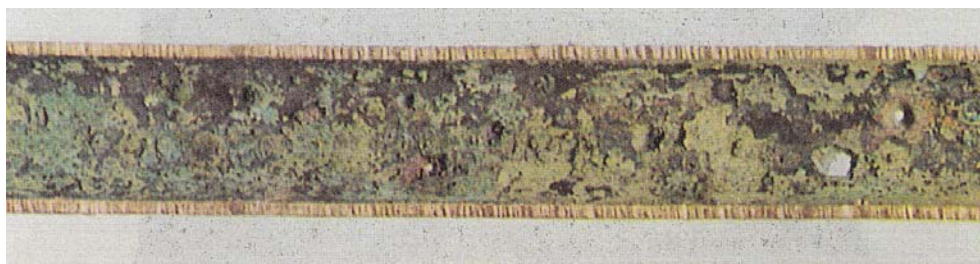
قسمت : لوله داخلی ساختمان

پدیده : خوردگی زیر رسوبی

مدت کارکرد : ۱۵ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای .

محیط : آب سرد آشامیدنی که در داخل لوله جریان دارد .



علت پدیده : این جنس لوله مسی (Electrolytic tough pitch) بسیار به تشکیل پیل خوردگی حساس می باشد . در حالیکه لوله مسی از جنس (doxidzed copper) برای مصارف فوق بسیار مناسب تر و مقاوم می باشد .

روش اصلاح : برای مصارف فوق بایستی از لوله مسی از نوع

(Cu – DHPL) (deoxidized high residual pHospHorus copper) استفاده شود .

مورد ۳.۲.۴۵

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : مس

سیستم : آب گرم خانگی

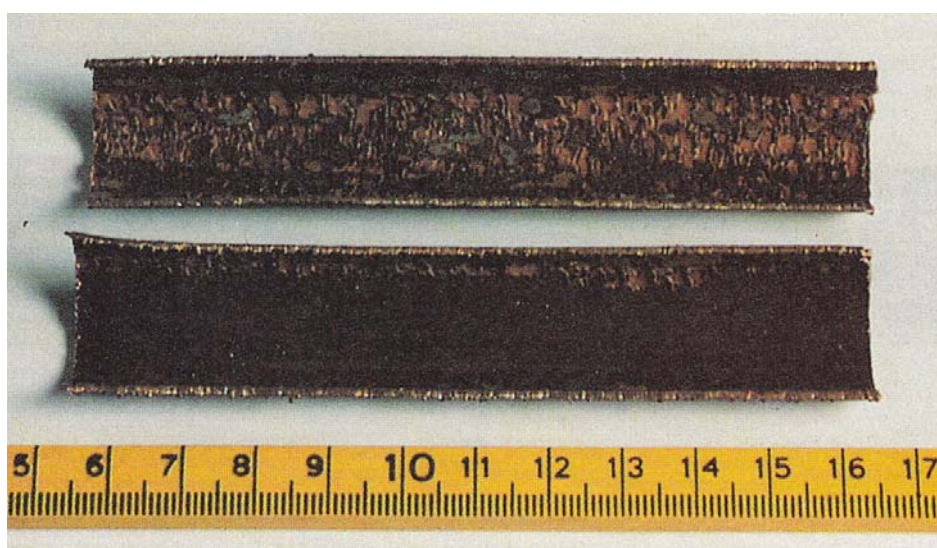
قسمت : لوله

پدیده : سایش

مدت کارکرد : ۳ ماه

ظاهر نمونه : تخریب و خوردگی شدید در داخل لوله

محیط : آب گرم ، دمای 70°C



علت پدیده : به دلیل رسوب گرفتگی لوله های دیگ بخار ، و همچنین هوا گرفتن لوله های آب، حباب های هوای موجود در آب سبب خوردگی سایشی لوله شده اند .

روش اصلاح :

* تعویض لوله های صدمه دیده

* تمیز نمودن رسوبات لوله های بویلر و استفاده از آب سختی گیری شده (آب نرم) به منظور کنترل

رسوب گذاری در لوله ها .

مورد ۳.۲.۴۶

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : مس

سیستم : آب گرم خانگی

قسمت : لوله گردش آب

پدیده : خوردگی گالوانیکی

مدت کارکرد : ۶ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای

محیط : آب گرم خانگی دارای خصوصیات زیر می باشد :

حاوی اکسیژن بالا ، درجه حرارت 80°C ، $\text{pH} = 7/5$ ، Cl^{-} ۲۸ ppm ، بی کربنات ۲۱۰ ppm بر حسب

کربنات .



علت پدیده : به دلیل بالا بودن مقدار حباب‌های هوا در سیستم ، پوسته اکسیدی لوله های مسی (Cu_2O)

به وسیله حباب‌های هوا به صورت مکانیکی (سایش) کنده می شود . راسب شدن ذرات مذکور در روی لوله

(در منطقی دیگر) و تشکیل پیل های موضعی $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$ سبب خوردگی گالوانیکی لوله مسی می شود .

روش اصلاح : تمهیدات لازم به منظور کاهش هوای آب بایستی به عمل آید ، ضمن آنکه ساخت لوله از

جنس فولاد زنگ نزن (AISI ۳۱۶ L) توصیه می شود .

مورد ۳.۲.۴۷ صنعت : برق نیروگاه حرارتی (با آب خنک کن یکبار گذر «آب دریا»)

جنس نمونه :برنز

سیستم : دستگاه پمپاژ گلوله های (Taprogge) که به منظور تمیز کاری لوله های کندانسور بکار می رود

قسمت : پروانه پمپ پدیده : سایش

مدت کارکرد : حدود یک سال پس از راه اندازی تزریق سولفات فرو به سیستم (تزریق سولفات فرو

به طور مداوم انجام نشده است) .

ظاهر نمونه : پروانه مذکور به طور قابل توجهی خورده شده است .

محیط : آب دریا



علت پدیده : عدم تزریق مداوم سولفات فرو سبب شده است که پروانه مذکور دچار خوردگی سایشی

بوسیله گلوله های اسفنجی شود (تناوب در ایجاد رسوب و حذف آن سبب این پدیده شده است) .

روش اصلاح : بایستی پروانه مذکور از جنسی ساخته شود تا در برابر سایش مقاوم باشد.

مورد ۳.۲.۴۸

صنعت : پالایشگاه

جنس نمونه : برنج (Cu - ۲۶,۷% Zn - ۱,۳% Sn)

سیستم : کدانسور پیش گرمایش افقی

قسمت : لوله آب خنک کن

پدیده : آلیاژ زدایی (Dealloying)

مدت کارکرد : یک سال

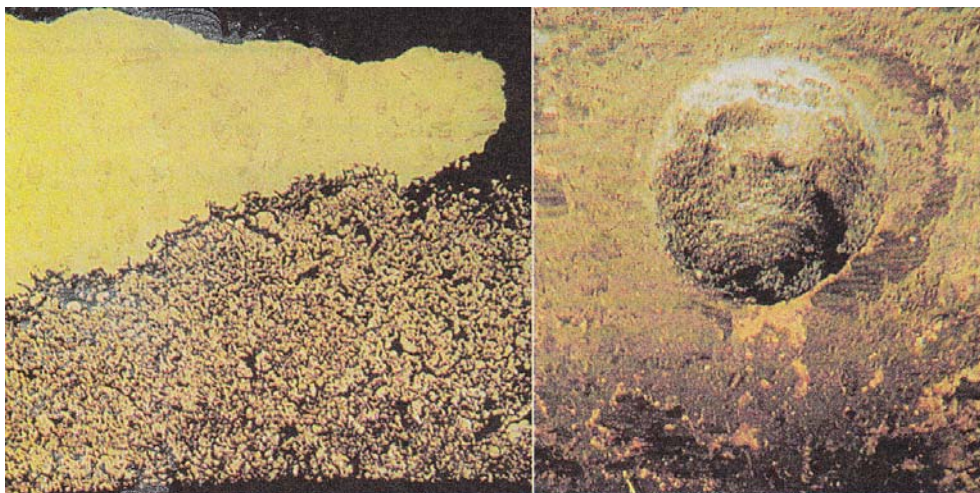
ظاهر نمونه : سوراخ‌ها روی سطوح بیرونی و پدیده روی زدایی در سطوح داخلی مشاهده می شود .

محیط : خارج لوله : فشار اتمسفری ، $pH = 5/5 - 6/5$ ، (آمونیاک برای کنترل pH) ، درجه حرارت

$116 - 43^{\circ}C$ و بخارهای از پیش گرمایش .

داخل لوله : فشار ۳۰ psi (۲۰ kpa) ، $pH = 8$ ، درجه حرارت $30 - 49^{\circ}C$ و آب خنک کن بدون عملیات

تصفیه و بازدارنده .



علت پدیده: خوردگی زیر رسوبی سبب روی زدایی می شود و همچنین به دلیل استفاده نکردن از یک

بازدارنده مناسب این اتفاق رخ می دهد .

روش اصلاح : استفاده از بازدارنده های مناسب برای کنترل خوردگی و رسوبدهی .

مورد ۳.۲.۴۹

صنعت : سیستم سرد کننده کارخانه

جنس نمونه : برنز

پدیده : خوردگی آمونیاکی

سیستم : سیستم سرد کننده جذبی با گردش آب شور قسمت : پروانه پمپ

مدت کارکرد : صدمات وارده پس از ۲ ماه که آب به آمونیاک آلوده می شود رخ داده است.

ظاهر نمونه : حملات موضعی شدیدی بر روی قطعه صورت گرفته است .

محیط : آب شور : آب با تقریباً ۲۰٪ کلرید سدیم و ۳٪ بی کرومات پتاسیم و ۱٪ سود سوزآور و

آلودگی های آمونیاکی ۲/۵٪ که ناشی از نشتی دستگاه تبخیر کننده از سیستم سرد کننده جذبی است .



علت پدیده : برنز به آمونیاک مقاوم نیست ، به دلیل مقدار کم غلظت بازدارنده (بی کرومات پتاسیم) آب

شور دارای خوردگی زیادی است که نهایتاً سبب تخریب و زوال پروانه می شود .

روش اصلاح : اگر پروانه برنزی با یک پروانه از جنس چدن جایگزین شود ، همچنین اگر آب شور که

خوردگی آن زیاد است با مخلوط آب و گلی کول به عنوان مایع سرد کننده ، جایگزین شود (مدار بسته) ،

مشکلات خوردگی سیستم کاهش می یابد .

مورد ۳.۲.۵۰

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : برنج

سیستم : سیستم آب گرم خانگی

قسمت : لوله و شیر

پدیده : روی زدایی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : به وجود آمدن رسوب سفید رنگ که در زیر آن برنج تغییر رنگ داده و ترد شده است .

محیط : آب داغ: 70°C ، $\text{pH} = 7/6$ ، مقدار بی‌کربنات (HCO_3^-) برابر با (90 ppm CaCO_3) ، مقدار

آلومینیم (Al^{3+}) برابر با 2 ppm و رسوب ($\text{Al}(\text{OH})_3$) .



علت پدیده : به دلیل رسوب هیدروکسید آلومینیم (به علت وجود حفاظت کاتدی در دیگ‌های بخار و کار

گذاشتن آندهای آلومینیومی) روی زدایی برنج اتفاق می افتد .

روش اصلاح : تمیز کردن سیستم و به کار بردن آندهای بی اثر (برای مثال می توان از آندهای تیتانیم

پوشش داده شده با پلاتین استفاده کرد) می تواند مانع از روی زدایی برنج گردد .

مورد ۳.۲.۵۱

صنعت : واحد شیمیایی

جنس نمونه : برنز

سیستم : سیستم تغذیه آب

قسمت : پروانه پمپ آب تغذیه

پدیده : خوردگی سایشی

مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : نمونه به تدریج نازک شده تا اینکه از بین می رود .

محیط : آب تغذیه هوازدایی شده ، دما 105°C .



علت پدیده : آب تغذیه هنگامی که به آمونیاک آلوده است ، بر مس و آلیاژهای آن اثر تخریبی می گذرد و باعث خوردگی آلیاژهای مس می شود . همچنین به علت سرعت بالای آب تغذیه در پمپ ، پدیده سایش نیز رخ می دهد . اثر توأم خوردگی و سایش سبب اضمحلال بیشتر پروانه آب تغذیه می شود .

روش اصلاح : از آنجایی که استفاده از آب تغذیه بدون آمونیاک غیر قابل اجتناب است ، از این جهت بهترین شیوه جهت جلوگیری از این نوع خوردگی ها انتخاب مواد صحیح است . بنابر این باید پروانه (Impeller) پمپ از جنس چدن نیکل دار که در مقابل آمونیاک و سایش مقاومت بیشتری از مس دارند ، ساخته شود .

مورد ۳.۲.۵۲

صنعت : گاز

جنس نمونه : مس

سیستم : سیستم توزیع آب آشامیدنی

قسمت : لوله

پدیده : خوردگی تنشی

مدت کارکرد : ۶ سال

ظاهر نمونه : شکستگی بوسیله محصولات خوردگی آبی (لوله به آرامی کج می شود) .

محیط : خاک آلوده به آمونیاک می باشد ، لوله کار گذاشته شده در روی سفره های آب زیر زمینی است .

علت پدیده : این نوع از مس به آمونیاک و همچنین خاک حاوی مواد آمونیاکی حساس بوده و در آن پدیده

خوردگی تنشی ایجاد می شود .

روش اصلاح :

* محافظت از خطوط مس ، با استفاده از پوشش های مناسب

* استفاده از پلاستیک های مقاوم بجای لوله های مسی .

مورد ۳.۳.۱

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : منیزیم

سیستم : سیستم آب خنک کن یک بار گذر

قسمت : سیستم حفاظت کاتدی با کمک آندهای قربانی شونده که برای حفاظت لوله ها به کار برده می شود.

پدیده : خوردگی گالوانیک

مدت کارکرد : ۴ سال

ظاهر نمونه : تصویر سمت چپ : آند استفاده شده، تصویر سمت راست : آند نو و سالم

محیط : آب لب شور



علت پدیده : آندها به کمک پیچ هایی به صفحاتی از جنس فولاد کربنی محکم شده اند . قسمتی از آند که در تماس با فولاد می باشد به سرعت خورده شده ، و باعث گردیده که آند فداشونده از سطح فولادی جدا گردد .

روش اصلاح : استفاده از نوارهای پلاستیکی که بین آند منیزیمی و صفحه فولادی قرار داده می شود . این نوارها باعث جلوگیری از تماس مستقیم آند با فولاد می گردد .

