اکسید اسیون انتخابی کرم اتفاق می افتد، موقعی‌که برای ترکیب با اکسیژن رقابتی در میان باشد، عناصری که دارای انرژی آزاد تشکیل اکسید بیشتری هستند (میل ترکیبی بیشتری با اکسیژن دارند)، به میزان بیشتری اکسید می‌شوند. در مورد فولادهای زنگ نزن، این حالت منجر به تشکیل پوستهٔ محافظ تری می‌شود، ولی فلز باقیمانده روی سطح از نظر کرم فقیر خواهد شد. این پدیده بوسیلهٔ هُلزوارت و ترکس[۱] به روشنی اثبات گردید. ثابت شد که حفره دار شدن زه های اتوموبیلها که از جنس فولاد زنگ نزن از نوع ۴۳۰ (۱۷ درصد کرم) می‌باشند، در اثر تخلیهٔ کرم لایه های سطحی در عملیات آنیل براق کننده[۲] می‌باشد. مقدار کرم نزدیک سطح فولاد تا میزان ۱۱ درصد کرم تقلیل پیدا کرده بود. در یک مورد غیر عادی[۳] در حمامهای نمک کلرور و فلوئور پتاسیم و سدیم در ۱۴۷۵ درجهٔ فارنهایت جدایش انتخابی کرم وآهن از اینکونل (٪۷۵ نیکل، ٪۱۵ کرم و ٪۹ آهن) مشاهده گردید. آلیاژ تبدیل به یک جرم متخلخل شده و بلا استفاده گردید.

خوردگی سایشی[۴]

خوردگی سایشی عبارتست از سرعت یافتن یا افزایش سرعت خوردگی یا از بین رفتن یک فلز در اثر حرکت نسبی بین یک مایع خورنده و سطح فلز. معمولاً این حرکت خیلی سریع است و اثرات سایش مکانیکی و یا سائیده شدن وجود دارد. یونهای فلزی حل شده روی سطح فلز در اثر حرکت روی سطح باقی نمی مانند، یا محصولات جامد حاصل از خوردگی از سطح فلز بطریق مکانیکی کنده می‌شوند. گاهی اوقات حرکت باعث تقلیل سرعت خوردگی می‌گردد، مخصوصاً موقعی‌که تحت شرایط ساکن خوردگی موضعی اتفاق بیفتد، لکن این خوردگی سایشی نیست، زیرا سرعت خوردگی افزایش نیافته است.

خوردگی سایشی دارای ظاهری شیار دار[۵]، موجی شکل، سوراخهای کروی شکل و ناهموار می‌باشد و معمولاً این اشکال در جهت خاصی قرار گرفته‌اند. شکل ۳۸-۳ ظاهر موجی شکل خوردگی سایشی را نشان می‌دهد. این پروانه پمپ بعد از سه

1- R.V.Trax and J.C.Holzwarth, *Corrosion*, Vol.16: P.105-108 (1960).

2- Bright annealing

3- R.Bakish and F.Kern, ibid.,P.89-90.

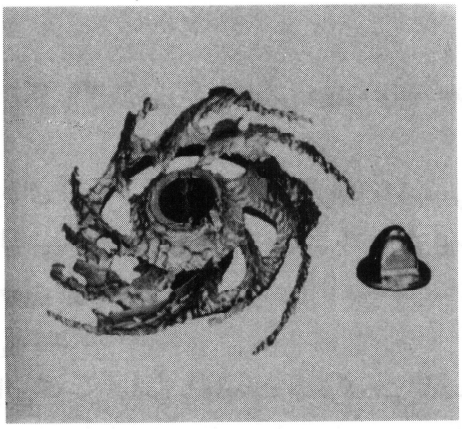
4- Erosion Corrosion

5- Gullies

هفته کار به این صورت در آمده است. شکل ۳۹-۳ نشان دهنده خوردگی سایشی لوله مبدل حرارتی حاوی آب بطور شماتیکی می‌باشد.

در اکثر موارد انهدامهای ناشی از خوردگی سایشی در زمانهای کوتاهی اتفاق می‌افتند، و غیره منتظره بودن آنها عمدتاً بدین خاطر است که آزمایشات خوردگی تحت شرایط ساکن و یا بدون در نظر گرفتن اثرات سایشی انجام گرفته است.

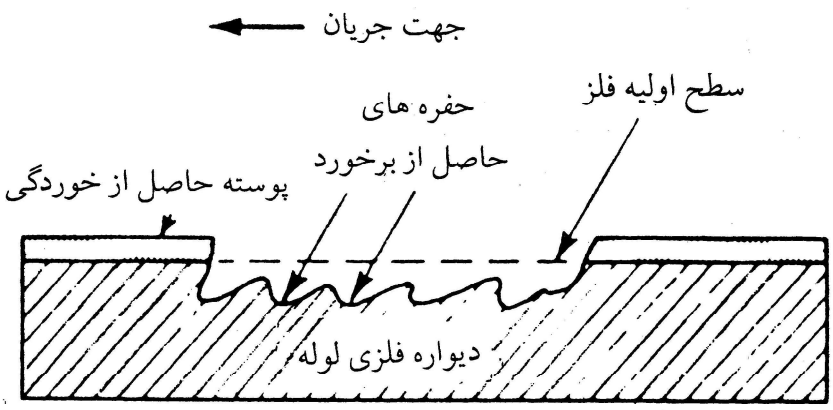
اکثر فلزات و آلیاژها مستعد به خوردگی سایشی هستند. در بسیاری از آنها مقاومت در مقابل خوردگی بستگی به نوع پوسته سطحی (غیر فعال شدن) دارد. مثالهائی در این مورد عبارتند از آلومینیم، سرب و فولاد زنگ نزن. موقعی که این



شکل ۳۸-۳ خوردگی سایشی پروانهٔ پمپ از جنس فولاد زنگ نزن

پوسته‌های محافظ سطحی صدمه ببینند یا سائیده بشوند خوردگی سایشی اتفاق می‌افتد و در نتیجه فلز یا آلیاژ با سرعت بالائی خورده می‌شوند. فلزاتی که سختی پائینی دارند و بسهولت صدمه می بینند یا به طریق مکانیکی زود سائیده می‌شوند، مثل مس و سرب، خیلی مستعد به خوردگی سایشی می‌باشند.

تعداد زیادی از محیطهای خورنده می‌توانند باعث خوردگی سایشی گردند. که



شکل ۳۹-۳ خوردگی سایشی دیواره لولهٔ کندانسور

شامل گازها، محلولهای آبی، سیستمهای آبی و فلزات مذاب می‌باشد. مثلاً گازهای گرم ممکن است فلز را اکسید نمایند و سپس سرعتهای بالای گاز پوسته محافظ روی آن را از بین برد. جامدات معلق در مایعات (گل و لای)[1] مخصوصاً از نقطه نظر خوردگی سایشی مخرب می‌باشند.

کلیه تجهیزاتی که در تماس با مایعات متحرک می‌باشند در معرض خوردگی سایشی قرار دارند. بعضی از این تجهیزات عبارتند از: سیستمهای لوله کشی، مخصوصاً زانوها[2] یا پیچ ها[3]، و سه راهی‌ها[4]، شیرها[5]، پمپ های دمنده ها، دستگاههای گریز از مرکز، پروانه ها[6] بهم زنها[7]، و تانکهای متحرک[8]، لوله های مبدلهای حرارتی مثل بویلرها و کندانسورها. پره های توربین، افشانه ها، خطوط نجار و دودکش ها،

1- Slurries
2- Elbow
3- Bend
4- Tees
5- Valves
6- Propellers , impellers
7- Agitators
8- Agitated

گیوتین ها[۱]، زره های آسیابها[۲]، آسیابها و تجهیزاتی که در معرض پاشیدن[۳] قرار دارند.

بعلت وجود خوردگی در فرآیند خوردگی سایشی، بایستی کلیه فاکتورهائی که بر خوردگی اثر می‌گذارند در نظر گرفته شوند. البته در اینجا تنها فاکتورهائی که در رابطه مستقیم با خوردگی سایشی قرار دارند بررسی خواهند شد.

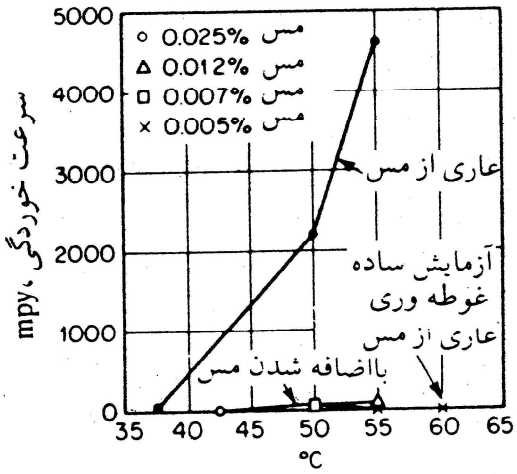
۲۹-۳ پوسته‌های سطحی

ماهیت و خواص پوسته های محافظ سطحی که روی بعضی فلزات و آلیاژها تشکیل می‌گردد از نظر مقاومت در برابر خوردگی سایشی خیلی اهمیت دارد. توانائی این پوسته ها برای حفاظت فلز بستگی به سرعت یا سهولت تشکیل آنها در مراحل اولیه و تماس با محیط خورنده، مقاومت آنها در مقابل خسارات مکانیکی یا سایش، و سرعت تشکیل مجدد آنها در صورت صدمه دیدن یاازبین رفتن دارد. پوسته سطحی که سخت، متراکم، چسبنده و پیوسته باشد نسبت به موقعیکه پوسته بسهولت سائیده و یا کنده شود حفاظت بهتری بوجود خواهد آورد. اگر پوسته ترد باشد وتحت تنش ترک بخورد و خرد بشود دیگر محافظ نخواهد بود. گاهی اوقات ماهیت پوسته محافظی که روی سطح یک فلز بوجود می آید بستگی به محیط خورنده‌ای که فلز در آن قرار دارد خواهد داشت، که این عامل تعیین کننده مقاومت خوردگی سایشی در آن محیط می‌باشد.