جنس نمونه : آلیاژ نیکل ریخته گری شده توسط سانتریفوژ ($25\text{ Cr}, 35\text{ Ni}, 0.4\text{ C} + \text{Nb}$)

ASTM HP ۴۰

سیستم : کوره کراکینگ

قسمت : سیم پیچ تابنده (Radiant Coll)

پدیده : کربوریزاسیون

مدت کارکرد : ۴۰,۰۰۰ ساعت

ظاهر نمونه : بادکردگی و ترک خوردگی .



علت پدیده : در دماهای بیش از 950°C ، نفوذ کربن آغاز شده ، موجب کربوریزاسیون می گردد و

همچنین تشکیل کاربیدهای $M_{23}C_6$ و M_7C_3 شروع می شود . اگر دما از درجه حرارت مقاومت به

اکسیداسیون یعنی 1100°C تجاوز کند ، کربوریزاسیون شدیدتر گردیده ، مقادیر بیشتری کاربید -

M_7C_3 از کاربید $M_{23}C_6$ تشکیل می شود . این تبدیل $M_{23}C_6$ به M_7C_3 سبب افزایش حجم گشته ، که در

نتیجه آن ، قطعه باد کرده و ترک می خورد .

روش اصلاح : کوره بایستی در درجه حرارت مجاز کار کند ، هر گونه افزایش از درجه حرارت مجاز سبب

تخریب آلیاژ مذکور می شود.

مورد ۳.۴.۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : نیکل ۲۰۰

سیستم : راکتور اکسید اسیون

قسمت : لوله داخلی راکتور

پدیده : خوردگی ناشی از دی اکسید کربن (خوردگی شیرین)

مدت کارکرد : ۸ سال

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت به همراه حفره های عمیق .

محیط : دی اکسید کربن و آب . دما °C ۳۲۵ . فشار : ۲۳۰ بار .



علت پدیده : در قطعاتی از راکتور ، دما به زیر نقطه شبنم افت می کند ، در نتیجه آب تشکیل شده و

CO₂ در آن حل می گردد. در دمای مورد نظر ، اسید کربنیک حاصله موجب خوردگی نیکل خواهد شد .

روش اصلاح : استفاده از ماده ای مقاوم نسبت به خوردگی ناشی از CO₂ (به عنوان مثال فولاد زنگ نزن

۳۱۶ AISI) .

مورد ۳.۵.۱

صنعت : آب و فاضلاب

جنس نمونه : سرب

سیستم : شبکه آبرسانی

قسمت : لوله زیر زمینی

پدیده : تغییر شکل دادن

مدت کارکرد : ۸ تا ۱۰ سال

ظاهر نمونه : لوله شکسته شده است .

محیط : داخل لوله : آب بیرون لوله : خاک .



علت پدیده : به دلیل نوع شیر نصب شده ، که از نوع تمام باز و یا تمام بسته می باشد ، فشار حاصله در زمان باز نمودن شیر بیش از حد قابل قبول برای لوله مذکور می باشد که این امر سبب زوال لوله شده است .

روش اصلاح : تعویض شیر با نوعی از شیرهایی که به تدریج باز و بسته می شوند . ضمناً بهبود در طراحی و تمهیدات دیگر به منظور کاهش فشارهای ناگهانی ضرورت دارد .

مورد ۳.۵.۲

صنعت : انتقال برق

جنس نمونه : سرب

سیستم : سیستم انتقال انرژی

قسمت : پوشش یک کابل KV ۱۰ زیر زمینی

پدیده : خوردگی جریان سرگردان

مدت کارکرد : ۱۹ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای .

محیط : خاک (بدون حضور سولفید) : $\text{pH} = 8/3$ ، این خاک خوردگی برای سرب ندارد . محصولات

خوردگی حاوی pbso_4 , pbci_2 است



علت پدیده : جریان های سرگردان ناشی از عبور قطار برقی سبب خوردگی کابل شده است.

روش اصلاح : کابل بایستی به مسیر مناسب تری منتقل شود و برای اطمینان خاطر پوشش سربی با

پوشش پلاستیکی جایگزین شود .

مورد ۳.۵.۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : سرب

سیستم : دستگاه تغلیظ اسید

قسمت : لوله حرارتی

پدیده : خزش

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : باد کردگی موضعی لوله و ایجاد شکاف .

محیط : گاز خروجی با دمای 80°C از داخل لوله عبور می کند و اطراف لوله اسید سولفوریک قرار دارد .



علت پدیده : درجه حرارت گاز خروجی سبب تسریع در پدیده خزش و زوال لوله می شود .

روش اصلاح :

* ساختن لوله های مذکور از آلیاژ هاستولی C و یا

* جایگزینی لوله مذکور با لوله ای از جنس مس و پوشش دادن آن با سرب .

مورد ۳.۶.۱

صنعت : پتروشیمی

جنس نمونه : تیتانیم

سیستم : کارخانه تولید کلر

قسمت : پروانه پمپ

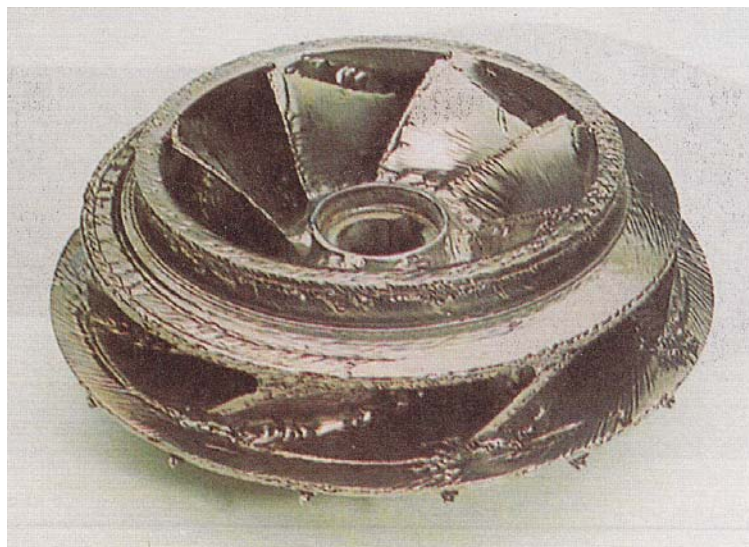
پدیده : خوردگی سایشی و خسارت حفره ای (کاویتاسیون)

مدت کارکرد : در حدود یک سال

ظاهر نمونه : خوردگی شدید در پروانه

محیط : مخلوطی از سود سوزآور (غلیظ) ، کلر سوزنده و سودا (اجزاء جامد) می باشد . وما بطور

معمولی 20°C است که در برخی نقاط به $80 - 70^{\circ}\text{C}$ هم می رسد .



علت پدیده : ذرات جامد سودا سبب سایش قطعه می شوند ، گرمایی که در اثر واکنش کلر با سود

سوزآور ایجاد می شود سبب افزایش موضعی دما شده که در نتیجه خسارت حفره ای (کاویتاسیون) رخ

می دهد. همچنین تیتانیم توسط محلول سود غلیظ خورده می شود .

روش اصلاح : با به کار بردن پروانه ای از جنس تفلون PFA (پرفلوئور و آلکوکسی) مشکل بر طرف می

شود .

جنس نمونه : تیتانیم

قسمت : سیم پیچ گرم کن (Heating coll)

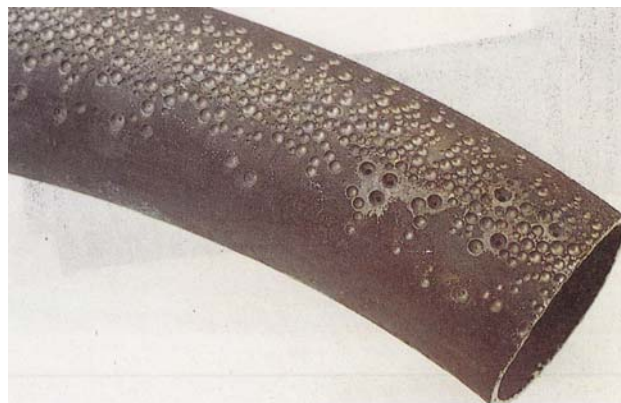
سیستم : مخزن فاضلاب

مدت کارکرد : ۸ ماه

پدیده : حمله کلریدی

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای به شکل حفره های کوچک زیاد که باعث سوراخ شدن لوله ها در نواحی مختلف گردیده است .

محیط : فاضلاب حاوی یک فاز آلی حاوی اسید لورینیک (Lauric acid) که در قسمت بالای دستگاه به وجود می آید . فاز آلی حاوی ۰.۵٪ اسید سولفوریک ، ۱٪ NaCl و ۱٪ Na_2SO_4 که pH آن ۱/۵ می باشد ، مقادیر کمی H_2O_2 در این محلول وجود دارد . هنگام خالی کردن مخزن ، این مود به وسیله بخار داغ ($^{\circ}\text{C}$ ۱۴۰) دمای آن به $^{\circ}\text{C}$ ۹۰ می رسد .



علت پدیده : این دستگاه ، در ابتدای راه اندازی از فولاد زنگ نزن ساخته شده است . بعد از سه ماه ، تمام سیم پیچ ها دچار نشتی شدند . سیم پیچ های تیتانیومی فقط در قسمت پایین تر (قسمت گرم تر) دچار خوردگی شدند . تست های آزمایشگاهی که روی تیتانیم انجام شد ، نتایج مثبتی را نشان داد . احتمالاً پوسته اکسیدی به وجود آمده روی سیم پیچ های زیرین ، در معرض حباب های بخار ناشی از جوشین دچار آسیب می شوند و همین علت به وجود آمدن خوردگی می باشد .

روش اصلاح : ساخت سیم پیچ از جنس PVDF که این ماده به مدت ۵ سال کار می کند .

مورد ۳.۷.۱

صنعت : صنایع هواپیمایی

جنس نمونه : آلیاژ کبالت

قسمت: پره

سیستم : توربین هواپیما

مدت کارکرد : نامعلوم

پدیده : سولفیداسیون

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای (pitting)

محیط : گازهای احتراق با دمای °C ۱۱۰۰-۱۲۰۰.



علت پدیده : سوخت مورد استفاده حاوی وانادیم و گوگرد است . این وانادیم دمای ذوب سولفات سدیم را

کاهش می دهد و در نتیجه سولفات سدیم مذاب حاصله ، آلیاژ کبالت فوق را مورد حمله قرار می دهد.

روش اصلاح :

- استفاده از سوخت مناسب و یا استفاده از آلیاژ بهتر .

- استفاده از پوشش های مناسب .

جنس نمونه : هاستلوی C۴

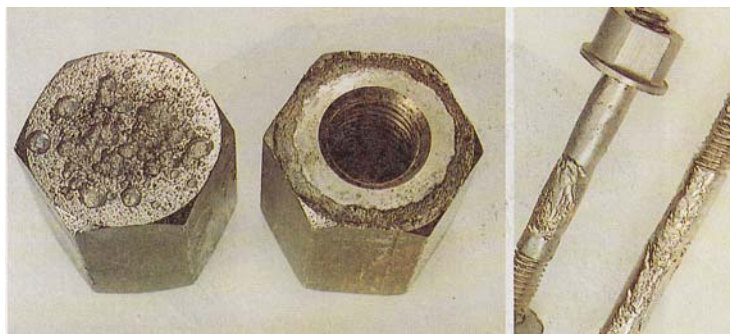
سیستم : راکتور مخلوط کننده در یک کارخانه فلزی

قسمت: پیچ و مهره های قسمت همزن

پدیده : خوردگی اتمسفری (پوسیدگی بتن) مدت کارکرد: حدود ۱۵ سال

ظاهر نمونه : مهره ها : به وجود آمدن و شیاردار شدن در محل درز نشیمن ، پیچ ها : خوردگی سطحی

در محل درز میله .

محیط : مخلوطی از اسیدنیتریک و سایر اسیدهای اکسید کننده . دما 110°C - 115°C ، محیط حاوی اکسیژن بالا .

علت پدیده : در سطح فوقانی مهره ها : خوردگی انتخابی آخال های غیر فلزی موجود در فلز ، صورت

گرفته است . این آخال ها در حین فرآیند نورد به صورت رگه های باریک و طولی در آمده اند . هنگامی که

که این آخال ها در معرض محیط خورنده قوی قرار گیرند، خوردگی رگه های آخال از انتهای رگه ها آغاز

می شود و به فولاد زمینه انتشار می یابد . بنابراین کناره های قطعه دچار خوردگی می شوند . در پیچ ها

و سطح تحتانی مهره ها : پیل های اختلاف دمشی به علت وجود درز و شکاف ، به وجود آمده است .

روش اصلاح :

-حفاظت سطح مقطع با عمل «لایه گذاری» (Butterring) توسط فلز جوش . فلز جوش به این نوع

خوردگی حساس نیست .

- ساختن پیچ و مهره ها از پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF) .

مورد ۳.۷.۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : هاستلوی ۲۰ Carpenter

سیستم : خط انتقال اسید سولفوریک

قسمت : پره پمپ

پدیده : خوردگی بین دانه ای

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : حمله موضعی شدید و سایش و زدایش سطح قطعه .

محیط : اسید سولفوریک ۸۰٪، دما تقریباً 100°C .



علت پدیده : به دلیل دمای بالای محیط اسید سولفوریک ، در مرزخانه ها کاربید ایجاد شده است . علاوه بر

آن ، عملیات حرارتی قطعه ، صحیح و کافی نبوده است .

روش اصلاح

- نگهداری دما در زیر 80°C .

- بهبود کیفیت قطعه ریختگی توسط عملیات حرارتی (برای مثال ASTM A ۷۴۴ – CN – ۷ M)

مورد ۳.۷.۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : اینکولوی ۸۲۵ (Incoloy ۸۲۵)

سیستم : مبدل حرارتی

قسمت : دمنده های انبساط (Expansion bellows)

پدیده : خوردگی رسوبی مدت کارکرد : ۴ سال

ظاهر نمونه : حفره های موضعی با عمق متغیر از ۰/۵ تا ۱/۰ میلی متر

محیط : خارجی : روغن آلوده به آب و کثافات ، فشار ۶ بار ، دما °C ۲۰۰ - ۱۶۰ .



علت پدیده : به دلیل جریان ناکافی در انتهای ساکن (dead end) مبدل حرارتی ، آلودگی ها و کثافات در پشت کنگره ها و انحناها باقی می مانند . این امر سبب ایجاد پیل های اختلاف دمشی می گردد که منجر به نوعی خوردگی شکافی می شود که فلز به آن حساس است .

روش اصلاح :

- بهبود دادن وضعیت جریان .
- ساختن دمنده ها از آلیاژی که حساسیت کمتری به خوردگی شکافی داشته باشد

برای مثال SMO ۲۵۴ (ASTM S۳۱۲۵۴)

مورد ۳.۷.۵

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : Incoloy ۸۲۵

سیستم : آب خنک کن

قسمت : لوله مبدل حرارتی

پدیده : خوردگی زیر لایه ای (زیر رسوبات)

مدت کارکرد : ۸ سال

ظاهر نمونه : حمله موضعی در زیر لایه ها و رسوبات

محیط : آب لب شور (آبی که میزان املاح خورنده آن از آب دریا کمتر و از آب شیرین بیشتر است) .



علت پدیده : ذرات موجود در آب خنک کن ، روی سطح فلزی لوله ها راسب شده و اثر گالوانیک ایجاد می کنند(شکل گیری نقاط آندی در زیر رسوبات و لایه ها) که نتیجه آن خوردگی موضعی خواهد بود .

روش اصلاح :

- از تشکیل رسوبات و لایه ها به وسیله افزایش سرعت آب خنک کن جلوگیری نمایید .

- در داخل لوله ها یک پوشش پخته (baked Coating) اعمال کنید .

مورد ۳.۷.۶

صنعت : برق (نیروگاه گازی)

جنس نمونه : Rene ۷۷

سیستم : توربین گازی

قسمت : پره ها

پدیده : خوردگی سولفیدی

مدت کارکرد : چند سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی

محیط : گاز های احتراق (گازهای حاصل از سوختن گاز طبیعی) آلوده به ذرات سولفات سدیم .



علت پدیده : عملکرد ناقص و ناکافی فیلترهای هوا ، سبب ورود ذرات پودر سولفات سدیم به هوای احتراق

می شود . سولفات سدیم فوق توسط واحد مورد نظر پخش شده ، نیکل موجود در آلیاژ به وسیله سولفید

مورد حمله قرار گرفته است .

روش اصلاح : عملکرد فیلترهای هوا را بهبود داده ، بازرسی مکرر و دقیق انجام دهید .

پوشش بهتر بکار گرفته شود .

مورد ۳.۷.۷

صنعت : برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : Cronit ORD

سیستم : دیگ بخار

قسمت : راهنمای مشعل (Burner deflector)

پدیده : سولفیداسیون

مدت کارکرد : تقریباً ۵۰۰۰ ساعت

ظاهر نمونه : سولفیداسیون قطعه بر اثر سوختن نفت دارای گوگرد .

محیط : گازهای حاصل از سوخت مشعل نفتی ، دما $^{\circ}\text{C}$ ۸۵۰ - ۶۰۰



علت پدیده : سولفیداسیون قطعه بر اثر سوختن نفت دارای گوگرد .

روش اصلاح : استفاده از مواد دیگر نظیر :

- کرم نیکل ۵۰/۵۰ یا کرم - نیکل ۶۰/۴۰

- پوشش Pack Aluminized (به وسیله نفوذ ، آلومینیم تشکیل ترکیبی از Ni.Al می دهد که در

برابر سولفیداسیون مقاوم است) .

- پوشش سرامیکی (Plasma sprayed) .

مورد ۳.۷.۸

صنعت : مولد برق (توربین گاز)

جنس نمونه : اینکونل ۷۳۸ LC

سیستم : پره استاتور توربین گاز

پدیده : نیتريداسيون

مدت کارکرد : ۸۰۰۰ ساعت

ظاهر نمونه : حمله موضعی که در قسمت‌های با درجه حرارت بالا رخ می دهد .

محیط : گازهای ناشی از سوخت گاز طبیعی (محفظه احتراق) که باعث می شود دما تا 900°C بالا

برود .



علت پدیده : به دلیل افزایش موضعی درجه حرارت ، نفوذ نیتروژن سبب تشکیل نیتريد می شود .

روش اصلاح : با بکار بردن پوشش نفوذی AI-Cr مشکل برطرف می شود .

مورد ۳.۷.۹

صنعت : دیگ بخار

جنس نمونه : اینکونل X ۷۵۰

سیستم : سیستم بخار ، با فشار ۴۰ بار .

قسمت : حلقه فنری درپچه کنترل بخار

پدیده : خوردگی تنش‌ی بین دانه ای (ترد شدن قلیایی) مدت کارکرد : ۳ ماه

ظاهر نمونه : ترک‌هایی در برخی نقاط حلقه فلزی ظاهر شده است (شکست ترد) .

محیط : بخار فوق گرم در فشار ۴۰ بار و دمای $^{\circ}\text{C} 425$.



علت پدیده : بخار توسط آب دیگ بخار که قلیائیت آن بالا می باشد آلوده می شود . پدیده خوردگی توسط

رسوبات قلیایی و تنش های موجود در حلقه فلزی بوجود می آید .

روش اصلاح : بکار بردن درپچه کنترل بخار با یک فنر بیرونی ، سبب رفع مشکل می شود، در واقع باید

طراحی سیستم تغییر کند ، همچنین با دیدبانی مداوم کیفیت بخار و همچنین سطح درام ، می توان مشکل را

بر طرف ساخت .

مورد ۳.۷.۱۰

صنعت : کندانسور بخار

جنس نمونه : موئل

سیستم : لوله کندانسور بخار

پدیده : خوردگی زیر رسوبی

مدت کارکرد : نامعین

ظاهر نمونه : حمله موضعی در نقاط مختلفی از نمونه به صورت قسمت‌های منفصل از هم صورت گرفته است .

محیط : بیرون لوله: آب خنک کننده حاوی یون کلرور بالا - قسمت داخلی : بخار متراکم



علت پدیده : تشکیل پیل‌های اختلاف دما در اثر وجود رسوب .

روش اصلاح : با بکار بردن لوله های برنج آلومینیم دار و همچنین بهبود کیفیت آب و بخار مشکل برطرف می شود .

مورد ۳.۷.۱۱

صنعت : کُک سازی

جنس نمونه : اینکولوی ۸۰۰H (Incoloy ۸۰۰ H) که با استلیت ۶ (Stellite) ، روی هم جوش داده شده است .

سیستم : کوره گراکینگ قسمت : ترموکوپل در محل روزنه سیم پیچ تابنده .

پدیده : سایش مدت کارکرد : در حدود ۶ ماه

ظاهر نمونه : ماده فرسوده شده است . شکل اولیه و اصلی به صورت استوانه بوده است .

سمت چپ : این سمت کمتر تحت تأثیر قرار گرفته است .

محیط : بخاراتی با اجزاء ریز کُک و دمایی حدود $500-600^{\circ}\text{C}$.



علت پدیده : در طول عملیات دی ککینگ (Decoking) ، سرعت بالای بخاراتی که حاوی ذرات ریز کُک هستند سبب ایجاد سایش در ترموکوپل می شود .

ابتدا استلیت ۶ و سپس اینکولوی ۸۰۰H ساییده می شود.

روش اصلاح : با بکار بردن یک ترموکوپل از جنس اسلیت ۶ ریختگی شده می توان از خوردگی سایشی جلوگیری به عمل آورد . زیرا این ماده مقاومت بیشتری به سایش دارد .

مورد ۳.۷.۱۲

صنعت : تصفیه آب

جنس نمونه : هاستولی B

سیستم : فیلترهای زغال فعال

قسمت : سرپیچ ترمومتر (دما سنج)

پدیده : خوردگی گالوانیکی

مدت کارکرد : نامعین

ظاهر نمونه : حمله حفره ای (Pitting attack) به شکل دانه های کربن در روی نمونه قابل مشاهده است

محیط : زغال فعال ، گاز باقی مانده از کلریدوینیل و بخار متراکم



علت پدیده : در طول باز یابی فیلتر زغال فعال با بخار 140°C - 130°C ، چگالش بخارات آب در دانه ها

صورت می گیرد . و اسیدی که از تجزیه کلریدوینیل بوجود می آید سبب حمله گالوانیکی به فلز در دانه ها می شود .

روش اصلاح : با ایجاد یک لایه محافظ Al_2O_3 به صورت پاششی، می توان از زخم خوردگی جلوگیری کرد.

مورد ۳.۷.۱۳

صنعت : شیمیایی

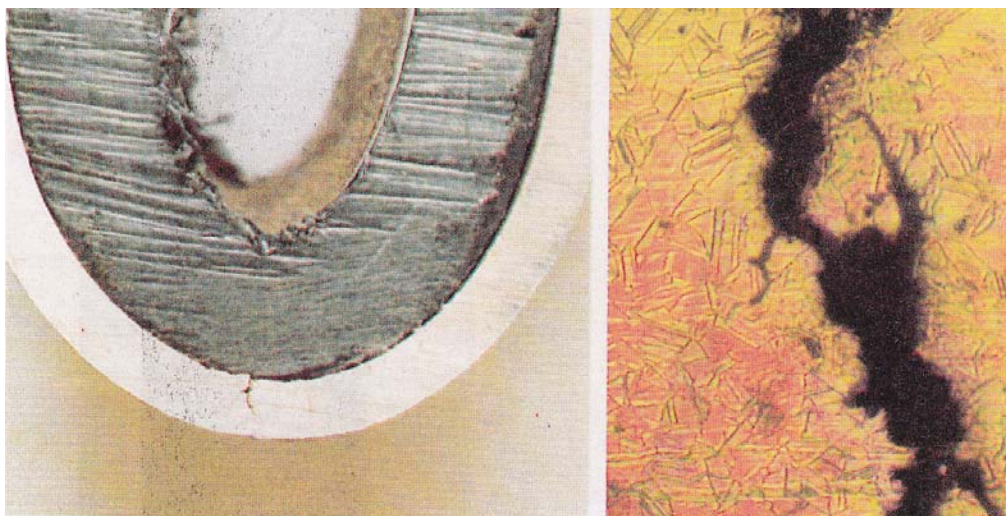
جنس نمونه : هاستولی C که با پلی تترافلوئورواتیلن پوشیده شده است .

سیستم : واحد باز یافت اسید کلریدریک قسمت : دمنده ها (Bellows)

پدیده : خوردگی تنشی بین دانه ای مدت کارکرد : چند سال

محیط : اسید کلریدریک ۱۸٪ و دما تقریباً 160°C .

ظاهر نمونه : ترک‌هایی روی حلقه خارجی دیده می شود .



علت پدیده : بعد از مدتی کارکرد ، اسید کلریدریک از میان پوشش PTFE نفوذ می کند . هاستولی C به

این محیط مقاوم نیست .

روش اصلاح : با بکار بردن PTFE خالص و متراکم مشکل برطرف می شود . در واقع باید در انتخاب

مواد دقت نمود .

مورد ۳.۷.۱۴

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : اینکونل ۶۲۶

محل نمونه : رآکتور اکسیداسیون قسمت : لوله های انشعابی از مبدل حرارتی

پدیده : خوردگی تنش (بین دانه ای) مدت کارکرد : در حدود سه ماه

ظاهر نمونه : ترکهایی روی نمونه مشاهده می شود .

محیط آب هوادهی شده : دما تقریباً 350°C و فشار تقریباً برابر ۲۰۰ بار است .



علت پدیده : این نوع آلیاژها (با مقدار بالای نیکل) به آب هوادهی شده در این درجه حرارت و فشار

حساس بوده و اکسیژن محیط می تواند سبب خوردگی تنش شکافی در این آلیاژها شود .

روش اصلاح : با انتخاب مواد مناسب می توان رفع مشکل نمود . برای مثال می توان به استفاده از

فولادهای کربنی پوشش داده شده و یا فولادهای زنگ نزن اشاره نمود .

مورد ۳.۷.۱۵

صنعت : پتروشیمی

جنس نمونه : زیر کونیوم

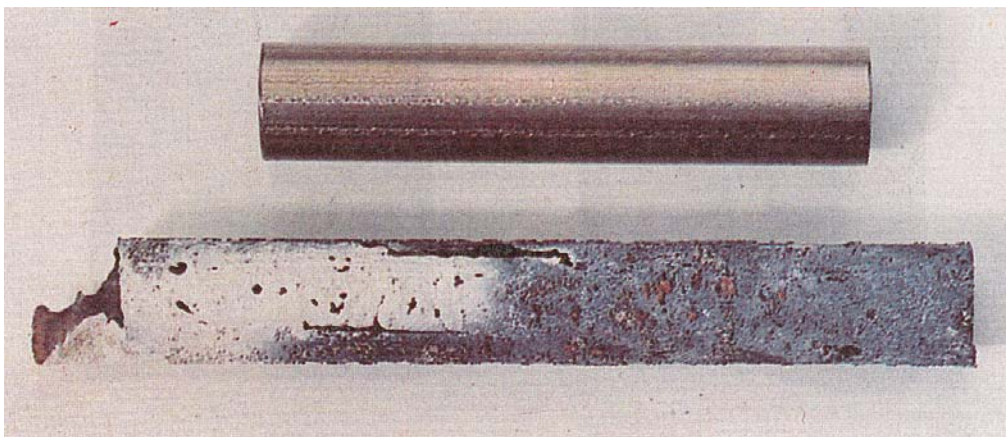
سیستم : مبدل حرارتی در کارخانه تولید کلر (آب خنک کننده در اطراف لوله ها قرار دارد و کلر از داخل لوله ها می گذرد)

قسمت: مجموعه ای از لوله ها که لوله بالایی از جنس تیتانیوم و لوله پایینی از جنس زیرکونیوم است.

پدیده: خوردگی کلریدی مدت کارکرد: یک هفته

ظاهر نمونه: خوردگی یکنواختی در سطح نمونه صورت گرفته است که باعث شده است اکسیدهای سفید رنگی در روی نمونه تشکیل شود.

محیط : آب مقطر حاوی کلر با دمای تقریبی 25°C .



علت پدیده: انتخاب مواد نامناسب، سبب بروز این مشکل می شود چرا که یکی از لوله ها به جای تیتانیوم از جنس زیرکونیوم است و زیرکونیوم به این محیط مقاوم نیست.

روش اصلاح: کنترل و دقت بیشتر در انتخاب مواد از ایجاد چنین مسائلی جلوگیری می کند.

مورد ۳.۷.۱۶

صنعت : پلاستیک سازی

جنس نمونه : هاستلوی B ، (Hastelloy B)

سیستم : دستگاه پلاستیک سازی

قسمت: غلطک مربوط به ساخت نوارهای پلاستیکی

پدیده: حمله سولفیدی

مدت کارکرد: ۱ تا ۲ ماه

ظاهر نمونه: خوردگی بصورت حفره ای شدن بسیار شدید اتفاق افتاده است.