مقاومت خوردگی فولادهای زنگ نزن بعلت غیر فعال شدن آنهاست. در نتیجه این آلیاژها مستعد به خوردگی سایشی می‌باشند. در شکل ۴۰-۳ خوردگی سریع فولاد زنگ نزن ۳۱۶ توسط لجن اسید سولفوریک - سولفات فرو با سرعت بالا نشان داده شده است. در ۵۵ درجه سانتیگراد سرعت خوردگی حدود ۴۸۰۰mpy میباشد. در شرایط ساکن این آلیاژ اصلاً تقلیل وزن نداشته و کاملاً غیر فعال است که توسط X بر روی محور در ۶۰ درجهٔ سانتیگراد نشان داده شده است. پروانه شکل ۳۸-۳ تقریباً دو سال عمر می کرد. موقعی‌که محلولی را که به وسیله آن پمپ می‌شد احیاً کننده تر نمودند، در نتیجه پوسته پسیو از بین رفته و عمر آن به سه هفته تقلیل پیدا کرد.

1- Cutters
2- Plates Wear
3- Spray

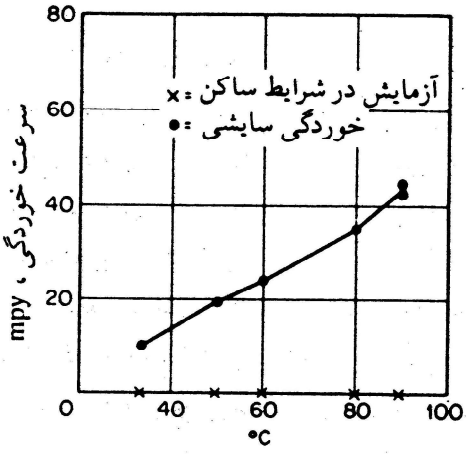
مقاومت طویل‌المدت سرب در محیط های اسید سولفوریک، بستگی به پوسته محافظ سولفات سرب - اکسید سرب دارد و در اکثر موارد عمر آن به ۲۰ سال می‌رسد. موقعی که سرب در معرض اسید سولفوریک قرار می‌گیرد به واسطه پوشش سطحی یا محصولات حاصل از خوردگی افزایش وزن پیدا می‌کند مگر در اسید قوی که در این مورد پوسته مزبور در اسید محلول بوده و محافظ نخواهد بود. با وجود این، والوهای سربی و زانوهای سربی در یک کارخانه توسط محلول ۳ درصد اسید سولفوریک



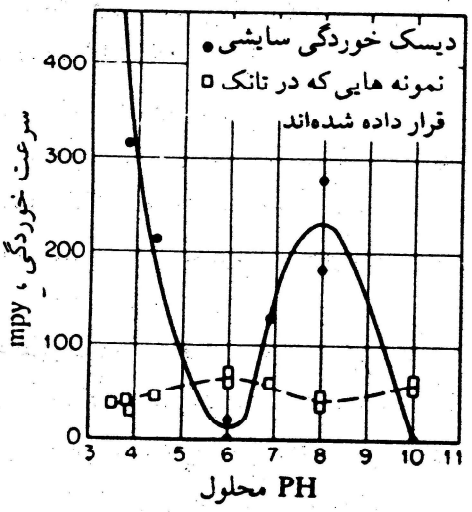
شکل ۴۰-۳ اثر درجه حرارت وافزایش یون مس برخوردگی سایشی آلیاژ ۳۱۶ بوسیله لجن اسید سولفوریک (سرعت ۳۹ ft/sec)

در ۹۰°C به سرعت خورده شدند. در اثر این انهدام ها آزمایشات خوردگی سایشی انجام گرفت و نتایج در شکل ۴۱-۳ رسم شده است. تحت شرایط ساکن سرب خورده نمی‌شد (حتی مقدار کمی افزایش وزن داشت). همان طورکه در شکل نشان داده شده است در سرعتهای بالا با افزایش درجه حرارت سرعت خوردگی افزایش می‌یابد.

تغییرات سرعت خوردگی فولاد بوسیله آب ساکن در pH های مختلف ظاهراً به خاطر ماهیت و ترکیب پوسته های سطحی است که بوجود می آیند. در شکل ۴۲-۳ اثر pH



شکل ۴۱-۳ خوردگی سایشی سرب سخت بوسیله محلول ۱۰ درصد اسید سولفوریک (سرعت ft/sec ۳۹)



شکل ۴۲-۱۳اثر pH آب مقطر برخوردگی سایشی فولاد کربنی در $50^{\circ}C$ (سرعت ft/sec ۳۹)

آب مقطر در ۵۰°C برخوردگی سایشی فولاد کربنی نشان داده شده است. سرعت خوردگی در pH های ۶، ۱۰ پائین است و در pH های ۸ و کمتر از ۶ سرعت خوردگی بالاست. پوستهٔ روی نمونه هائی که سرعت خوردگی زیادی از خود نشان داده‌اند، دانه‌ای بوده که از Fe_3O_4 تشکیل شده بود. در pH های کمتر از ۵ پوسته ترک می‌خورد که احتمالاً در اثر تنشهای داخلی بوده و فلز تازه در معرض محیط قرار گرفته است. در نواحی که سرعت خوردگی پائین است، محصولات خوردگی $Fe(OH)_2$، $Fe(OH)_3$ بوده که محافظتر می‌باشند زیرا از انتقال اکسیژن و یونها جلوگیری نموده‌اند. آزمایشات خوردگی سایشی در آب تغذیه بویلر در ۲۵۰°F با استفاده از تجهیزات متفاوت دیگری و همچنین تجربیات نیروگاهها نتایج بالا بودن سرعت خوردگی در pH =۸ را تائید می‌کنند. نتایج آزمایشات مس و برنج در محلولهای کلرور سدیم حاوی اکسیژن نشان می‌دهند که در محلولهای اشباع با اکسیژن، مس بیشتر از برنج خورده می‌شود. پوسته روی مس پوسته سیاه و زرد متمایل به قهوه‌ای ($CuCl_2$) بوده است. سطح برنج باپوسته خاکستری تیره (CuO) پوشیده شده بود. مقاومت بهتر برنج در مقابل خوردگی به پایداری بیشتر یاحفاظت کنندگی بیشتر پوسته خاکستری تیره نسبت داده می‌شود.مشکلاتی در به دست آوردن نتایج قابل تکرار به وجود آمد تا موقعی‌که یک روش کنترل شدهٔ تمیز کردن بامواد قلیایی و خشک کردن برای نمونه اتخاذ شد، این نشان می دهد که پوسته های سطحی که روی مس و برنج تشکیل می شود در اثر تماس باآتمسفر، سایش، یا دلایل دیگر می تواند اثر مشخصی روی عملکرد خوردگی - سایشی در بعضی شرایط بگذارد.

تیتانیم فلز فعالی است، لکن در اکثر محیط ها در مقابل خوردگی سایشی مقاوم است زیرا پوسته TiO_2 که روی سطح آن تشکیل می‌شود از پایداری بالائی برخورداراست. مقاومت آن در آب دریا و محلولهای حاوی کلرور و همچنین اسید نیتریک دودکننده[1] عالی است.

رفتار لوله های فولادی و فولادهای کم آلیاژی در مقابل مواد نفتی در درجه حرارتهای بالا در پالایشگاه ها بستگی به پوسته سولفیدی بوجود آمده روی سطح لوله دارد. موقعی‌که پوسته فرسوده شود، خوردگی بالائی اتفاق می افتد. مثلاً موقعی‌که در این سیستمهای آلی سیانیدها وجود داشته باشند، پوستهٔ سولفیدی محکم و یکپارچه،

1- Fuming

متخلخل شده و دیگر محافظ نخواهد بود.

استفاده صحیح و موثر ممانعت کننده ها در تقلیل خوردگی سایشی در اکثر موارد بستگی به ماهیت و نوع پوستهٔ روی فلز و در نتیجه واکنش بین فلز و ممانعت کننده دارد.

۳۰-۳ سرعت حرکت

سرعت حرکت در خوردگی سایشی رل مهمی بعهده دارد. غالباً سرعت بشدت بر مکانیزم واکنشهای خوردگی اثر می‌گذارد. همچنین سرعتهای بالا باعث سایش مکانیکی می‌گردند، مخصوصاً موقعی‌که محلول حاوی جامدات معلق می‌باشد. در شکلهای ۴۰-۳، ۴۱-۳ افزایش شدید سرعت خوردگی در اثر سرعت حرکت نشان داده شده است. شکل ۴۲-۳ نشان می‌دهد که اگر فاکتور سرعت در نظر گرفته نشود یا سرعت حرکت کم باشد، نتایج کاملاً گمراه کننده خواهد بود. نمونه های آزمایشات استاتیک در این شکل کاملاً هم در حالت سکون نبودند بلکه در تانک، مایع اندکی بهم می‌خورده است. در جدول ۱۰-۳ اثر سرعت حرکت برخوردگی بعضی فلزات و آلیاژها در آب دریا نشان داده شده است. این اطلاعات نشان می‌دهند که اثر سرعت بین صفر تا مقادیر بالائی متغیراست.

افزایش سرعت حرکت معمولاً باعث افزایش خوردگی میگردد. اثر سرعت ممکن است تا رسیدن به یک سرعت بحرانی صفر باشد یا خیلی کم، و به مجرد رسیدن به سرعت بحرانی به شدت افزایش یابد. جدول ۱۰-۳ چند مثال را در این مورد نشان می‌دهد، افزایش سرعت از یک تا ft/sec ۴ تاثیر کمی بر سرعت خوردگی داشته لکن در سرعت ۲۷ ft/sec خوردگی شدیدی به وجود آمده است. در مورد فلزات پائین جدول سرعت بالای فوق الذکر کمتر از سرعت بحرانی برای آنهاست.

خوردگی سایشی می‌تواند روی فلزات و آلیاژهائی واقع شود که در سرعتهای کم در محیط مورد نظر کاملاً مقاوم بوده‌اند. مثلاً اجزاً والوهای فولاد زنگ نزن کرم دار ساده در حالت سخت شده در اکثر کاربردهای مشتمل بر بخار دارای مقاومت عالی هستند، لکن در والوهای تروتل یا تقلیل دهنده در فشارهای بالا[1] شیار شیار میشود (پدیده کشش سیم).

افزایش سرعت بسته به اثر آن بر مکانیزم خوردگی ممکن است باعث افزایش و

1- High pressure steam reducing or throttling valves

جدول ۱۰-۳ خوردگی فلزات به وسیله آب دریا با سرعتهای مختلف

آلیاژ	سرعت خوردگی، mdd[۱]		
	۱ فوت بر ثانیه[۲]	۴ فوت بر ثانیه[۳]	۲۷ فوت بر ثانیه[۴]
فولاد کربنی	۳۴	۷۲	۲۵۴
چدن	۴۵	—	۲۷۰
برنز سیلیسیم	۱	۲	۳۴۳
برنج آدمیرالتی	۲	۲۰	۱۷۰
برنز هیدرولیکی	۴	۱	۳۳۹
برنز G	۷	۲	۲۸۰
برنز آلومینیم(۱۰٪ آلومینیم)	۵	-	۲۳۶
برنج آلومینیم	۲	—	۱۰۵
۹۰ مس - ۱۰ نیکل(۰/۸ آهن)	۵	—	۹۹
۷۰ مس -۳۰ نیکل (۰/۰۵ آهن)	۲	—	۱۹۹
۷۰ مس - ۳۰ نیکل (۰/۵ آهن)	<۱	<۱	۳۹
مونل	<۱	<۱	۴
فولاد زنگ نزن نوع ۳۱۶	۱	۰	<۱
هاستولی C	۱	—	۳
تیتانیم	۰	—	۰

۱- میلی‌گرم بر دسی‌متر مربع بر روز
۲- غوطه وری در منطقه جزر و مد
۳- غوطه‌وری در جریان آب دریا
۴- متصل به دیسک دوار غوطه‌ور شده
منبع : شرکت بین المللی نیکل (INCO)

یا کاهش سرعت خوردگی گردد. می تواند باعث افزایش سرعت خوردگی فولاد با رساندن بیشتر اکسیژن، دی اکسید کربن، یا سولفید هیدروژن به سطح فلز گردد.

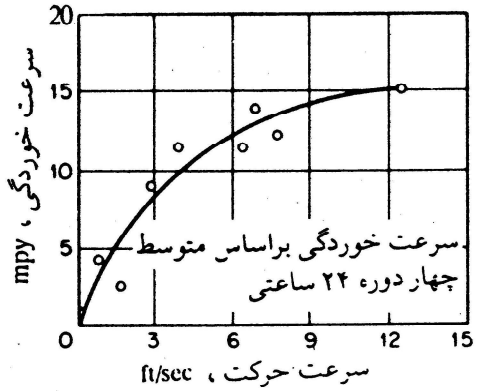
در حضور ممانعت کننده های خوردگی افزایش سرعت حرکت می‌تواند با رساندن ممانعت کننده ها به سطح فلز با سرعت بیشتر باعث کم شدن سرعت خوردگی گردد. نشان داده شده است که برای حفاظت فولاد در آب آشامیدنی در سرعتهای حرکت بالا، نیتریت سدیم کمتری لازم است.
مکانیزمهای مشابهی برای دیگر انواع ممانعت کننده ها پیشنهاد شده است.

سرعتهای بالاتر نیز همچنین می تواند در بعضی موارد سرعت خوردگی را کاهش دهد با جلوگیری کردن از راسب شدن لجن یا کثافات که در غیر این صورت باعث خوردگی شیاری می شوند. از طرف دیگر، جامدات معلق در سرعتهای بالای سیال می‌تواند اثرات سایشی داشته و حفاظت سطحی را از بین ببرند.
این حالت در ارتباط با شکل ۴۰-۳ اتفاق افتاده که شامل خوردگی سایشی سریع سانتریفوژ فولاد زنگ نزن از نوع ۳۱۶ برای انتقال لجن اسید سولفوریک بود.

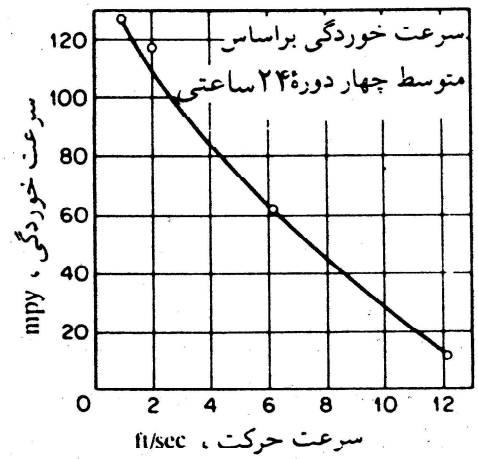
مطالعات خوردگی سایشی آلومینیم و آلیاژهای زنگ نزن در اسید نیتریک دودکننده نتایج غیر منتظره و جالبی بوجود آورده‌اند، با افزایش سرعت حرکت، خوردگی آلومینیم افزایش یافت و خوردگی فولاد زنگ نزن ۳۴۷کم شد. علت این رفتار این بود که مکانیزم خوردگی در دو حالت با هم فرق می‌کردند. در شکل ۴۳-۳ افزایش سرعت خوردگی آلومینیم با افزایش سرعت حرکت نشان داده شده است. در اسید نیتریک دودکننده آلومینیم تشکیل نیترات آلومینیم و اکسید آلومینیم می‌دهد. در حالت ساکن یا سرعت خیلی کم، سرعت خوردگی کم بوده یا اصلاً صفر می‌باشد. در سرعتهای متوسط ۱ تا ۴ فوت بر ثانیه، پوسته نیترات از بین می‌رود، لکن این آن‌قدر نیست که پوسته چسبنده تر اکسیدی را از بین ببرد. سرعتهای بالای ft/sec ۴ قسمت اعظم پوسته اکسیدی رانیز از بین می‌برند و خوردگی سایشی با سرعت بیشتری واقع می‌گردد.

در شکل ۴۴-۳ تقلیل سرعت خوردگی فولاد زنگ نزن ۳۴۷ با افزایش سرعت نشان داده شده است، تحت شرایط ساکن این فولاد بوسیله اسید نتیریک بصورت اتوکاتالیتیک خورده می‌شود زیرا واکنش کاتدی تشکیل اسید نیترو می‌دهد. افزایش سرعت باعث خارج شدن اسید نیترو از محیط و کاهش خوردگی می‌شود.

بیشتر فولادهای زنگ نزن تمایل زیادی به حفره دارشدن و خوردگی شیاری در آب دریا و کلرورهای دیگر دارند، لکن بعضی از این فولادها را بطور موفقیت آمیزی در



شکل ۴۳-۳ خوردگی سایشی آلومینیم ۳۰۰۳ بوسیله اسید نیتریک دودکننده
در ۱۰۸°F (White fuming HNO_3)



شکل ۴۴-۳ خوردگی سایشی فولاد زنگ نزن ۳۴۷ بوسیله اسید نیتریک دودکننده
سفید در ۱۰۸°F

آب دریا بکار می‌برند، مشروط بر آنکه آب دریا دارای سرعت بالائی باشد. این حرکت از تشکیل رسوبات جلوگیری نموده و شروع[۱] حفره‌ها را مانع می‌شود.

۳-۳۱ تلاطم یا توربولانس[۲]

اکثر انهدامهای ناشی از خوردگی سایشی در اثر توربولانس یاجریان توربولانت می‌باشد. توربولانس باعث بهم زدن و تلاطم بیشتر مایع روی سطح فلز نسبت به جریان لامینار (خطوط جریان مستقیم) می گردد. توربولانس باعث تماس بیشتر بین محیط و فلز گردیده و در نتیجه عامل افزاینده‌ای در خوردگی سایشی می‌تواند باشد. شاید متداولترین مثال در این مورد، انهدام لوله های کندانسورها و مبدلهای حرارتی لوله‌ای[۳] در مدخل ورودی لوله هاست. این نوع خوردگی را خوردگی مدخل ورودی[۴] می‌نامند. این خوردگی معمولاً در چند اینچ اول لوله در قسمتی که مایع وارد لوله می‌شود متمرکز است. در این چند اینچ اول توربولانس وجود دارد زیرا مایع بایستی از یک محفظه بزرگتر (کلاهک مبدل) به داخل لوله هائی باقطر کوچک جریان پیدا نماید. بعد از اینکه مایع مسافت کوتاهی را در داخل لوله پیمود جریان لامینار می‌شود.

نوع جریان به سرعت و مقدار مایع و همچنین به شکل هندسی و نوع طراحی بستگی دارد. علاوه بر سرعت، لبه های تیز، شیارها، رسوبات، تغییر سریع سطح مقطع و موانع دیگر که جریان لامینار را مختل نمایند ممکن است باعث خوردگی سایشی گردد. پروانه ها اجزائی هستند که تحت شرایط توربولانت کار می‌کنند.