محیط : حاوی H_2S ، سولفات ها و گوگرد است. به منظور حذف گوگرد، و اثرات نامطلوب آن غلطک در

حمام مایع Na_2S فرو برده می شود. سپس غلطک با آب فراوان و هوا شستشو و تمیز می شود.



علت پدیده: در حین عملیات شستشو، مقداری نمک های سولفیدی در روی سطح باقیمانده و در زمان

خشک نمودن غلطک سبب خوردگی نیکل آلیاژ مذکور می شود.

روش اصلاح: اگر غلطک ها پس از عملیات شستشو به منظور حذف سولفید با کاغذی مخصوص پولیش

شوند، مشکل مرتفع می شود.

صنعت : غذایی (روغن نباتی)

مورد ۳.۷.۱۷

جنس نمونه : مونل

سیستم : سیستم تولید کره نباتی (مارگارین)

قسمت: شیر کنترل (back – Pressure) در محفظه مخلوطکن پمپ خنککن مارگارین.

مدت کارکرد: ۵ سال

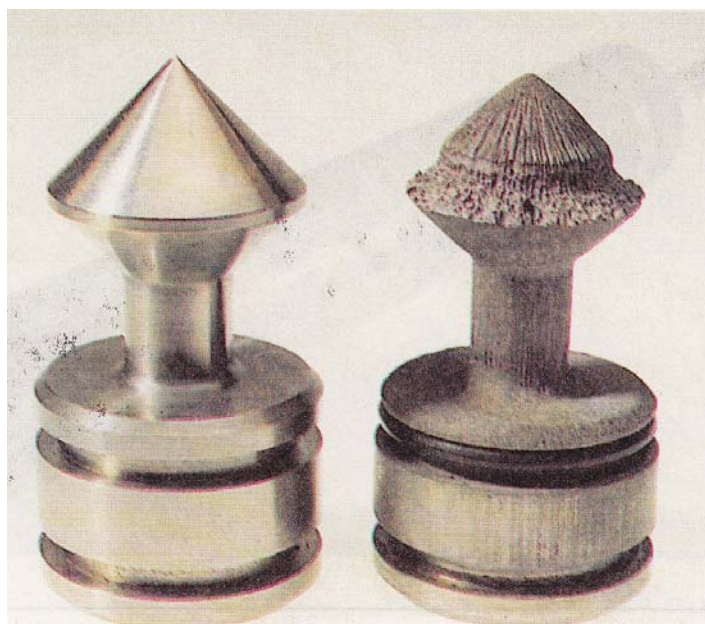
پدیده: خوردگی سایش

ظاهر نمونه: خوردگی به صورت شیاری شدن شدید در قطعه اتفاق افتاده (یک قطعه استفاده نشده برای

مقایسه نمایش داده شده است).

محیط : امولسیون مارگارین (۸۰٪ چربی، ۲۰٪ آب). دما ۴۵°C.

PH فاز آبی برابر ۴ و محیط حاوی ۸ درصد نمک طعام است.



علت پدیده: خوردگی به دلیل وجود نمک بالا در محلول و همچنین سرعت موضعی زیاد.

روش اصلاح: *تعویض و جایگزینی مرتب، و یا

*بعنوان جایگزین، استفاده از آلیاژ (Stellite).

مورد ۳.۷.۱۸

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فولاد (۳۴Cr Ni Mo ۶, W Nr.۱.۶۵۸۲)

سیستم : راکتور

قسمت: مهره و پیچ (nut with bott)

پدیده: تردی هیدروژنی

مدت کارکرد: چند سال

ظاهر نمونه: مهره بطور کامل شکسته است.

محیط : اتمسفر صنعتی.



علت پدیده: رزوه‌های درشت روی پیچ، به آسانی آب باران را درون خود نگاه می‌دارند، که این آب توسط

اتمسفر صنعتی، اسیدی می‌گردد. هیدروژن اتمی ایجاد شده در حین خوردگی به داخل فولاد نفوذ کرده،

استحکام آن را کاهش می‌دهد.

روش اصلاح: فاصله بین پیچ و مهره باید آب‌بندی گردد.

مورد ۳.۷.۱۹

صنعت : آلات و ادوات موسیقی

جنس نمونه : قلع

سیستم : ارگ کلیسا

قسمت: لوله‌ها

پدیده: خوردگی اتمسفری (طاعون قلع Tin Plague) مدت کارکرد: بالای ۳۰۰ روز

ظاهر نمونه: در انتهای لوله‌ها، قلع خاکستری بوجود می‌آید و این تشکیل همراه با پودر شدن و شکست

موضعی لوله‌ها می‌باشد.

محیط : اتمسفر مرطوب سرد که دمای آن کمتر از 13°C می‌باشد.



علت پدیده: تغییر فاز آلوتروپیک قلع و تبدیل فاز β به فاز α در زیردمای 18°C (تبلور مجدد قلع) علت این

خوردگی می‌باشد. زیاد شدن حجم فاز α -قلع باعث به وجود آمدن برآمدگی‌ها می‌شود. ایجاد این فاز

منجر به ترد شدن و متلاشی شدن لوله به صورت پودر می‌شود. این خوردگی تحت نام طاعون قلع شناخته

شده است.

روش اصلاح: نگهداری ارگها در بالاتر از دمای 20°C .

مورد ۴.۱.۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : پلاستیک ABS (آکریلونیتریل بوتادین استایرن)

سیستم : آب‌خنک‌کن

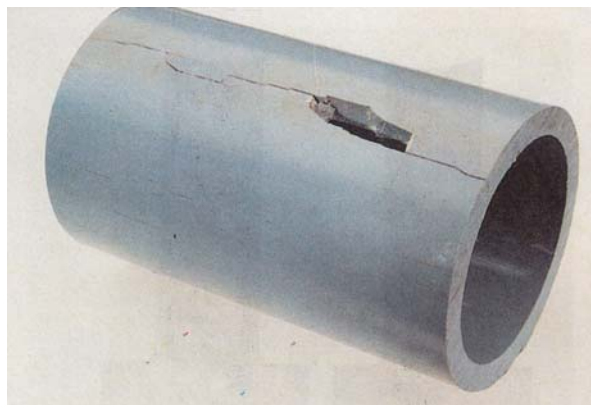
قسمت: لوله خارجی

پدیده: تردی ناشی از تنش

مدت کارکرد: ۴ تا ۵ سال

ظاهر نمونه: ترک خوردن طولی، به همراه یک قطعه شکسته شده.

محیط : داخل: آب خنک‌کن در دمای ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد/ خارج: اتمسفر



علت پدیده: خط لوله از خارج توسط حلال های آلی ناشی از باقیمانده رنگ حاصل از رنگ‌کاری قسمت

های نزدیک و مجاور آلوده شده است. ایجاد تردی تنشی توسط حلال‌های بکاربرده شده، به همراه تنش

ناشی از اتصال ضعیف و غیراصولی قطعات به یکدیگر مسبب این خوردگی است.

روش اصلاح: لوله‌های پلاستیکی در حین رنگ‌کاری بایستی پوشانیده شوند.

مورد ۴.۱.۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه (نوعی فایبرگلاس)

سیستم : خط انتقال اسیدفرمیک

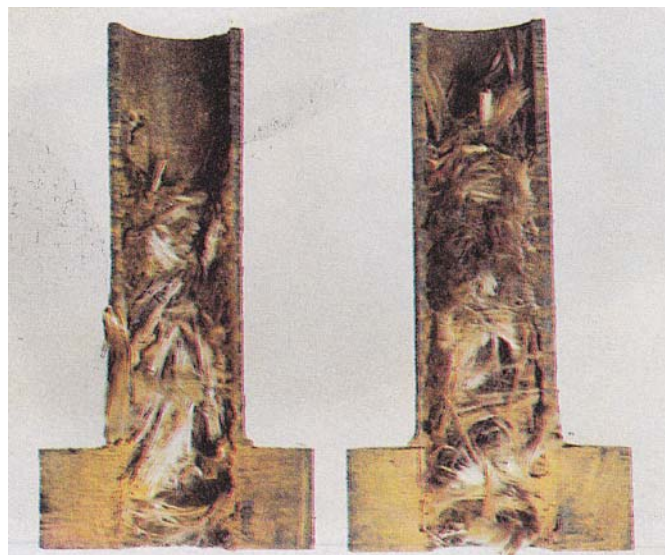
قسمت: لوله و اتصال فلنج آن

پدیده: حمله اسیدی

مدت کارکرد: تقریباً ۱ سال

ظاهر نمونه: تجزیه و زوال الیاف تقویت شده

محیط : اسیدفرمیک غلیظ



علت پدیده: ماده فوق الذکر نسبت به این محیط مقاوم نیست. در نتیجه، الیاف شیشه جدا و پخش شده،

سبب گرفتگی و خرابی لوله گردیده است.

روش اصلاح: استفاده از لوله از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۱۶

مورد ۴.۱.۳

صنعت : شکل دادن فلزات

جنس نمونه : پلی تترافلوئوراتیلین (PTFE)

سیستم : اکستروودکننده (چکش کاری) قسمت: سردکننده لوله

پدیده: نفوذ مدت کارکرد: یک سال

ظاهر نمونه: تاول زدگی

محیط: بخار چگال با دمای 90°C بعنوان محیط خنک کننده از میان لوله پلاستیکی می گذرد (لوله پلاستیکی با یک کالبد فلزی پوشش داده شده است) .



علت پدیده : تاول هایی در نقطه شبنم اتمسفری توسط نفوذ آب به وجود آمده اند .

روش اصلاح: با بکار بردن یک لوله فلزی قابل انعطاف مشکل بر طرف می شود .

مورد ۴. ۱. ۴

صنعت : پلاستیک سازی

جنس نمونه : ملامین

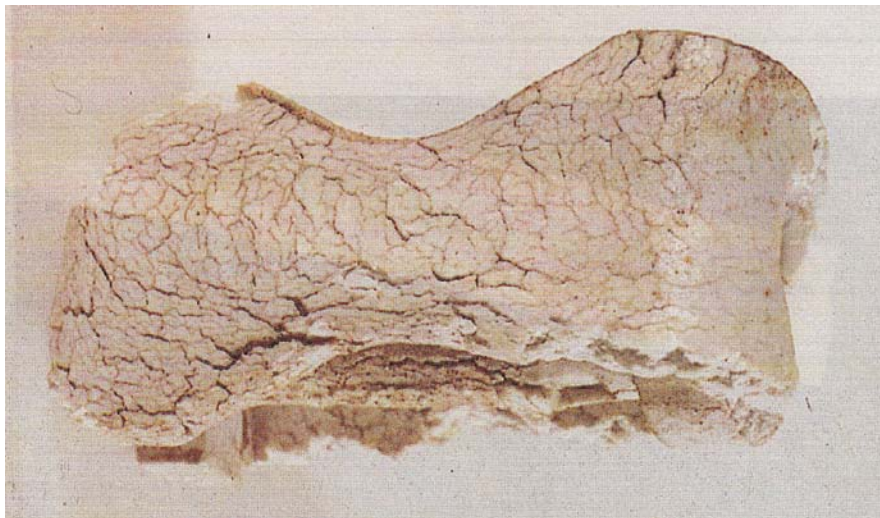
سیستم : سیستم خط لوله

قسمت: صفحه پایین نگهدارنده (Hold – down plate).

پدیده: پیرشدن (ageing) مدت کارکرد: نامعلوم

ظاهر نمونه: وجود ترک های متعدد به همراه شکست ترد.

محیط : اتمسفر صنعتی



علت پدیده: سخت کاری ناکافی رزین ملامین و استفاده از پرکننده (Filler) های نامناسب موجب پیرشدن سریع گشته است.

روش اصلاح: استفاده از رزینی با کیفیت بهتر.

جنس نمونه : هسته فولادی که بر روی آن پوشش اتیلن پروپن فلورینه (FEP) اعمال شده است.

سیستم : سیستم انتقال محصول

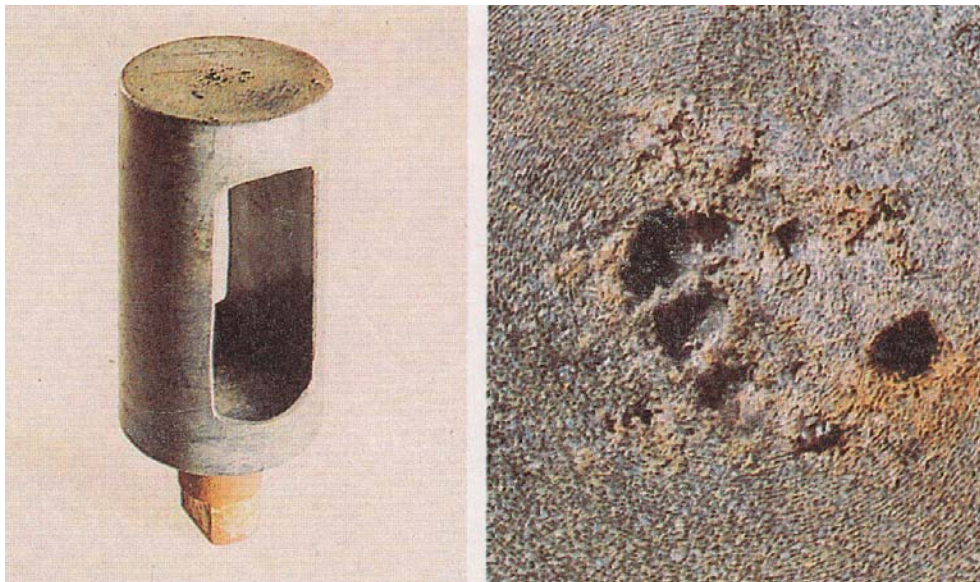
قسمت: pluge – cock.pluge

مدت کارکرد: چندماه

پدیده: آسیب دیدن ناشی از ساخت ناقص

ظاهر نمونه: آسیب دیدن موضعی.

محیط : هیدروکربن های کلرینه شده.



علت پدیده: به علت دقت نکردن در تولید، تخلخل هایی در پوشش به وجود آمده است که به دنبال آن مایع

به داخل این حفرات نفوذ کرده و به سطح هسته فولادی رسیده است: نتیجه این مسأله به وجود آمدن

خوردگی و از بین رفتن هسته و پوشش می باشد.

روش اصلاح: دقت در تولید به نحوی که هیچگونه تخلخلی در پوشش به وجود نیاید. می توان با انجام

آزمایش های مناسب وجود تخلخل را بررسی کرد (نظیر آزمایش Spark – testing).