۳-۳۲ برخورد[۵]

بیشتر انهدامها، ناشی از برخورد مایع با سطح فلز می‌باشند. شکل ۳-۴۵ مثالی از این نوع انهدام می‌باشد. قسمتهای عمودی و افقی لوله نسبتاً بدون تاثیر مانده بودند لکن در محلی که جهت حرکت مایع تغییر می‌کند، فلز از بین رفته است. مثالهای دیگر پره های توربین بخار، مخصوصاً در قسمتهای خروجی و مرطوب، جداکننده‌های

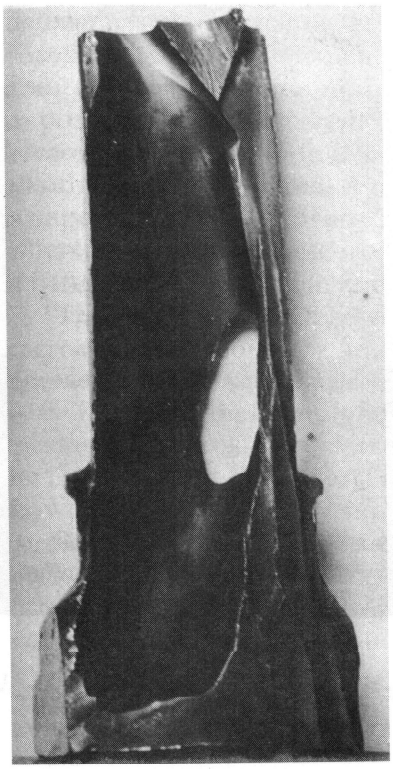
1- Initiation
2- Turbulance
3- Shell and tube condensor
4- Inlet end Corrosion
5- Impingment



شکل ۴۵-۳ خوردگی زانو در خط کندانس بخار

تله‌ای[1]، زانوها، تی‌ها (T)، اجزأ خارجی هواپیما، قطعاتی که روبروی لوله‌های ورودی تانک ها قرار دارند، سیکلونها، و هر کاربرد دیگری که برخورد بین محیط خورنده و فلز در آن وجود دارد. جامدات معلق و گاهی اوقات حبابهای گاز در مایع، اثر برخوردی را افزایش می‌دهند. حبابهای هوا فاکتور مهمی در تسریع خوردگی برخوردی هستند. شکل ۴۶-۳ خوردگی سایشی شدیدی را نشان می دهد که در اثر برخورد در کمتر از یکسال کار بوجود آمده است. این قطعه یک والو کشوئی است که در تماس باکاتالیزور شناور و نفت (یا روغن) در ۹۰۰ °F در یک پالایشگاه قرار داشته است. قطر اولیه این قطعه ۳ اینچ بوده است. در شکل ۴۷-۳ دو نوع خوردگی در یک کوره کراکینگ حرارتی نفت نشان داده شده است. لوله سمت چپ حاوی بخار بسیار گرم[2] بوده و در اثر ترک خوردن و خارج شدن بخار از دو سوراخ نشان داده شده و برخورد این بخار بایک لوله مواد نفتی که در مجاورت این لوله بوده (سمت راست) باعث سوراخ شدن آن شده است. تجارب کراکینگ کاتالیزوری (کاتالیزور بحالت تعلیق یا شناور است) نشان داده

1- Entrainment Separator 2- Super heat

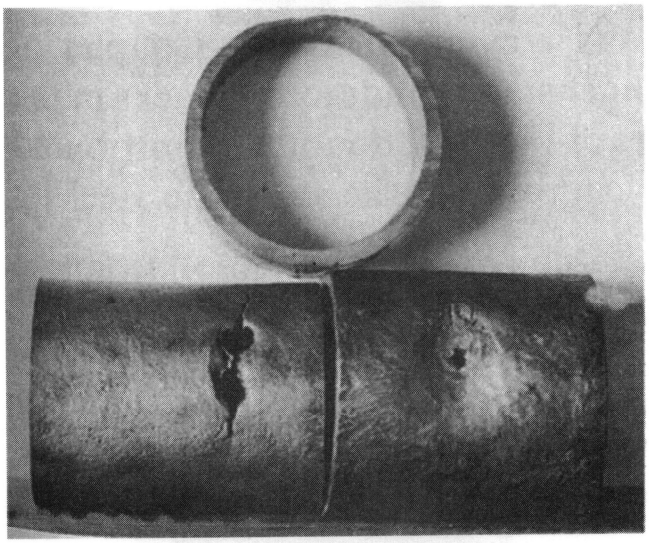


شکل ۴۶-۳ خوردگی سایشی والوکشوئی در ۹۰۰ درجه فارنهایت در پالایشگاه نفت

است که زاویه 25° نیز میتواند باعث خوردگی سایشی گردد.

۳۳-۳ اثرات گالوانیک

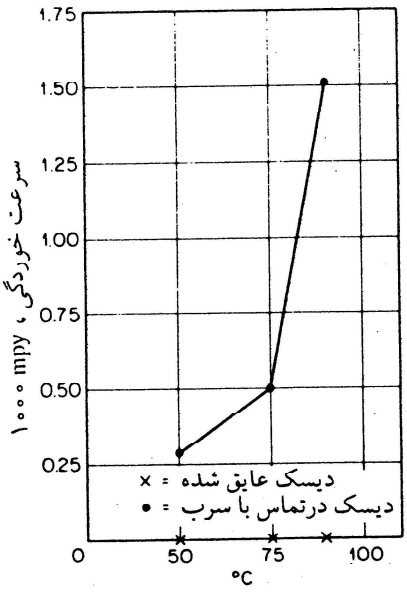
خوردگی گالوانیکی یا دو فلزی، می‌تواند برخوردگی سایشی دو فلز همجنس متصل بهم در یک سیستم متحرک تاثیر بگذارد. تاثیر گالوانیکی تحت شرایط ساکن ممکن است صفر باشد، لکن در اثر حرکت ممکن است به شدت افزایش یابد. شکل ۴۸-۳ نشان می‌دهد که خوردگی فولاد زنگ نزن نوع ۳۱۶ در اسید سولفوریک با سرعت حرکت بالا، موقعی‌که بتنهائی در آن محیط قرار داشته صفر است و موقعی‌که به سرب متصل شده است، سرعت خوردگی آن بشدت افزایش یافته است. پوسته سطحی



شکل ۴۷-۳ برخورد بخار خارج شده از لولهٔ ترک دار سمت چپ باعث سوراخ شدن لولهٔ سمت راست شده

به وسیله اثر همزمان خوردگی گالوانیکی و خوردگی سایشی از بین رفته است. تماس سرب باآلیاژ نوع ۳۱۶ تحت شرایط ساکن باعث خوردگی نمی‌شود. ترکهائی که در پوستهٔ Fe_2O_4 تشکیل شده در pH های پائین در شکل ۴۲-۳ بوجود می آید، بدون شک باعث تشدید خوردگی شده است، زیراپوسته نسبت به فولاد زمینه کاتدی بوده و اختلاف پتانسیل بین آن دو حدود ۵۰۰ میلی ولت است.

تغییرات سرعت می‌تواند اثرات گالوانیکی عجیبی بوجود آورد. در آب دریا باسرعت حرکت کم، خوردگی فولاد موقعی‌که در تماس بافولاد زنگ نزن، مس، نیکل، یاتیتانیم قرار می‌گیرد تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. در سرعت حرکت بالا، خوردگی فولاد در تماس با فولاد زنگ نزن و تیتانیم خیلی کمتر از موقعی است که در تماس بامس و نیکل قرار دارد. این خاصیت به پولاریزاسیون کاتدی موثرتر فولاد زنگ نزن و تیتانیم در سرعتهای بالا نسبت داده می‌شود.



شکل ۴۸-۳ اثر تماس باسرب در خوردگی سایشی آلیاژ ۳۱۶ به وسیله محلول ۱۰ درصد اسید سولفوریک با سرعت ft/sec ۳۹

۳۴-۳ نوع فلز یا آلیاژ

مقاومت فلزات و آلیاژها در برابر خوردگی سایشی بستگی به ترکیب شیمیائی، مقاومت خوردگی، سختی و تاریخچه متالورژیکی آنها دارد. مقاومت خوردگی فلزات و آلیاژها عمدتاً بوسیله ترکیب شیمیائی تعیین می‌گردد. چنانچه فلز فعال باشد، یا آلیاژی که از عناصر فعال تشکیل شده باشد، مقاومت خوردگی آن عمدتاً بستگی به توانائی تشکیل و نگهداری پوسته محافظ دارد. اگر فلز، نجیب تری باشد، دارای مقاومت خوردگی ذاتی خوبی می‌باشد. بنابراین چنانچه کلیه فاکتورهای دیگر مساوی باشند، فلزی که دارای مقاومت ذاتی بیشتری است در برابر خوردگی سایشی مقاومتر خواهد بود. مثلاً آلیاژ ۸۰ درصد نیکل و ۲۰ درصد کرم مقاومتر از آلیاژ ۸۰ درصد آهن و ۲۰ درصد کرم است زیرا نیکل دارای مقاومت ذاتی بیشتری نسبت به آهن می‌باشد. به

همین دلیل آلیاژ نیکل - مس بهتر از روی - مس می‌باشد.

افزودن عنصر سوم به آلیاژ، اغلب مقاومت آنرا در برابر خوردگی سایشی افزایش می‌دهد. افزودن آهن به کوپر و نیکل باعث افزایش شدید مقاومت در برابر خوردگی سایشی در آب دریا می‌شود. این مسئله در جدول ۱۰-۳ نشان داده شده است. افزودن مولیبدن به فولاد زنگ نزن ۸-۱۸، نوع ۳۱۶ را بوجود می آورد که در مقابل خوردگی و خوردگی سایشی مقاومتر است. در هر دو مورد، افزودن عنصر سوم باعث ایجاد پوسته پایدارتر و محافظ تری می‌شود. برنج آلومینیم بهتر از برنج ساده از نظر خوردگی سایشی عمل می‌کند.

با افزایش کرم تا ۱۳ درصد در آلیاژهای آهن - کرم، مقاومت خوردگی سایشی در آبهای معدنی اسیدی بطور خطی افزایش می‌یابد. در این درصد و بالاتر از آن، خوردگی اتفاق نمی افتد. فولادهای کم آلیاژ کرم دار نسبت به فولادهای کرم دار ساده مقاومت بیشتری به خوردگی سایشی در آب دیگهای بخار در درجه حرارت بالا دارند. نوع ۳ آلیاژ نای رزیست[۱] (چدن با ۳۰ درصد نیکل، ۳ درصد کرم) تحت شرایط خوردگی سایشی در آب دریا به مدت ۶۰ روز اصلاً خورده نشده، در حالیکه چدن معمولی به شدت از بین رفته بود.

خوردگی سایشی فولادهای زنگ نزن وآلیاژهای زنگ نزن بسته به ترکیب شیمیائی آنها متفاوت است. دوریمت ۲۰[۲]، در اسیدنیتریک دود کننده، در آب دریا و چندین محیط دیگر مقاومت بهتری نسبت به ۸-۱۸ دارد. علت این عمل نه فقط بهتر بودن مقاومت خوردگی ذاتی این آلیاژ است بلکه همچنین دراثر پوسته‌های محافظتری است که روی آنها بوجود می آید.

فلزات نرم از نظر خوردگی سایشی ضعیف ترند، زیرا مقاومت سایشی مکانیکی آنها پائین‌تراست. سختی[۳] معیار نسبتاً خوبی از مقاومت سایشی مکانیکی است. لکن لزوماً در پیش بینی مقاومت خوردگی سایشی معیار خوبی نخواهد بود. روشهای زیادی برای تولید فلزات و آلیاژهای سخت و یا سخت کردن آنها وجود دارد. یک روش مطمئن

1- Ni-Resist

۲- Durimt 20، ۳۰ درصد نیکل، ۲۰ درصد کرم، ۳/۵ درصد مس، ۲ درصد مولیبدن

3- Hardness

برای بهبود مقاومت خوردگی سایشی سخت کردن بوسیله محلول جامد[1] می‌باشد. این روش مشتمل است بر اضافه کردن یک عنصر به عنصر دیگر برای بوجود آوردن محلول جامدی که در مقابل خوردگی مقاوم است و ذاتاً سخت می‌باشد. این آلیاژها را بوسیله عملیات حرارتی نمی‌توان نرمتر یا سخت تر نمود. بهترین و آشناترین مثال چدن پر سیلیسیم (۱۴/۵ درصد سیلیسیم) می‌باشد. این آلیاژ شاید مقاومترین فلز از دسته فلزات غیر قیمتی است و تنها آلیاژی است که میتوان آن را در اکثر شرایط خوردگی سایشی بسیار شدید بکار برد.

سخت کردن به وسیله عملیات حرارتی باعث تغییراتی در ساختمان میکروسکوپی می‌شود و غیر یکنواختی حاصل از آن معمولاً باعث تقلیل مقاومت خوردگی می‌شود. مثلاً فولادهای زنگ نزن سختی رسوبی در شرایط خوردگی سایشی به خوبی نوع ۳۰۴ عمل نمی‌کنند.

مثال جالبی از مقاومت ضعیف، به وسیله فلزی با سختی بالا، موردی در رابطه با شکل ۴۰-۳ می باشد. هر دو فولاد زنگ نزن نوع ۳۱۶ و ۳۲۹ در لجن اسید سولفوریک در شرایط ساکن خورده نمی‌شدند، تحت شرایط خوردگی سایشی در پمپ گریز از مرکز، نوع ۳۲۹ (سخت تر) ۱۰ برابر سریعتر از نوع ۳۱۶ (نرمتر) خورده شده است .

گاهی اوقات چدن خاکستری از نظر خوردگی سایشی مقاومت بهتری نسبت به فولاد دارد، مخصوصاً در اسید سولفوریک گرم و غلیظ. آهن موجود در چدن خورده می‌شود، لکن لایه گرافیتی باقیمانده مشتمل بر شبکه گرافیتی اولیه و محصولات خوردگی باعث اندک محافظتی می‌شود.

۳۵-۳ روشهای مبارزه باخوردگی سایشی

روشهای مبارزه باخوردگی سایشی به‌ترتیب اهمیت عبارتند از: (۱) کاربرد موادی با مقاومت بهتر از نظر خوردگی سایشی، (۲) طراحی، (۳) تغییرات در محیط خورنده، (۴) کاربرد پوشش ها، (۵) حفاظت کاتدی.

مواد بهتر: دلایل استفاده از موادی که مقاومت بهتری دارند، واضح است.این روش اقتصادی ترین راه حل اکثر مسائل خوردگی سایشی است.

طراحی این روش مهمی است که به وسیلهٔ آن عمر فلز مورد استفاده یا کم

1- Solid Solution Hardening

قیمت‌تر رامی‌توان بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد یا عملاً میزان خوردگی آنها را به صفر رسانید. در اینجا طراحی مشتمل بر تغییر شکل هندسی است و منظور انتخاب مواد مناسب تر نیست. در مثال های زیر نشان داده شده است که چگونه خوردگی سایشی رامی‌توان باطراحی بهتر تقلیل داد. افزایش قطر لوله باعث تقلیل سرعت و همچنین لامینارتر شدن جریان می‌شود که از نقطه نظر مکانیکی مفید است. افزایش شعاع زانوها اثرات برخوردی را کم می‌کند. افزایش ضخامت ماده در نقاط حساس باعث تقویت آن نواحی می‌گردد. در یک مورد که خوردگی سایشی شدید سرب وجود داشت، مخارج تعمیرات با زیاد کردن شعاع زانوها و دو برابر کردن ضخامت لوله ها به میزان قابل توجهی کم شد. به همین دلیل، طراحی سایر اجزاً مثل مدخلهای ورودی و خروجی، بایستی در مسیر جریان بگونه‌ای انجام شد که موانعی سر راه نباشد. طراحی صفحاتی که در معرض برخورد قرار دارند (مثلاًبفل‌ها[1] در کندانسورها) بایستی به طریقی صورت گیرد که به سهولت قابل تعویض باشند. لوله‌های ورودی بایستی به طرف مرکز تانک تا نزدیک دیواره‌های آن هدایت گردند. لوله‌ها را بایستی طوری طراحی نمود که چند اینچ از صفحه لوله‌ها بیرون باشند. در چندین مورد عمر لوله‌ها، با ۴ اینچ بلندتر انتخاب کردن لوله‌ها (به طوری که ۴ اینچ از لوله‌ها بیرون بماند) تقریباً دو برابر شدند. قسمتهای بیرونی پس از مدتی تحت خوردگی سایشی از بین می‌روند لکن قسمت حساس‌تر یعنی انتهای لوله‌ها که در تماس با صفحه لوله‌ها قرار دارد حفظ شده است. یا لوله‌های کوتاه مخروطی[2] را میتوان در مدخل ورودی آب روی لوله‌ها سوار نمود. اینها را میتوان از جنس خود لوله‌ها انتخاب کرد یا از جنسی که مقاومت بهتری دارد. لوله‌های با کلیتی[3] و پلاستیکی فراوان بوده و بطور وسیعی در کندانسورها استفاده می‌گردد. انتهای لوله‌های کوچک را بایستی از داخل یخ زده تا از بوجود آمدن پله در محل تماس با لوله‌های کندانسور جلوگیری گردد. اگر این کار انجام نشود، روی لوله‌های کندانسور نزدیکی محل اتصال دو لوله به هم دیگر که در اثر پله ایجاد شده خوردگی سایشی بوجود خواهد آمد موقعی‌که از لوله های کوتاه فلزی استفاده می‌شود خوردگی گالوانیکی را بایستی در نظر گرفت. با چرخاندن کندانسورها به طوری‌که مدخل خروجی لوله‌ها تبدیل به مدخل ورودی لوله‌ها دوبرابر کرد. مدخلهای خروجی که خوردگی قابل

1- Baffles
2- Ferrules
3- Bakelite

ملاحظه‌ای نداشتند، به مدخلهای ورودی تبدیل شدند. تجهیزات را بایستی طوری طراحی نمود که قطعات آن به سادگی تعویض گردند. بسته لوله‌ها اگر بسهولت قابل تعویض باشند را می توان با یک بستهٔ لولهٔ یدکی جایگزین کرده و آنرا در موقع فراغت تعمیر نمود. قاشقک های نوار نقاله ها اگر بسهولت قابل تعویض باشند می توانند باعث کاهش هزینهٔ خوردگی در سانتریفوژها و سایر نوار نقاله‌ها گردند. استفاده از پمپهایی که قطعات آنها را بتوان از آلیاژهای مختلف جایگزین نمود، موقعیکه آلیاژ اولیه صحیح انتخاب نشده باشد، هزینه ها را کاهش می دهند. در یک حالت بعضی از پره‌ها در یک توربین بخار از تنظیم خارج بودند و پره‌های ثابت در معرض خوردگی سایشی شدید ناشی از قطرات آب در بخار قرار گرفتند. در یک راستا قرار نگرفتن از یک قسمت خط لوله به قسمت دیگر باعث خوردگی سایشی در اتصالات جوشکاری شده یا فلانج شده می شود. طراحی خوب نیازمند ساخت صحیح و مهارت در ساخت است.

تغییر محیط: هوازدائی و افزودن ممانعت کننده‌ها[1] روشهای خوبی هستند، لکن در اکثر موارد برای تقلیل مخارج خوردگی سایشی از نظر اقتصادی مناسب نمی‌باشند. از بین بردن جامدات معلق یا ته‌نشین کردن و فیلتر کردن روش مفیدی است. هر موقع که ممکن باشد، درجه حرارت محیط رابایستی کم نمود. در بسیاری از موارد این کار انجام شده است بدون اینکه اثر مخربی روی بقیه سیستم داشته باشد. در خوردگی سایشی نیز شبیه انواع دیگر خوردگی درجه حرارت بدترین دشمن ماست.

کاربرد پوشش: گاهی اوقات پوششهائی از انواع مختلف که مانع انعطاف پذیری و نرمی، بین فلز و محیط آن می شوند مورد استفاده قرار می‌گیرند لکن این همواره عملی نیست. پوششهای سخت یا زره‌ها یا روکش های قابل تعویض گاهی اوقات مفید می باشند، مشروط بر آنکه از جنس مقاومی از نظر خوردگی ساخته شده باشند. تعمییر نواحی خورده شده با جوشکاری غالباً عملی می‌باشد.