جنس نمونه : پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار زیاد (UHMWPE)

سیستم : سیستم انتقال کود شیمیایی

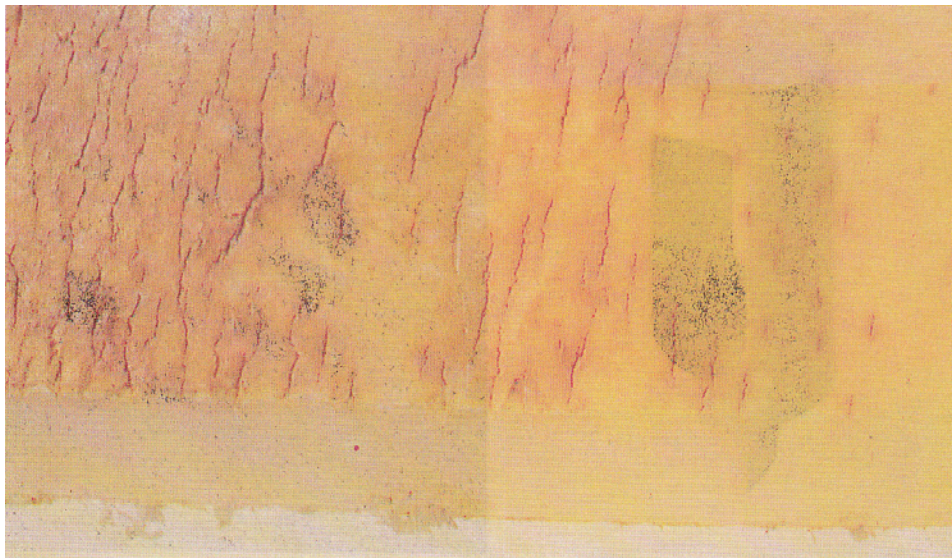
قسمت:صفحه پوشاننده (Wearing Plate).

مدت کارکرد: ۳ماه

پدیده: پیر شدن و سایش

ظاهر نمونه: رنگ زدایی و ترک خوردگی.

محیط : بلورهای کود مصنوعی فاقد خورندگی. دما حدود 110°C .



علت پدیده: شرایط کاری نامطلوب. دمای طراحی 90°C بوده است. پلاستیک مذکور در بیش از 100°C در

حضور اکسیژن بر اثر اکسیداسیون تخریب می شود. این پدیده به پیرشدن (Ageing) معروف است.

روش اصلاح: صفحه را از کاشی های سرامیکی بسازید.

مورد ۴.۱.۷

صنعت : پتروشیمی

جنس نمونه : پلی اتیلن با چگال بالا (HDPE)

سیستم : سیستم انتقال دی بوتیل کلراید

قسمت: لوله

پدیده: خزش

مدت کارکرد: ۵ سال

ظاهر نمونه: قطعه شروع به تغییر فرم کرده و ترک خورده است.

محیط : بخار دی بوتیل کلراید در فشار ۳ بار و دمای 130°C .



علت پدیده: فشار و درجه حرارت بالا سبب زوال لوله شده است. تاول‌هایی نیز بر اثر دی بوتیل کلراید

ایجاد گردیده‌اند.

روش اصلاح: در هنگام نصب خط لوله جدید، عمر مفیدکاری آن باید با دقت محاسبه شده و در زمان

مناسب تعویض و جایگزین گردد. و یا از مواد بهتری استفاده شود.

مورد ۴.۱.۸

صنعت : نفت

جنس نمونه : پلی پروپیلن

سیستم : سیستم استخراج

قسمت: قسمت فوقانی کلاهک

پدیده: پیرشدن (Ageing)

مدت کارکرد: ۶ سال

ظاهر نمونه: دو طرف قطعه تغییر رنگ داده است.

محیط : بخار آب حاوی آمونیاک باقی مانده. دما تا 90°C بالا می رود.



علت پدیده: در شرایط اتمسفری فوق، اکسیداسیون حرارتی باعث پیرشدن پلی پروپیلن و نهایتاً تردی آن شده است.

روش اصلاح: دکلاهک بایستی از جنس PVDF ساخته شود.

جنس نمونه : پلی پروپیلن

سیستم : شوینده گاز (gas Scrubber)

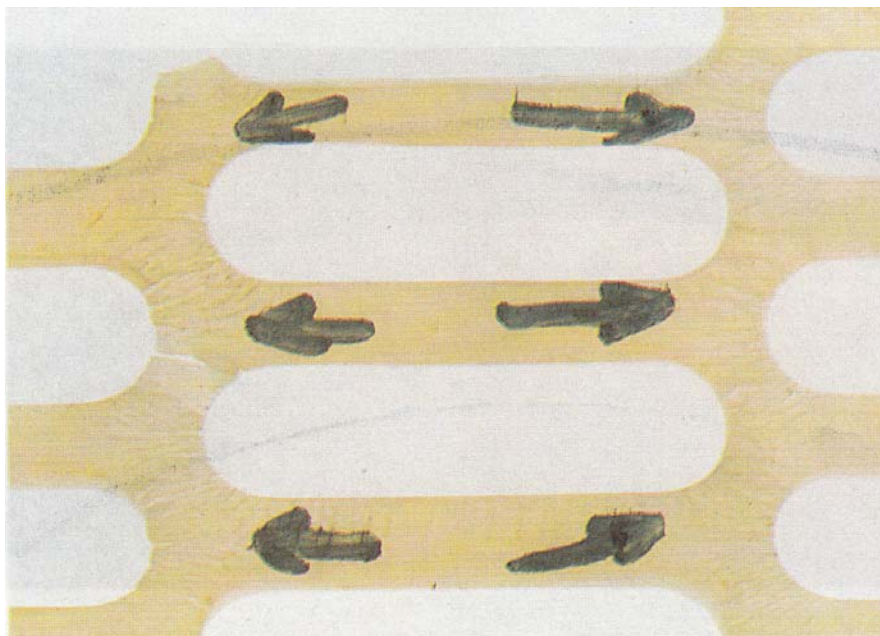
قسمت: شبکه حفاظت‌کننده (Supporting gride).

پدیده: ترک خوردگی بر اثر تنش

مدت کارکرد: ۲ سال

ظاهر نمونه: ترک خوردگی در مناطقی که تحت حداکثر نیرو و بار هستند.

محیط : محلول آبی حاوی یون کلر (گاز کلر). درصد یون کلر تقریباً ۱٪، دما ۸۰°C.



علت پدیده: یون کلر (گاز کلر) موجود در محلول به پلی پروپیلن حمله می‌کند و در مناطقی که در معرض

بیشترین تنش هستند ایجاد ترک می‌نماید.

روش اصلاح: استفاده از فایبرگلاس وینیل استر (glass – fibre – reinforced – vinyl ester).

مورد ۴.۱.۱۰

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فایبرگلاس وینیل استر (glass – fibre – reinforced – vinyl ester)

سیستم : خط انتقال سود

قسمت: مقطع لوله (با عایق بندی حرارتی).

مدت کارکرد: ۲/۵ سال

پدیده: حمله قلیایی

ظاهر نمونه: لایه زیرینی در مناطقی ناپدید شده و الیاف شیشه ای ساییده گشته اند.

محیط : سود ۵۰٪، دما °C ۶۰-۵۰، در بعضی از اوقات انتقال سود قطع می شود.



علت پدیده: نفوذ سود از لایه داخلی رزین به قسمت تقویتی الیاف شیشه ای که دچار حمله خوردگی شده

است. بنا به ادعای تولید کننده، این ماده بایستی در برابر سود ۵۰٪ تا دمای °C ۶۵ مقاوم باشد.

روش اصلاح: ساخت لوله از فولاد زنگ نزن AISI ۳۱۶Ti (W.Nr. ۱.۴۵۷۱) و یا ساخت لوله ای با پوشش

اپوکسی.

مورد ۴.۱.۱۱

صنعت : آب و فاضلاب

جنس نمونه : پلی وینیل کلراید (PVC)

سیستم : تصفیه خانه فاضلاب یک واحد صنعتی

قسمت: لوله فاضلاب

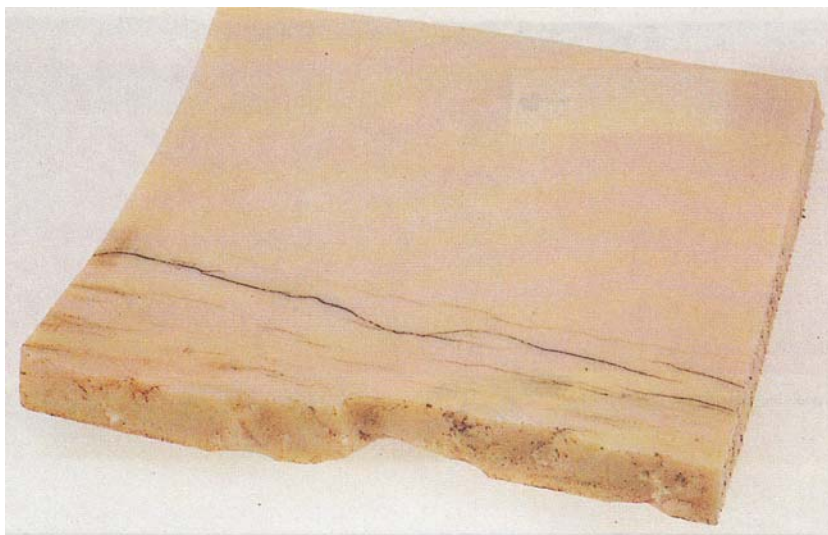
پدیده: تردی تنش

مدت کارکرد: چند هفته

ظاهر نمونه: ترکهای موازی.

محیط : فاضلاب آلوده به روغن سویای اپوکسیده (epoxitized) که در لوله بصورت لجنهای چرب

رسوب کرده است. دما حدود 20°C .



علت پدیده: روغن سویای اپوکسیده از فرآیند تولید وارد مجاری فاضلاب گردیده و بعنوان یک عامل

نرم‌کننده PVC عمل نموده است. روغن مذکور بر لوله PVC اثرات تخریبی دارد، در نتیجه بر اثر مجموع

این عامل و تنشهای موجود، لوله دچار ترک خوردگی گشته است.

روش اصلاح: لوله فاضلاب بایستی از پلی اتیلن ساخته شود.

مورد ۴.۱.۱۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : فایبر گلاس تقویت شده با پلی استر به همراه پوشش PVC .

سیستم : واحد الکترولیز

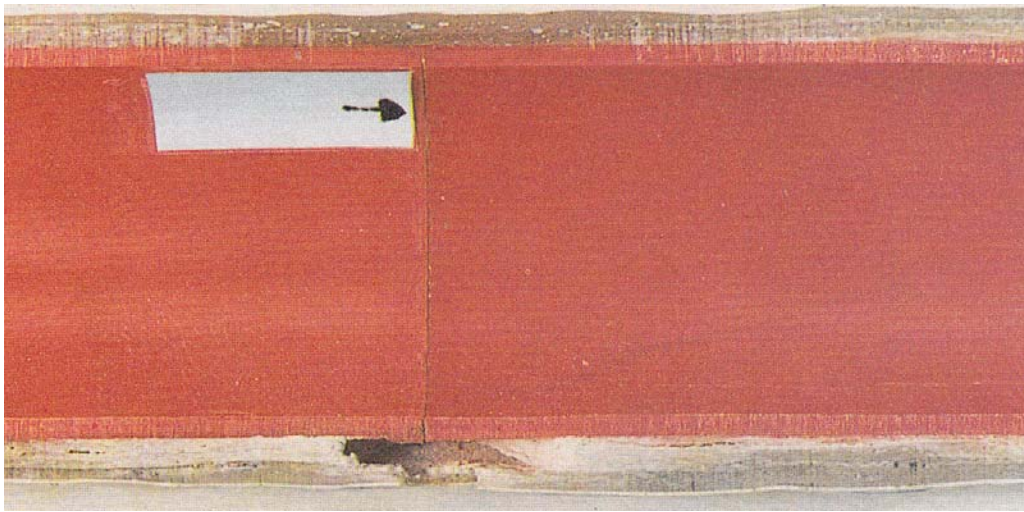
قسمت : مقطع لوله

پدیده : خوردگی (حمله) قلیایی

مدت کارکرد : چند هفته (اندک)

ظاهر نمونه : حمله به پلی استر در ناحیه جوش .

محیط : سود ۲۵% ، دما ۲۰°C .



علت پدیده : بر اثر جوشکاری نامطلوب و با کیفیت پایین ، پوشش PVC از ناحیه جوش دچار ترک

خوردگی شده و پلی استر توسط محلول سود مورد حمله قرار گرفته است .

روش اصلاح : بالا بردن کیفیت جوش با بازرسی های پیوسته (ارتقاء دانش و مهارت جوشکاران) .

مورد ۴.۱.۱۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : پلی تترافلورواتیلن (Polytetrafluoroethylene)

سیستم : راکتور پلیمریزاسیون

قسمت: میله هم‌زن

پدیده: زوال (متورم شدن)

مدت کارکرد: ۳ ماه

ظاهر نمونه: متورم شدن بیش از حد قسمت نگهدارنده .

محیط : حاوی استایرن (styrene) با درجه حرارت 180°C و فشار ۲۰۰ بار.



علت پدیده: این نوع پلاستیک برای این ماده شیمیایی مناسب نیست .

روش اصلاح: از پلاستیک نوع (PEEK) glass fibre-reinforced polyether ether ketone استفاده

شود .

جنس نمونه : لاستیک دی مراتیلن - پروپیلن (EPDM)

سیستم : واحد جذب اسید کلریدریک قسمت: فلانچ آب بندی

پدیده: زوال فیزیکی مکانیکی مدت کارکرد: چند سال

ظاهر نمونه: لاستیک متورم شده دارای ترک‌های متعدد است .

محیط: اسید کلریدریک ۳۰ درصد به همراه مقدار ناچیز کلروفرم و تتراکلرید با دمای تقریبی 50°C .



علت پدیده: حلال های موجود سبب متورم شدن لاستیک و نهایتاً ترک برداشتن آن شده است .

روش اصلاح: جایگزینی با یک فلانچ از نوع الاستومرفلوئورینه شده (Fluorinated elastomer) مشکل را

مرتفع می نماید .

مورد ۴.۱.۱۵

صنعت: شیمیایی

جنس نمونه: اپوکسی تنیده شده با الیاف شیشه (glass- fibre reinforced epoxy)

سیستم: سیستم انتقال

قسمت: پروانه پمپ

پدیده: خوردگی فرسایشی

مدت کارکرد: ۲ ماه

ظاهر نمونه: پروانه بطور شدیدی دچار خوردگی شده است.