حفاظت کاتدی: این روش میزان خوردگی را کم می‌کند، لکن در مورد خوردگی سایشی هنوز بطور وسیعی متداول نشده است. در یک کارخانه برای محافظت مدخل ورودی لوله های مبدلهای حرارتی شامل آب دریا از ورقهای فولادی و بعضی ها از روی استفاده می کنند.

1- Inhibitors

خوشبختانه انهدام تمام پمپها، والوها، خطوط لوله ها، زانوها و غیره در اثر خوردگی سایشی نیست. لکن چنانچه این مسئله در نظر گرفته نشود، ممکن است مشکلات جدی بوجود آیند.

۳-۳۶ خسارت حبابی[1]

خسارت حبابی، شکل خاصی از خوردگی سایشی است که در اثر تشکیل حبابهای بخار و هوا در مایع و ترکیدن آنها روی سطح فلز بوجود می آید. خسارت حبابی در توربینهای هیدرولیکی، پروانه کشتی ها، پروانه پمپ ها، و سطوح دیگر فلزی که در تماس با مایعات متحرک قرار دارند و در آنهابراثر سرعت زیاد سیال تغییرات فشار وجود دارد، مشاهده می‌شود.

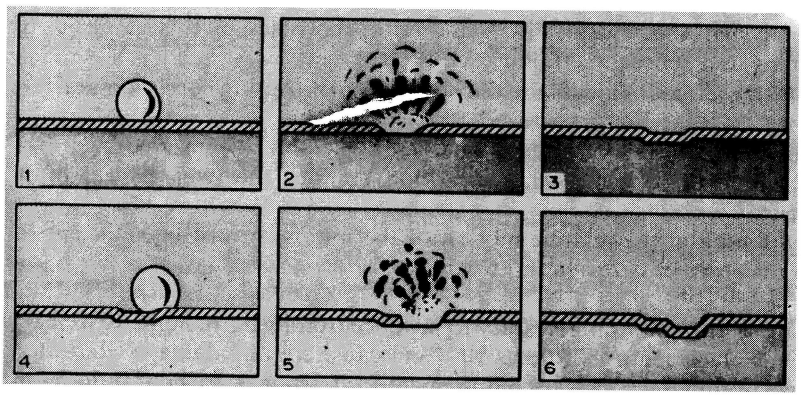
قبل از بررسی خسارت حبابی، ابتدا پدیدهٔ کاریتاسیون را شرح می دهیم. اگر فشار روی یک مایع مثل آب به مقدار کافی کاهش داده شود، حتی در دمای محیط به جوش خواهد آمد. یک سیلندر پر از آب در نظر بگیرید که دارای پیستون است که در سیلندر محکم قرار دارد. اگر پیستون را بالا ببریم، فشار روی آب کاهش می یابد و آب بخار می گردد. حال اگر پیستون رابه پائین فشار دهیم، فشار افزایش می یابد و حبابهای آب تبدیل به مایع می شوند یا منفجر می شوند. تکرار این پروس با سرعت بالایی شبیه حالت پمپهای آب، باعث می شود که حبابهای بخار آب بسرعت تشکیل شده و از بین بروند. محاسبات نشان داده‌اند انفجار این حبابها تولید امواج شوکی بافشارهائی به بزرگی ۶۰۰۰۰Psi می نمایند. نیروهائی به این بزرگی می‌توانند باعث تغییر شکل پلاستیکی در بسیاری از فلزات بشوند. دلیل این مطلب در وجود خطوط لغزش در اجزأ پمپها و تجهیزات دیگری که در معرض خسارت حبابی قرار دارند می‌باشد.

ظاهر خسارت حبابی تا حدودی شبیه جفره دار شدن می‌باشد، با این تفاوت که در ناحیه حفره‌دار شده، حفره ها نزدیک یکدیگر قرار داشته و سطح فلز به طرز قابل ملاحظه‌ای خشن شده است. خسارت حبابی ناشی از تاثیر همزمان خوردگی و تنشهای مکانیکی است. به این ترتیب که در اثر ترکیدن حبابهای بخار، پوسته‌های سطحی محافظ از بین می‌روند این مکانیزم در شکل ۳-۴۹ بطور شماتیکی نشان داده شده که مراحل انجام آن به صورت زیر است: (۱) روی پوستهٔ محافظ یک حباب تشکیل می‌شود. (۲)

1- Cavitation Damage

حباب ترکیده و پوسته را از بین می‌برد. (۳) سطح جدید فلز در معرض محیط خورنده قرار می‌گیرد و پوستهٔ محافظ مجدداً تشکیل می‌گردد. (۴) در همان محل یک حباب دیگر تشکیل می‌گردد. (۵) حباب ترکیده و پوسته را از بین می‌برد. (۶) سطح جدید فلز در معرض محیط خورنده قرار می‌گیرد و پوستهٔ محافظ مجدداً تشکیل می‌گردد. تکرار این عمل منجر به ایجاد حفره های عمیق می‌شود. و خوردگی افزایش می‌یابد.

شکل ۴۹-۳ نشان می‌دهد که برای ایجاد خسارت حبابی وجود پوسته های سطحی محافظ کاملاً ضروری نیست، زیرا حبابهای منفجرشده دارای قدرت کافی برای کندن ذرات فلزی از روی سطح می‌باشند. به مجرد اینکه سطح خشن گردید، برای ایجاد این نوع خسارت مناسبتر می‌گردد، شکل ۴۹-۳ در عمل، خسارت حبابی نتیجه عوامل شیمیائی و مکانیکی است.



شکل ۴۹-۳ نمایش شماتیکی مراحل خوردگی حبابی

بطور کلی خسارت حبابی رانیز می‌توان به روشهای ذکر شده در جلوگیری از خوردگی سایشی که قبلاً ذکر گردیده‌اند، به حداقل رساند. همچنین روشهای خاصی نیز در این مورد وجود دارد. خسارت حبابی را می‌توان با تغییر طراحی به منظوربه حداقل رساندن اختلاف فشاری هیدرودینامیکی در مسیر جریان تقلیل داد و می‌توان از آلیاژهای مقاومتری استفاده کرد. سطح صاف پروانه ها خسارت حبابی زا کم می‌کند، زیرا سطوح صاف برای جوانه زنی حبابها نامناسب تر هستند. پوشاندن اجزأ فلزی با

روکشهای نرم مثل لاستیک نیز مفید است. لازم است موقع استفاده از این پوششها احتیاط شود، زیرا اتصال بین فلز و پوشش غالباً موقع کار از بین می رود. حفاظت کاتدی نیز خسارت حبابی را کم می‌کند. تاثیرحفاظت کاتدی ظاهراً در اثر تشکیل حبابهای هیدروژن روی سطح فلز است که مثل بالشتک هوا، ضربات ناشی از امواج شوکی راجذب می‌کند.

۳-۳۷ خوردگی فرسایشی[۱]

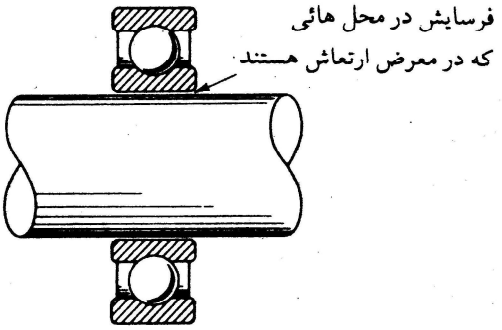
این نوع خوردگی در محلهای تماس بین دو فلز که تحت بار هستند و در معرض ارتعاش و لغزش قرار دارند ایجاد می‌شود. خوردگی فرسایشی روی فلز به صورت حفره‌ها یا شیارهائی که به وسیلهٔ محصولات خوردگی احاطه شده است ظاهر می‌شود. این نوع خوردگی نامهای دیگری نیز دارد، من جمله اکسید اسیون اصطکاکی، اکسید اسیون سایشی، برینل کاذب (بواسطهٔ شباهت حفره ها به فرورفتگی هائی که در آزمایش سختی برینل روی فلز ایجاد می‌شود). خوردگی فرسایشی در اجزأ موتورها، قطعات اتوموبیلها، اجزائی که به یکدیگر پیچ شده‌اند و ماشین آلات دیگر مشاهده شده است. اساساً، این نوع خوردگی، حالت خاصی از خوردگی سایشی است که در تماس با آتمسفر اتفاق می افتد.

خوردگی فرسایشی بسیار مخرب است زیرا باعث از بین رفتن قطعات و تولید ذرات اکسیدی می‌شود. خوردگی فرسایشی غالباً باعث کنده شدن سطح[۲] و رفتگی[۳] و از بین رفتن تلورانس و لق شدن،اجزائی که درتماس بایکدیگرهستندمی شود.همچنین،بخاطرلق شدن، تنشهای بیشتری هنگام کار بوجود آمده و حفره ها نیز به عنوان مراکز تجمع تنش[۴] عمل نموده و در نتیجه باعث شکست فلز در اثر خستگی می‌شود.

مثال کلاسیک خوردگی فرسایشی در صفحات فولادی است که به وسیلهٔ پیچ و مهره برای نگهداری ریلهای راه آهن بکار می‌رود. سخت کردن مداوم این پیچ و مهره ها ضروری است زیرا محلهای تماس روغن کاری نمی‌شوند و خوردگی فرسایشی به سرعت پیشروی می‌کند. یک مثال متداول دیگر از این نوع خوردگی در فصل مشترک بین

1- Fretting Corrosion
2- Seizing
3- Galling
4- Stress raiser

یک بلبرینگ که با فشاری روی یک شفت جا زده شده است، شکل ۵۰-۳، اتفاق می‌افتد. خوردگی فرسایشی در این نواحی باعث لق شدن و در نتیجه انهدام می‌شود.



شکل ۵۰-۳ مثالی از محلهائی که خوردگی فرسایشی اتفاق می افتد.

برای اینکه خوردگی فرسایشی اتفاق بیفتد شرایط زیر بایستی مهیا باشد:

۱ـ محل تماس تحت بار باشد.

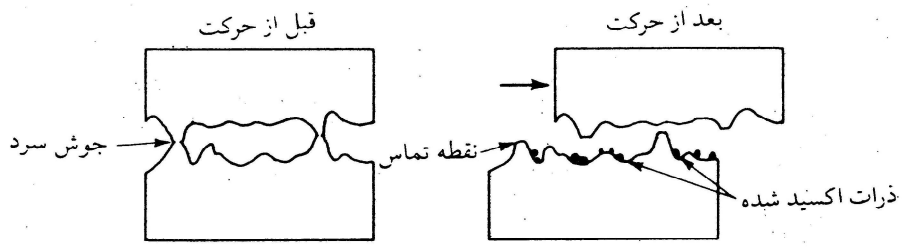
۲ـ ارتعاش یا حرکت نسبی بین دو سطح مکرراً صورت گیرد.

۳ـ بار و حرکت نسبی در فصل مشترک بایستی برای تولید لغزش یا تغییر شکل روی سطوح کافی باشد.

حرکت نسبی لازم برای تولید خوردگی فرسایشی خیلی کم است، تغییر مکانهائی تا حد ۱۰ سانتیمتر می‌تواند باعث خوردگی فرسایشی گردد. تکرار حرکت نسبی شرط لازم برای این نوع خوردگی است. خوردگی فرسایشی در سطوحی که در حرکت پیوسته هستند، مثل یاتاقانهای اکسل ها یا در قسمتهای دیگر بلبرینگ نشان‌داده شده در شکل ۵۰-۳ اتفاق نمی افتد، بلکه در محلهای تماسی که در معرض حرکتهای کم، به دفعات زیاد قرار دارند، روی می‌دهد. این نکته را بادر نظر گرفتن خوردگی فرسایشی روی اکسل های اتوموبیل در حمل و نقل های طولانی آنها بوسیلهٔ راه آهن یا کشتی می‌توان به خوبی نشان داد. در اثر وجود بار در این فصل مشترکها و ارتعاش مداوم، خوردگی فرسایشی بوجود می آید. در حالت معمول کار یک اتوموبیل، این

حالت پیش نمی آید زیرا حرکت نسبی بین سطوح یاتاقان اکسلها خیلی زیاد است (دور کامل)

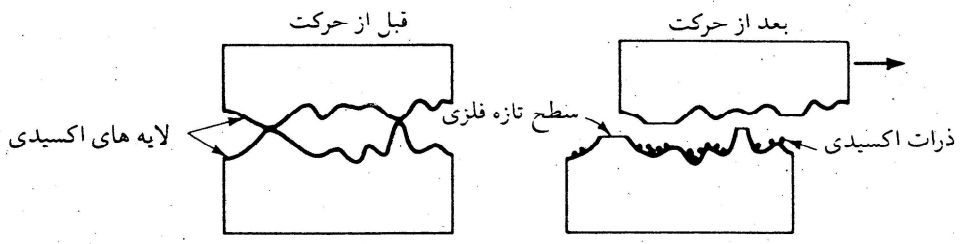
دو مکانیزم پیشنهاد شده برای خوردگی فرسایشی عبارتند از: سایش - اکسیداسیون و اکسید اسیون - سایش، که بطور شماتیکی در شکلهای ۵۱-۳ و ۵۲-۳ نشان داده شده است. مکانیزم سایش - اکسید اسیون بر این اساس است که سطوح فلزی در تماس با یکدیگر تحت بار، بطور سطحی به یکدیگر جوش می‌خورند[1]، و در نتیجهٔ حرکت نسبی بعدی، نواحی جوش خورده شکسته شده و ذرات فلزی به جای می‌مانند. این ذرات به خاطر کوچک بودن و گرمای حاصل از اصطکاک، فوراً اکسید می‌شوند. این عمل بارها و بارها تکرارشده و باعث از بین رفتن فلز وتجمع ذرات اکسیدی می‌شود. بنابراین، در نظریه سایش - اکسید اسیون، اساس کار بر سایش اصطکاکی است و اکسید اسیون بعدی تاثیر ثانویه دارد.



شکل ۵۱-۳ تئوری سایش - اکسید اسیون خوردگی فرسایشی بطور شماتیکی

نظریهٔ اکسید اسیون - سایش در شکل ۵۲-۳ نشان داده شده است. در این تئوری گفته می‌شود که سطوح فلزی غالباً به وسیلهٔ یک لایهٔ نازک و چسبنده اکسیدی پوشیده شده‌اند، موقعی‌که فلزات در تماس با یکدیگر و تحت بار در معرض حرکت نسبی مکرر قرار می‌گیرند، در برآمدگیهای سطحی، پوسته اکسیدی شکسته می‌شود و باعث بوجود آمدن ذرات اکسیدی نشان داده شده در شکل ۵۲-۳ می‌شود. سطح تازهٔ فلز مجدداً اکسید شده و عمل فوق دوباره تکرار می‌گردد. این تئوری بر اساس تشدید

1- Cold Weld



شکل ۵۲-۳ تئوری اکسید اسیون - سایش بطور شماتیکی

اکسید اسیون در اثر اصطکاک قرار دارد.

با در نظر گرفتن شکلهای ۵۱-۳ و ۵۲-۳ و دو تئوری فوق الذکر، واضح است که نتیجه‌گیری یکسان است، به عبارتی باعث تولید ذرات اکسیدی و خراب شدن سطوح فلزی می گردد، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در خوردگی فرسایشی هر دو مکانیزم فوق عمل می‌کنند. حضور یک پوستهٔ اکسیدی در تمام موارد لازم نیست، چون خوردگی فرسایشی روی تقریباً هر نوع سطحی من‌جمله فلزات نجیب، میکا، شیشه و (ruby) مشاهده شده است. لکن اکسیژن موثر بوده و وجود آن باعث تشدید خوردگی فرسایشی مواد مختلف، مخصوصاً آلیاژهای آهنی می‌شود. مکانیزم واقعی خوردگی فرسایشی احتمالاً مجموعه‌ای از مکانیزمهای نشان داده شده در شکلهای ۵۱-۳ و ۵۲-۳ می‌باشد.

در بسیاری موارد با اعمال یک یا چند روش زیر می‌توان خوردگی فرسایشی رابه حداقل رسانید یا عملاً آنرا حذف نمود:

۱ - از روغن با گرانروی پائین و چسبندگی[1] بالا و گریس استفاده کنید. روغنکاری، اصطکاک بین سطوح یاتاقانها راکاهش داده و اکسیژن را از منطقه خارج می سازد. غالباً، قبل از روغنکاری سطح رافسفاته نیز می‌کنند، چون روکشهای فسفاته متخلخل بوده و مواد روغنی رابهتر در خود نگهداری می‌کنند. روغنکاری به همراه فسفاته کردن اثر

1- Tenacity

بهتری دارد.

۲ ـ سختی فلزات در تماس با یکدیگر را افزایش دهید. برای اینکار می‌توان از مواد سخت مناسب یکدیگر استفاده نمود. جدول ۱۱-۳ مقاومت نسبی خوردگی فرسایشی

جدول ۱۱-۳ مقاومت مواد مختلف از نظر خوردگی فرسایشی

ضعیف	متوسط	خوب
آلومینیم روی چدن	چدن روی چدن	پلاستیک چند لایه‌ای روی ورق طلا
آلومینیم روی فولاد زنگ‌نزن	مس روی چدن	فولاد ابزار سخت روی فولاد ابزار
منیزیم روی چدن	برنج روی چدن	فولاد کار سرد شده روس فولاد کار سرد شده
چدن روی روکش کرم	روی روی چدن	چدن روی چدن فسفات شده
پلاستیک روی چدن	چدن روی روکش نقره	چدن روی چدن با روکش (rubber cament)
باکلیت روی چدن	چدن روی روکش مس	چدن روی چدن با روکش سولفید تنگستن
فولاد ابزار سخت روی روکش کرم	چدن روی روکش مس ملغمه شده	چدن روی چدن با واشر لاستیکی
روکش کرم روی روکش کرم	چدن روی چدن با سطح خشن	چدن روی چدن با روغن مولی کت (Molykote)
چدن روی روکش قلع	منیزیم روی روکش مس	چدن روی فولاد زنگ‌نزن با روغن مولی‌کت (")
چدن روی چدن با روکش (shellac)	زیرکونیم روی زیرکونیم	

منبع : J.R.McDowell. ***ASTM Special Technical Publication*** No. 144, p. 24, American Society for Testing Materials, Philadephia, 1952

مواد مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، مواد سخت، مقاومتر از مواد نرم هستند، همچنین، افزایش سختی سطحی با ساچمه پاشی[1] یا کار سرد، مقاومت در برابر خوردگی فرسایشی را افزایش می‌دهد.

۳ ـ با افزایش زبری، اصطکاک بین سطوح در تماس بایکدیگر را افزایش دهید. اغلب سطوح یاتاقانهائی که در حمل و نقلهای طولانی در معرض ارتعاشات قرار می‌گیرند را با سرب روکش می‌کنند تا از خوردگی فرسایشی در آنها جلوگیری شود. موقعی‌که یاتاقان مورد استفاده قرار گرفت روکش سرب به سرعت از بین می‌رود.

۴ ـ برای کم کردن ارتعاشات و حذف هوا در یاتاقانها از واشر استفاده کنید.

1- Shot-peening

۵ ـ برای جلوگیری از لغزش بین سطوح در تماس بایکدیگر، بار روی آنها را افزایش دهید.

۶ ـ بار روی سطوح یاتاقانها راتقلیل دهید. توجه شود که تقلیل بار همواره مشکل را حل نمی‌کند، زیرا بارهای خیلی کوچک نیز می‌توانند تولید اشکال نماید.

۷ ـ در صورت امکان حرکت نسبی بین قطعات را افزایش دهید تا از این نوع خوردگی جلوگیری شود.