محیط: اسید غلیظ (فعل و انفعالات و نوع اسید از طرف کارخانه محرمانه نگهداشته شده است)

حداکثر دما 120°C .



علت پدیده: غیر مقاوم بودن ماده‌ی مذکور به محیط مورد استفاده.

روش اصلاح: بهتر است پروانه از جنس (Carbon- fibre reinforced) نظیر (Polyether ether ketone)

ساخته شود.

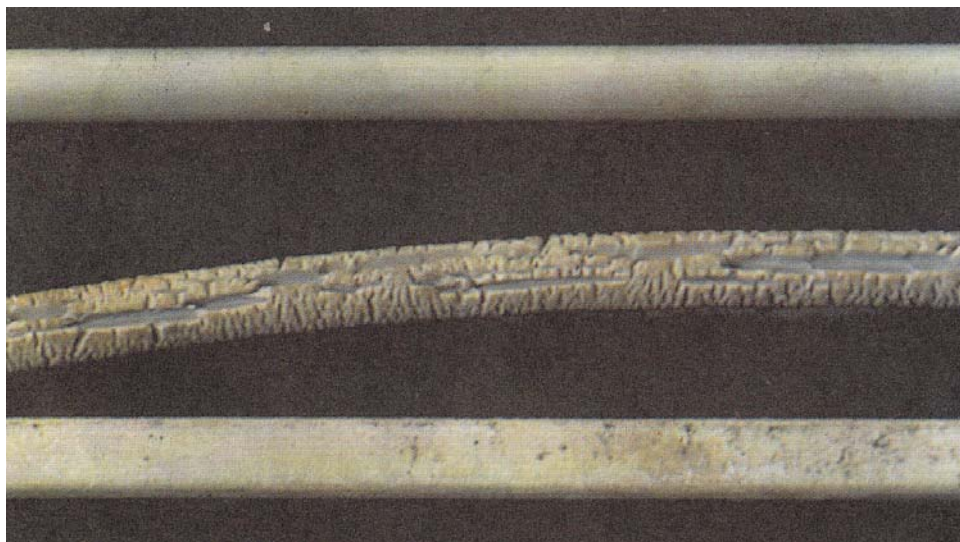
جنس نمونه : پلی پروپیلن (polypropylene) سیستم : دستگاه صافی

قسمت: قطعاتی از نگهدارنده دستگاه صافی ، عکس بالا قطعه اولیه (استفاده نشده) و عکس پایین همان قطعه استفاده شده را نشان می دهد .

پدیده: ترک خوردگی توأم تنش و یکنواخت مدت کارکرد: حدود ۴ماه

ظاهر نمونه: ترک برداشتن قطعه و همچنین کاهش ضخامت آن.

محیط :آب نمک حاوی گاز کلر ، دمای $50-60^{\circ}\text{C}$.



علت پدیده: کلر باعث اکسید شدن پلی پروپیلن شده ، و این عامل شروعی برای ترک خوردن می باشد .

روش اصلاح: استفاده از صافی (PDF)

مورد ۴.۱.۱۷

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : پلی وینیلیدین فلوراید (PVDF)

سیستم : دستگاه شستشوی گاز

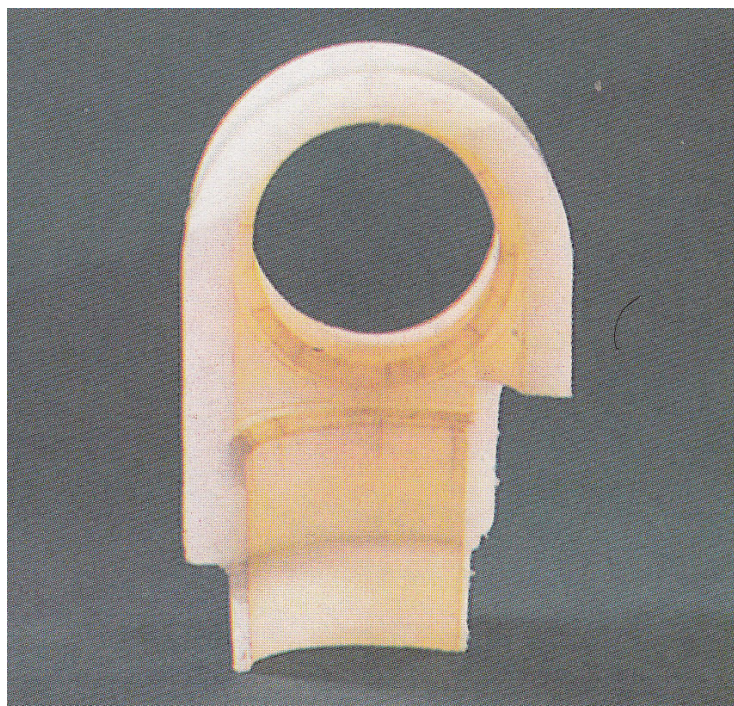
قسمت : لوله تخلیه

پدیده : آسیب تنش شکافی

مدت کارکرد : ۹ ماه

ظاهر نمونه : ترک در نزدیکی محل جوش .

محیط : محلول ۱۰ درصد سود و محصولات خنثی شده در دستگاه شستشوی گاز ، دمای 80°C .



علت پدیده : در این درجه حرارت محلول سود ، ماده مذکور را مورد حمله قرار داده و سبب ایجاد ترک می شود .

روش اصلاح : استفاده از فولاد کربنی با پوشش داخلی از جنس PTFE (Polytetrafluoroethylene)

مورد ۴.۱.۱۸

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : لاستیک سیلیکونی

سیستم : هم زن تانک

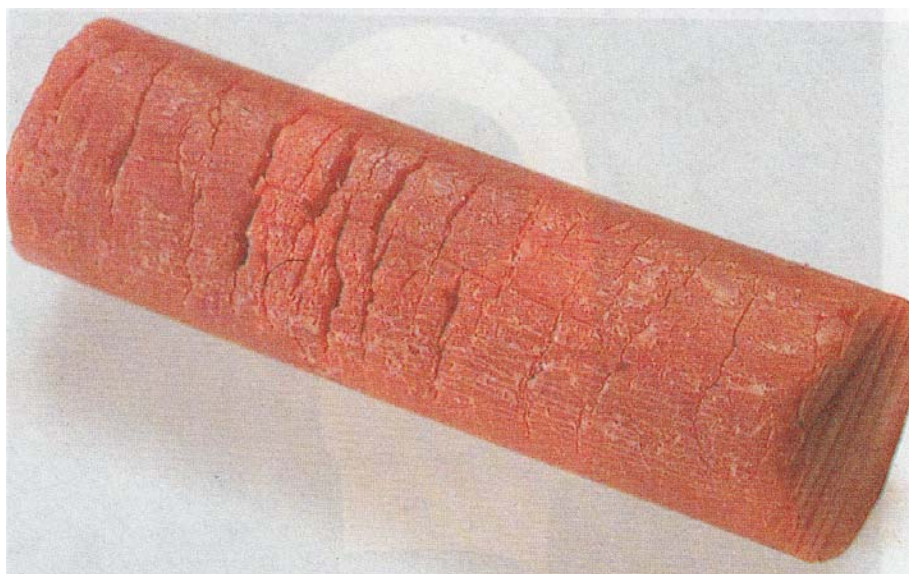
قسمت : نوار آب بندی (O – ring)

پدیده : گرم شدن بیش از حد

مدت کارکرد : نا مشخص

ظاهر نمونه : ترک دار شدن

محیط : مخلوطی از متانول ، استون و ستون در $^{\circ}\text{C} ۱۷۰$.



علت پدیده : حداکثر دما برای لاستیک مذکور در محیط ذکر شده $^{\circ}\text{C} ۱۴۰$ می باشد، در حالی که این نوع

لاستیک تا $^{\circ}\text{C} ۲۶۰$ در هوا می تواند مقاوم باشد (PTFE) .

روش اصلاح : نوار مذکور بایستی توسط غلافی از جنس تفلون پوشانیده شود تا در محیط با این درجه

حرارت مقاومت نماید .

جنس نمونه : هسته آهنی به همراه آستر (PFA) Perfluoroalkoxy

سیستم : انتقال اسید کلریدریک قسمت : توپ (ball-Cock)

پدیده : خسارات بدلیل خطا در تولید مدت کارکرد : چند هفته

ظاهر نمونه : شکستگی پوشش که نهایتاً سبب خوردگی فلز اصلی شده است .

محیط : اسید کلریدریک ۱۸ درصد ، با دمای °C ۵۰ - ۴۹ .



علت پدیده : پس از اعمال پوشش PFA به فلز مورد نظر ، عملیات سرد نمودن بسیار سریع انجام شده

است و لذا پوشش مذکور دچار آسیب شده است .

روش اصلاح : دقت و کنترل بیشتر در زمان ساخت قطعه .

مورد ۴.۱.۲۰

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : پوشش پلی تترافلورواتلین (PTFE)

سیستم : راکتور

قسمت : مقطع لوله

پدیده : نفوذ

مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : تاول زدگی

محیط : محیط حاوی بنز آلدئید است .



علت پدیده : نفوذ و چگالش بنز آلدئید بر روی پوشش

روش اصلاح : این پوشش برای این ماده مناسب نمی باشد .

مورد ۴.۱.۲۱

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : پوشش پلی تترافلورواتیلن (PTFE) بر روی فولاد .

سیستم : واحد جذب اسید کلریدریک

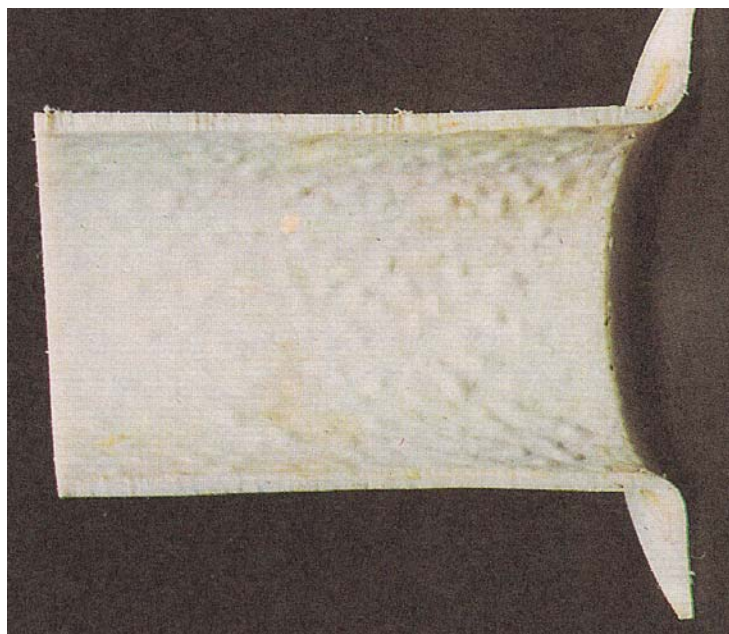
قسمت : مقطع لوله

پدیده : جذب

مدت کارکرد : ۶ ماه

ظاهر نمونه : تاول زدگی

محیط : اسید کلریدریک ۳۰٪ همراه مقدار جزیی هیدروژن و تتراکلریدکربن : دما °C ۱۰۵ .



علت پدیده : چگال شدن درونی و ایجاد فشار بدلیل جذب آب و نفوذ اسید کلریدریک به داخل ماده مذکور .

روش اصلاح : پوشش بایستی از نوع PTFE مداوا شده باشد (treated PTFE)

مورد ۴.۱.۲۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : Ppolyvinylidene (PVDF)

سیستم : راکتور

قسمت : لوله

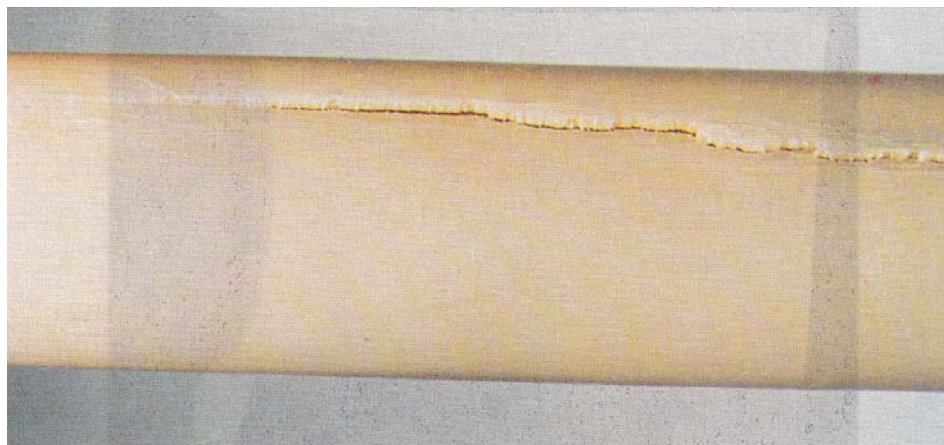
پدیده : خوردگی تنشی شکافی

مدت کارکرد : نامعلوم

ظاهر نمونه : ترک خوردگی

محیط : سود با غلظت ۲۰ - ۳۰ درصد حاوی هیپوکلرید سدیم ، و کلرات سدیم با حداکثر درجه حرارت °C

.۸۰



علت پدیده : ترک خوردگی بدلیل قلیائیت بسیار بالا و حرارت زیاد است .

روش اصلاح : در صورت امکان ، بایستی قلیائیت محیط و یا درجه حرارت کاهش یابد و در صورت عدم

امکان بایستی از مواد مناسب دیگر استفاده شود .

مورد ۴.۱.۲۳

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : پلی پروپیلن

سیستم : خط فرآیند (خط تولید)

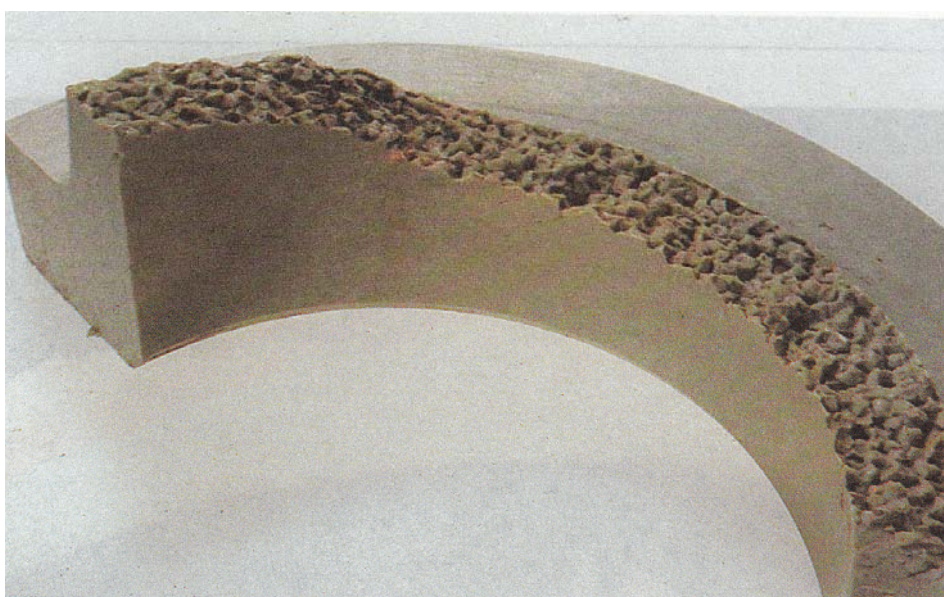
قسمت : فلانچ

پدیده : خسارات ناشی از خطا در طراحی ساخت

مدت کارکرد : یک سال

ظاهر نمونه : ظاهر نمونه حاکی از شکست دانه ای (بلورین) است .

محیط : علل تخریب ربطی به محیط ندارد .



علت پدیده : جوش خوردن نا مناسب دانه ها که ناشی از سیستم اکستروود کننده نامناسب است .

روش اصلاح : دقت در فرآیند ساخت و بهبود بازرسی نهایی توسط متصدی کارخانه .

جنس نمونه : پلی تترافلوئوراتیلن (PTFE) که روی فولاد به صورت پوشش قرار گرفته است .

سیستم : واحد کلرزنی

قسمت : لوله خروجی گاز

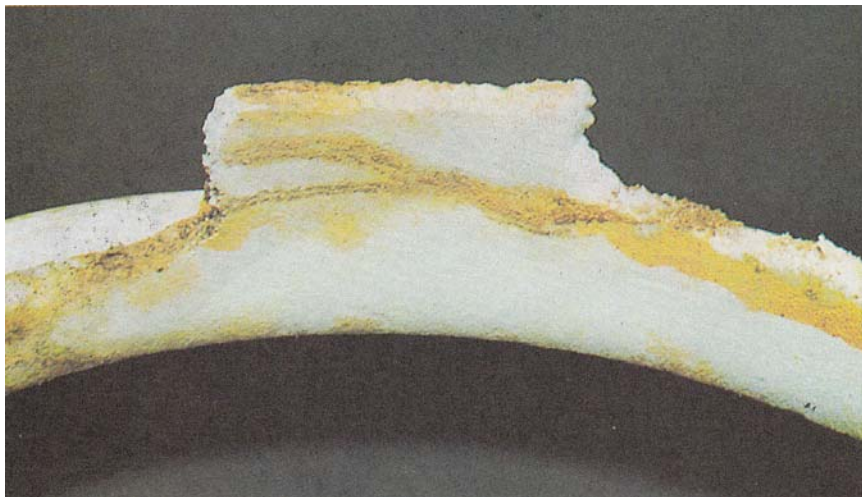
پدیده : خسارت ناشی از خطا در تولید

مدت کارکرد : در حدود یک ماه

ظاهر نمونه : ترک‌هایی روی نمونه مشاهده می شود (شکست ترد) .

محیط : محیط حاوی گازهای خنثی است که با اسید کلریدریک ، کلر و حلال‌ها آلوده شده است . دمای

محیط 150°C است که افت ناگهانی دما تا 40°C نیز در محیط وجود دارد .



علت پدیده : تف جوشی (Sintered) ضعیف PTFE سبب این مشکل می شود. ترک‌ها به دلیل نوسانات

دمایی به وجود می آیند .

روش اصلاح : با به کار بردن PTFE با تف جوش بهتر مشکل برطرف می شود . در واقع در انتخاب اولیه

مواد باید دقت بیشتری نمود .

مورد ۴.۱.۲۵

صنعت : پتروشیمی

جنس نمونه : الیاف شیشه ای (Fiberglass) تقویت شده با اپوکسی

سیستم : لوله انتقال بخار کندانه

قسمت : مقطع لوله

پدیده : نفوذ

مدت کارکرد : ۵ سال

ظاهر نمونه : پوشش ژلاتینی بصورت پولکی شکل در می آید .

محیط : بخار چگال شده با دمای 95°C .



علت پدیده: سرعت نفوذ در پوشش ژلاتینی بیشتر است . در نتیجه مایعات جمع شده در صفحه مرزی

سبب پولکی شدن پوشش ژلاتینی می شود .

روش اصلاح : با بکار بردن فولاد کربنی مشکل بر طرف می شود .

مورد ۴.۱.۲۶

صنعت : مولد برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه : پوشش رزینی فنل فرمالدئید پخته شده

سیستم : آب تغذیه دیگ بخار

قسمت : لوله های مکش مخزن آب تغذیه

پدیده : از بین رفتن پوشش

مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : بوجود آمدن تاول (Blister) در پوشش و بوجود آمدن خوردگی حفره ای در زیر این

مناطق

محیط : مخلوط آب جبرانی کندانس شده و نرم شده که شامل یونهای مهاجم و اکسیژن می باشد . دمای

این آب °C ۶۵-۶۰ می باشد .



علت پدیده : از آنجا که نحوه اعمال پوشش ، خوب نبوده است . پوشش ایجاد شده شامل حفراتی می باشد . این حفرات

باعث گردیده که آب در داخل پوشش نفوذ کرده و باعث تاول زدن ، بوجود آمدن زنگ و در نهایت کنده شدن

پوشش و تشدید خوردگی در اثر یونهای مهاجم شود .

روش اصلاح:

* عوض کردن لوله ها و بازسازی مناطقی که پوشش آن کنده شده با استفاده از پوشش اپوکسی که به صورت

سرد سخت می شود .

* ماسه پاشی مخزن و پوشش مجدد آن ، آزمایش پوشش با استفاده از آزمایش جرقه -----

(Spark – testing) برای مطمئن شدن از نبود حفرات در داخل پوشش

* ساخت مخزن از فولاد زنگ نزن

مورد ۴.۱.۲۷

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : پلی سولفون (PSU)

سیستم : فیلتر بیولوژیکی

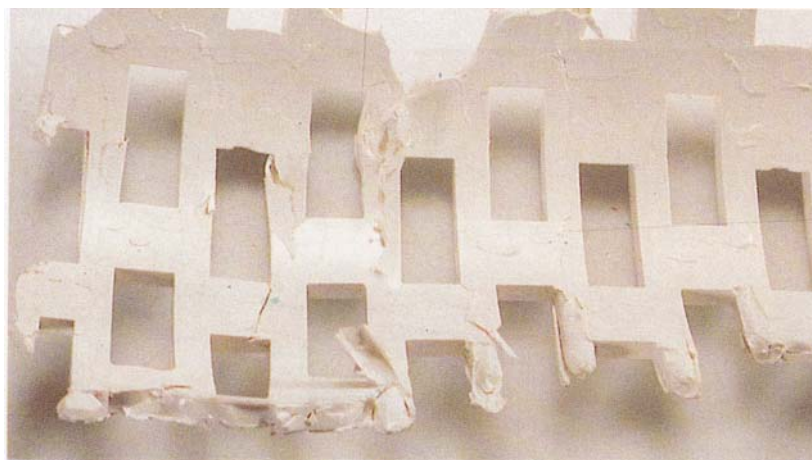
قسمت : نگه دارنده فیلتر

پدیده : تردی تنشی

مدت کارکرد : ۳ هفته

ظاهر نمونه : ترک خوردن

محیط : محلول اسید حاوی ۱٪ متیل ایزوبوتیل کتون (MIBK) و دمای °C ۴۰.



علت پدیده : پلی سولفون هنگامی که در معرض تنش قرار گیرد و حاوی MIBK (و یا استن، بنزن ،

بوتانول، ابر ، تتراکلرید کربن ، ایزوپروپانول ، اتیل بنزن ، اتیل بنزوات ، متیل گتن ، سیگلواتیل گتن ،

سیکلو هگزانون ، کربن دی سولفید و نیترو متانول) باشد ، به خوردگی تنشی حساس است .

روش اصلاح : ساختن نگه دارنده فیلتر از جنس پلی آمید (PA) .

جنس نمونه : لاستیک طبیعی (لاتکس)

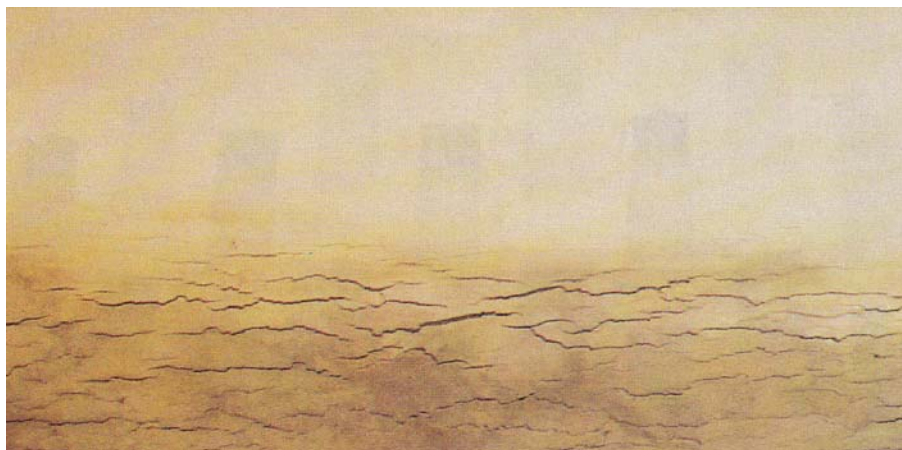
سیستم : اتصالات قابل انعطاف (خم شو) از ناودانی با سوراخهای بتونه شده

قسمت : مفصل آب بندی

پدیده : پیر شدن (ageing) مدت کارکرد : ۶ ماه

ظاهر نمونه : ترکهای موازی

محیط : آتمسفر صنعتی ، دمای محصول در ناودانی در حدود 40°C است .



علت پدیده : لاستیک طبیعی اگر در معرض نور قرار گیرد تخریب می شود به خصوص در معرض پرتو

ماوراء بنفش ، همچنین در حضور اکسیژن لاستیک توسط نور مرئی هم تخریب می شود (اکسیداسیون

نوری) که نهایتاً ترکهایی روی نمونه پدید می آید .

روش اصلاح : باید مفصل آب بندی را از جنس لاستیک سیلیکونی که مقاومت اتمسفری بهتری دارد ،

ساخته شود .

مورد ۴.۲.۱

صنعت: برق (نیروگاه حرارتی)

جنس نمونه: شیشه

سیستم: سیستم کندانسور بخار

قسمت: شیشه بازرسی کنترل بخار

پدیده: خوردگی اسید کربنیک

مدت کارکرد: ۶ ماه تا یک سال

ظاهر نمونه: نمونه به صورت یکنواخت مورد تخریب قرار گرفته است.

محیط: محیط خورنده با دمای $90-100^{\circ}\text{C}$.



علت پدیده: شیشه به آب کندانسه (آب مقطر) خورنده مقاوم نیست.

روش اصلاح: به منظور جلوگیری از تماس مستقیم شیشه با آب مقطر (آب کندانسه) باید پوششی از

جنس میکا روی شیشه بکار گرفته شود.

مورد ۴.۲.۲

صنعت : شیمیایی

جنس نمونه : شیشه

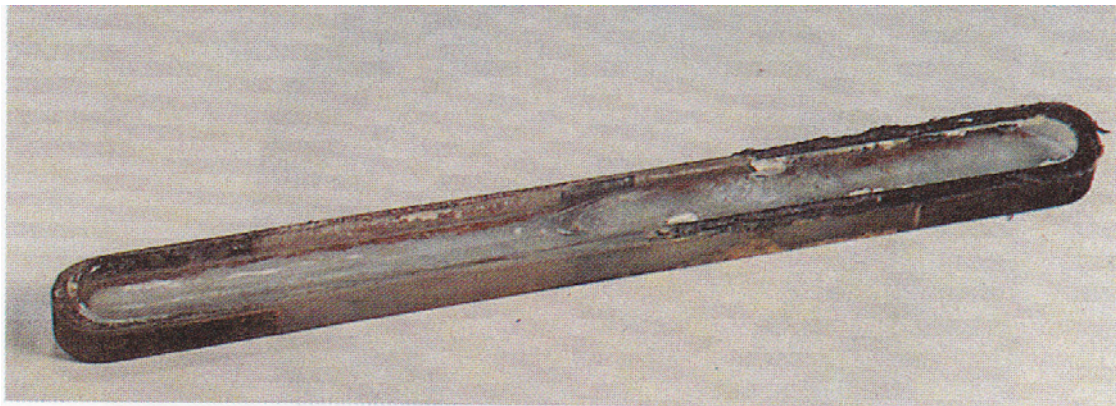
سیستم : دیگ بخار (دیگ بخار نوع Water tube با فشار ۴۱ بار

قسمت : شیشه مدرج (Gause glass)

پدیده : حمله قلیایی (Alkallinity attack) مدت کارکرد: نامعلوم

ظاهر نمونه : خوردگی یکنواخت در نواحی پایین شیشه مدرج (سمت چپ تصویر) .

محیط : آب دیگ بخار که قلیایی است . $\text{pH} = 11$



علت پدیده : شیشه در برابر آب قلیایی دیگ بخار مقاوم نیست و دچار خوردگی می گردد .

روش اصلاح : استفاده از شیشه مدرج که در محیط قلیایی مقاوم باشد .

حفاظت درجه با استفاده از یک پوسته میکایی (Mica shield)

جنس نمونه : فولاد کربنی (ASTM A ۱۰۶ Grade B)

سیستم : دستگاه تبخیر کننده (Evaporator) قسمت : لوله عمودی

پدیده : خوردگی حفره ای مدت کارکرد : ۳ سال

ظاهر نمونه : خوردگی موضعی به صورت حفرات ریز بلافاصله پس از محل اتصال لوله و صفحه لوله در سمت بخار ، صورت گرفته است .

محیط : داخل لوله : شربت قند ، بیرون لوله : بخار کندانس شده



علت پدیده : جهت اتصال لوله به صفحه لوله از والس استفاده شده است ، بدلیل نا هماهنگی بین طول والس و ضخامت صفحه ، طول قسمتی از لوله که پرچ می شود بیشتر از ضخامت صفحه است . در نتیجه در لوله ها ، بلافاصله بعد از لبه صفحه ، برآمدگی و تورم ایجاد می شود و تنش داخلی در این مناطق زیاد است . این مناطق بعنوان نواحی فعال آندی عمل کرده و خوردگی حفره ای در آنها صورت می گیرد . همچنین میزان بالای کلرور و سولفور در بخار ورودی به محفظه گرم کننده سبب تشدید خوردگی می شوند .

روش اصلاح : با طراحی صحیح و کوتاه کردن طول والس (باندازه ضخامت صفحه لوله) مشکل برطرف می شود .

مورد ۴.۳.۱

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : بتن آرمه

سیستم : کف ساختمان

قسمت : المان پیش ساخته کف بتن

پدیده : خوردگی میل‌ه‌های تقویت کننده ناشی از کلرور

مدت کارکرد : حدود ۱۲ سال

ظاهر نمونه : ترک خوردگی سطح که نشان دهنده خوردگی شدید در میل‌ه‌های بتنی است .

محیط : فضای آزاد و خاک مرطوب



علت پدیده : یون‌های کلر بعنوان تسریع کننده در عملیات اختلاط مورد استفاده قرار گرفته اند . (حدوداً ۱٪)

یون Cl^- به وزن سیمان اضافه می شود) . در شرایطی که بتن مرطوب باشد ، زمینه برای خوردگی میل‌ه

های تقویت کننده مساعد گردیده ، محصولات خوردگی ، لایه های سطحی بتن را با فشار کنار می زنند .

روش اصلاح :

- میل‌ه‌های تقویتی و لایه پوشاننده سطحی را تعویض کنید .

- میل‌ه‌های فولادی بتن را حفاظت کاتدی نمایید .

مورد ۴.۳.۲

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : بتن آروه

قسمت : پایه بتنی

سیستم : جاده ساحلی

مدت کارکرد : ۱۵ سال

پدیده : خوردگی اتمسفری

ظاهر نمونه : ساییدگی و از بین رفتن موضعی بتن به همراه خوردگی یکنواخت در قسمت‌های تقویتی .

محیط : اتمسفر حاوی نمک بالا



علت پدیده : نفوذ آب نمک از پوشش بتنی با ضخامت نا کافی سبب ایجاد غلظت بالای کلرور و تقلیل pH

در سطح فولاد گردیده در نتیجه خوردگی میله های تقویتی رخ داده و پوشش بتنی با فشار بیرون رانده

شده است . برای پیش گیری از این خوردگی یک قطعه فولاد گالوانیزه توسط تسمه هایی از جنس فولاد

زنگ نزن به پایه بتنی اتصال یافته است .

روش اصلاح : استفاده از میله های تقویتی و آرماتورهای گالوانیزه یا پوشش دار ، همچنین بکار گیری

پوشش بتنی ضخیم تر .

جنس نمونه : بتن آرمه

سیستم : بتن آرمه یک بلوار قسمت : جدا کننده بتن (Concrete Separation)

پدیده: خوردگی اتمسفری (پوسیدگی بتن) مدت کارکرد : حدود ۱۵ سال

ظاهر نمونه : پوسیدگی کلی یا جزیی در سازه بتنی ، به علاوه خوردگی یکنواخت در قسمتهای بتنی .

محیط : اتمسفر دریایی با خیس شدن منظو بوسیله پاشش آب دریا



علت پدیده : خوردگی در قسمتهای تقویتی توسط حمله بسیار قوی و شدید اسیدی انجام شده و در نتیجه

باعث از بین رفتن پوشش بتنی در اثر فشار شده است .

روش اصلاح : جایگزینی کلی سیستم با بتن آروه دارای آرماتورها و تقویت کننده های پوشش دار . (فولاد

گالوانیزه گرم و یا پوشش پودر اپوکسی به ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرون) .

مورد ۴.۳.۴

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : بتن آرمه

سیستم : ساختمان

قسمت : پانل های نمای ساختمان

پدیده : خوردگی اتمسفری (پوسیدگی بتن)

مدت کارکرد : ۱۰ سال

ظاهر نمونه : قطعاتی از لبه های پانل ها شکسته و افتاده اند .

محیط : اتمسفر دریایی - صنعتی



علت پدیده : خوردگی آرماتورها و میلله های تقویتی ناشی از نفوذ رطوبت ، CO_2 و SO_2 می باشد . بر اثر نفوذ این مواد pH بتن به کمتر از ۷ رسیده ، موجب خوردگی سطح فولاد می گردد و در نتیجه حجم زیاد محصولات خوردگی ، به طور موضعی پوشش بتنی را کنار می زنند . این پدیده به « خوردگی میلله های تقویتی بتن » یا Rebar Corrosion معروف است .

روش اصلاح :

- استفاده از آرماتورهای گالوانیزه و یا دارای پوشش پودر اپوکسی (Epoxy powder coating)
- استفاده از پوشش بتنی ضخیم تر و با کیفیت بهتر .

جنس نمونه : بتن آرمه

قسمت : پله ها

سیستم : پل هوایی عابر پیاده

پدیده : خوردگی اتمسفری (حمله نمکی «آب شدن برفک» " frost thaw ") مدت کارکرد : ۲ سال

ظاهر نمونه : پوشش سیمانی بصورت تکه تکه کنده شده و سنگریزها قابل مشاهده هستند.

محیط : اتمسفر روستایی .



علت پدیده : نمک موجود در جاده و خیابان ، نقطه انجماد آب را بسیار کاهش می دهد از آنجا که همواره با کاهش دما ، ابتدا در داخل بتن لایه منجمد تشکیل شده و سپس سطح آن یخ می زند . در نتیجه ، آب منجمد شده موجود در لایه میانی انبساط می یابد (حجم آب بر اثر انجماد افزایش می یابد) و لذا می تواند سطح و پوشش رویی بتن را با فشار به کنار زده و تخریب نماید .

روش اصلاح :

- کاهش میزان آب موجود (نسبت آب - سیمان کمتر از ۰/۴) و یا برای مقادیر بیشتر آب - سیمان از هوادهی استفاده نمایید (حبابه‌ای ریز و پراکنده هوا ، باعث تسهیل در انبساط آب می گردند) .
- در این مورد خاص ، از یک پوشش سطحی جدید باید استفاده شده و پله ها مجدداً ترمیم و مرمت شوند

مورد ۴.۳.۶

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : بتن آروه

سیستم : ساختمان آپارتمانی

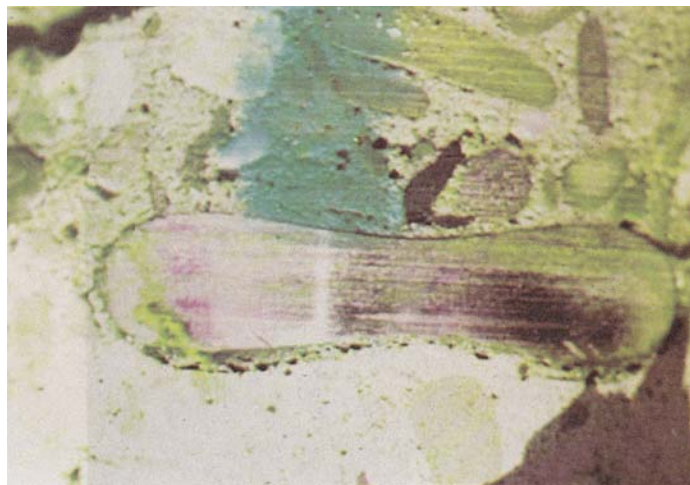
قسمت : راهرو ساختمان

پدیده : خوردگی اتمسفری (کربناسیون)

مدت کارکرد : حدود ۱۵ سال

ظاهر نمونه : لایه زنگ یکنواخت روی سطح خارجی سازه

محیط : اتمسفر شهری



علت پدیده : واکنش دی اکسید کربن (CO_2) منتشر شده از هوا با هیدروکسید کلسیم ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

موجود در بتن، باعث گردیده است که فولادهای آرماتور در محیط اسیدی حاصله مورد حمله خوردگی قرار بگیرند. قسمت خارجی هسته آرماتور کربناته بوده، در حالی که بتن پشت آرماتورها کماکان قلیایی است (معرف را قرمز رنگ می نماید).

روش اصلاح : در این مورد، کافی بود که تنها بتن را بوسیله یک پوشش محکم و چسبنده ایزوله و آبندی نماییم. در حالتهای شدیدتر کربناسیون، لایه قدیمی باید برداشته شده و یک لایه تازه جایگزین آن گردد.

جنس نمونه : بتن آرمه

قسمت : سقف انبار

سیستم : یک انبار کود مرغی

پدیده : خوردگی میکروبیولوژیکی (حمله بیولوژیکی حاصله از اسید سولفوریک) مدت کارکرد : ۱۸ سال

ظاهر نمونه : پوشش بتنی حل شده و از بین رفته است . همچنین تعدادی از قطعات تقویتی نیز دچار خوردگی گردیده اند .

محیط : محیط بسته پر از کود و فضولات مرغ و خروس .



علت پدیده : ترکیبات سولفور موجود در فضولات طیور توسط SRB بصورت بی هوازی به H_2S تبدیل می شوند که در نتیجه در محیط پراکنده شده و در لایه آب کندانسه شده روی دیوارها و سقف حل می گردد . در آنجاست که توسط باکتری گوگرد بصورت هوازی، H_2S به اسید سولفوریک تبدیل شده ، بتن و تقویت کننده را مورد حمله قرار می دهد .

روش اصلاح : از بتن دارای چگالی بالا استفاده نموده ، روی آن یک پوشش اضافی (لایه فداشونده) اعمال کنید . تعمیر : بتن خورده شده را بتراشید ، میله های خورده شده را ماسه زنی یا ساچمه زنی نمایید ، در صورت لزوم آرماتورهای اضافی بکار برید و سپس بتن تازه با چگالی بالا به همراه پوشش اضافی اعمال کنید . همچنین می توان از پوشش رنگ دو جزئی بر پایه رزین اپوکسی استفاده نمود .

جنس نمونه : بتن معمولی

قسمت : لوله پیش ساخته فاضلاب

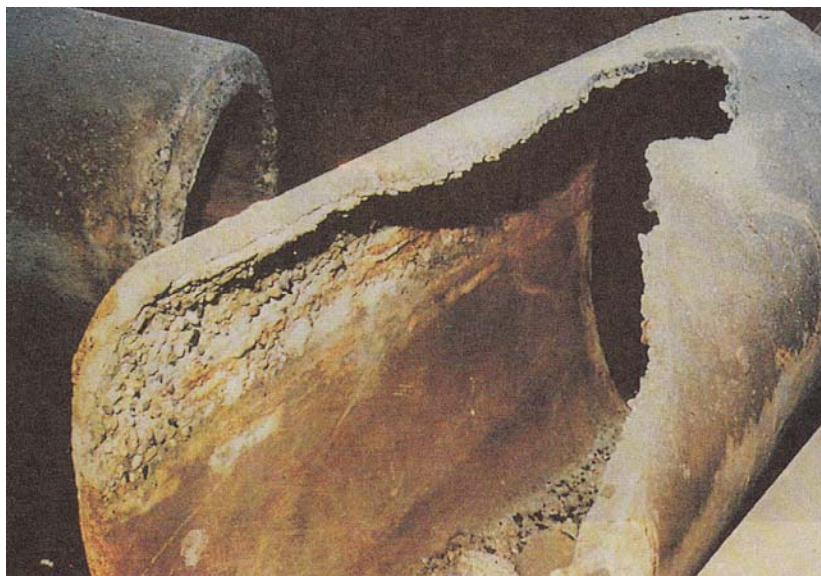
سیستم : فاضلاب

پدیده : خوردگی میکروبیولوژیکی (حمله بیولوژیکی اسیدسولفوریک)

مدت کارکرد : حدود ۲۰ سال

ظاهر نمونه : تکه های خرد شده در لوله پوسیده مشاهده می گردد .

محیط : فاضلاب شهری که به دلیل نصب غیر اصولی لوله ها ، فاضلاب حالت ساکن داشته است .



علت پدیده : در اثر عمل باکتریهای بی هوازی بر فاضلاب ساکن ، H_2S تولید می گردد . این H_2S تولیدی

به وسیله عمل باکتریهای هوازی موجود در فضای بالای سطح مایع تبدیل به اسیدسولفوریک می شود که

موجب گردیده است سیمان موجود در دیواره بالایی لوله حل شده و از بین برود .

روش اصلاح :

- از ساکن شدن فاضلاب در لوله ها به مدت طولانی جلوگیری کنید (با طراحی صحیح) .

- انجام تهویه توسط هوای تازه

- حفاظت بتن توسط پوشش ضد اسید نظیر پوششهای پلیمری .

مورد ۴.۳.۹

صنعت : ساختمانی

جنس نمونه : بتن آروه

سیستم : دیواره تونل

قسمت : دیواره تونل با یک قطعه فولاد تقویتی

پدیده : حمله کلریدی

مدت کارکرد : ۱۱ سال

ظاهر نمونه : خوردگی حفره ای موضعی شدید روی قطعه فولادی .

محیط : بتن مرطوب دارای ۱٪ کلرید (بر اساس ماده خشک اولیه) . علت پدیده : کلرید از آب محیط به

داخل بتن انتشار می یابد و بدلیل اختلاف موضعی در غلظت کلرید . خوردگی گالوانیک در فولاد تقویتی رخ

می دهد . در این میان ، تعدادی از میله ها بدلیل تشکیل پیلهای غلظتی مذکور کاتد گردیده و خورده نمی

شوند (مرکز عکس سمت چپ) .



روش اصلاح : بتن را برداشته ، میله های خورده شده را سند پلاست کرده و پوشش دهید، سپس بتن تازه

اعمال نمایید .

- ١ . Hector A. Videla, Corrosion Atlas, third edition, ١٩٩٧ by Elsevier Science publisher, ٨١٠ Pages.
- ٢ . Betz, Handbook of Industrial water conditioning, ٨th edn (١٩٨٠).
- ٣ . Trethewey, K. R. and chamberlain J. corrosion for students of science and Engineering (١٩٨٧).
- ٤ . Herro. H. M. The NALCO Guide to Cooling Water Failure Analysis, Mc Graw xHill Book Company New York, (١٩٩٣).
- ٥ . Robert D. Port & Harvey M. Herro. The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis, MC Graw Hill Book Company, New York, ١٩٩١.
- ٦ . During, Evert D. D.
Corrosion atlas: a collection of illustrated case histories ١٩٨٨-١٩٩١.



Corrosion Control in industry



Vol. 3

Dr. S. M. Seyed Razi