یک کتاب جامع در این مورد شامل مکانیزمها، روشهای آزمایش، و موارد انهدام به وسیلهٔ این نوع خوردگی به خوانندگانی که نیاز به اطلاعات بیشتری دارند توصیه می‌گردد[۱]. دو نکته قابل توجه می باشند اول، واترهاوس پیشنهاد می‌کند که برای توصیف این پدیده به جای خوردگی فرسایشی از مالش استفاده شود، چون محصولات خوردگی همواره حضور ندارند دوم، بنظر می‌رسد دربارهٔ علت خوردگی سطوح پیچ – ورق و نواحی پوشیدهٔ دیگر در قطعاتی که در داخل بدن کار گذاشته می‌شوند برداشت اشتباهی وجود دارد. کوهن[۲] اولین کسی بود که این خوردگی را خوردگی فرسایشی نامید و این ایده بوسیلهٔ واترهاوس و سایرین تقویت شده است این تصورات غلط هستند زیرا این خوردگی دارای ویژگیهای خوردگی شیاری است تا خوردگی فرسایشی. حرکت نسبی بین سطوح پیچ – ورق که در شکسته بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند ممکن است باعث شروع خوردگی شیاری شوند، ولی علت اصلی این خوردگی نیستند چون در نواحی پوشیده در قطعاتی که تحت تنش نیستند نیز خوردگی مشابهی مشاهده شده است.

خوردگی توام با تنش[۳]

ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش[۴] که نتیجهٔ اعمال همزمان تنشهای کششی و محیط خورنده روی فلز می‌باشد. عده‌ای از محققین کلیهٔ انهدامهای ناشی از ترک خوردن در محیطهای خورنده من‌جمله انهدامهای ناشی از تردی ئیدروژنی را scc نامیده‌اند لکن این دو نوع ترک خوردن باتغییر پارامترهای محیطی، رفتارهای متفاوتی از

1- R.B.Waterhouse, "Fretting Corrosion" Pergamon Press New York, 1972

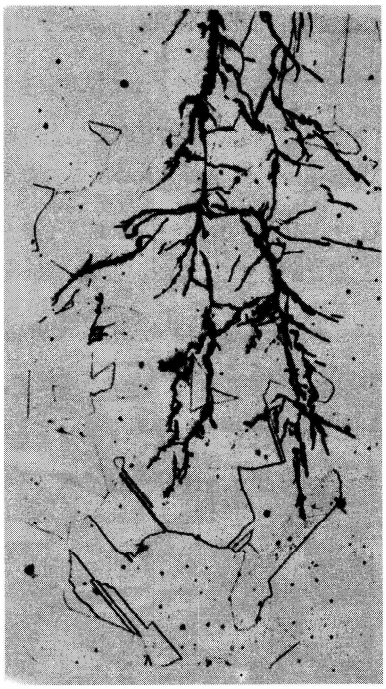
2- J.Cohen. *J. Bone Joint Surg.*44A:307 (1962)

3- Stress Corrosion

4- Stress Corrosion Cracking یا scc

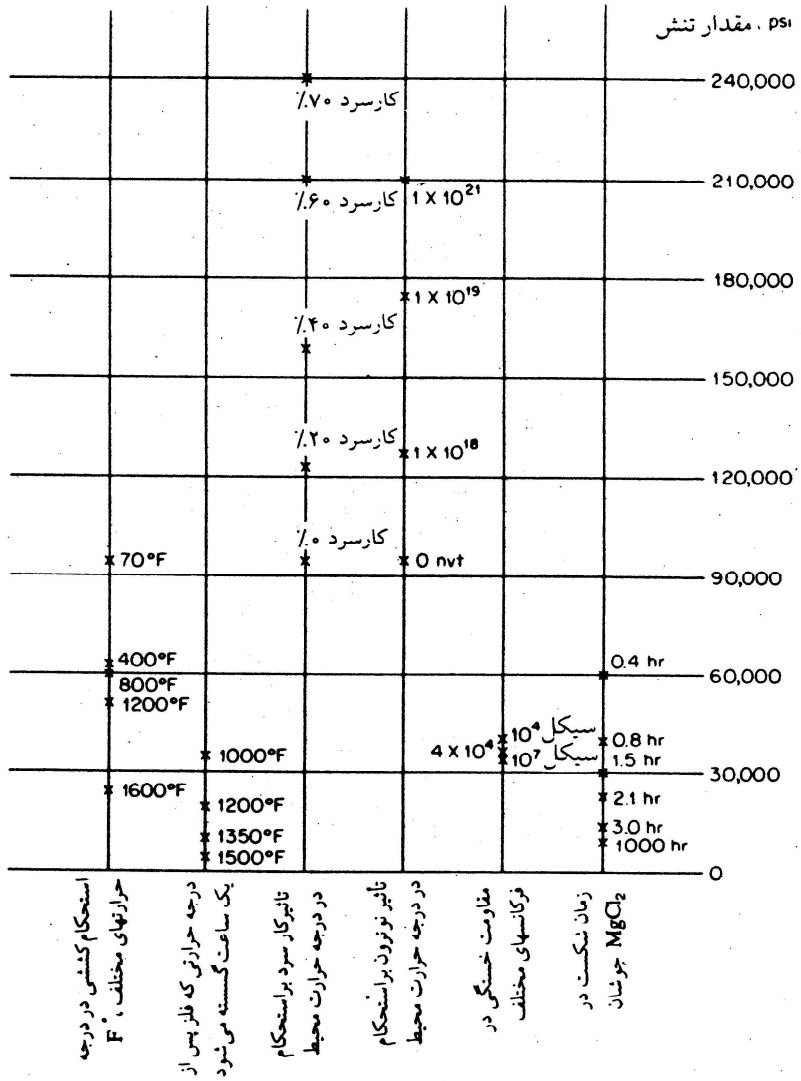
خود نشان می‌دهند. مثلاً حفاظت کاتدی روش موثری برای جلوگیری از scc است، در حالیکه باعث تسریع تردی هیدروژنی می‌گردد. به این دلیل در اینجا این دو نوع ترک خوردن را جداگانه بحث می‌کنیم.

در مرحله scc، فلز یا آلیاژ تقریباً اصلاً خورده نمی‌شود، در حالی که ترکهای ریزی به داخل آن پیشرفت می‌کند. شکل ۵۳-۳ این حالت را نشان می‌دهد. این نوع ترک خوردن نتایج جدی و خطرناکی دارد، زیرا در تنشهائی که در محدوده تنش مجاز طراحی



شکل ۵۳-۳ مقطع ترکهای scc در فولاد زنگ نزن (×۵۰۰)

شده قرار دارند، واقع می‌گردد. در شکل ۵۴-۳ تنشهای لازم برای scc فولاد زنگ نزن ۳۰۴ نسبت به کل استحکام آن مقایسه شده است. چنانچه این فولاد در معرض کلرور منیزیم ($MgCl_2$) جوشان قرار بگیرد (در ۳۱۰°F یا ۱۵۴°C)، قابلیت تحمل تنش (تنش



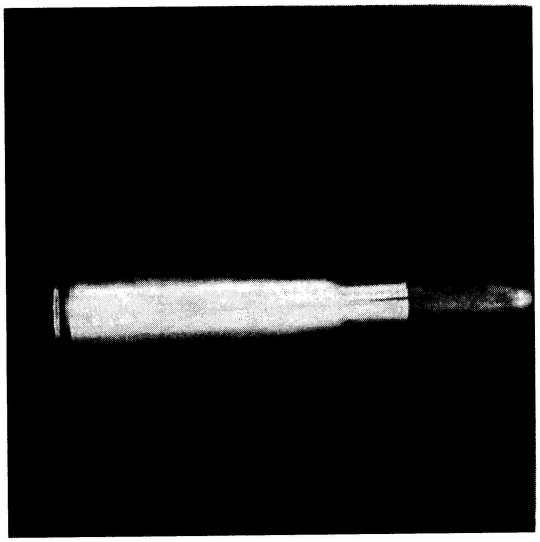
شکل ۵۴-۳ مقایسه تنش شکست به روشهای مختلف باscc فلز مورد آزمایش فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ (Courtesy Dr.R.W.Staehle, Ohio State University)

مجاز) آهن به مقداری که در ۱۲۰۰°F مجاز است، می‌رسد.

دو مورد کلاسیک scc، ترک خوردن فصلی[1] برنج و تردی بازی فولاد[2] است.

1- Season Cracking

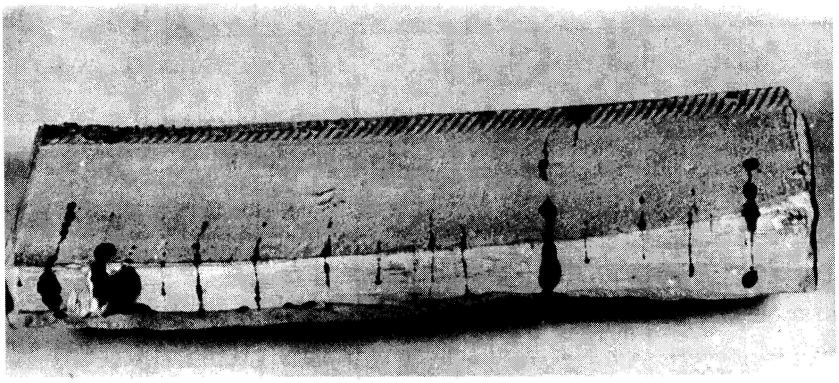
هر دوی این نامگذاریها بازگوکنندهٔ شرایط محیطی است که منجر به scc شده است. ترک خوردن فصلی به انهدامهای ناشی از scc فشنگهای برنجی اطلاق شده است. در فصل بارندگیهای شدید، مخصوصاً در مناطق گرمسیر، ترکهائی در محل اتصال محفظه برنجی به گلوله مشاهده می‌شد. بعداً معلوم شد که عامل محیطی در ترک خوردن فصلی، آمونیاک حاصل از تجزیه مواد آلی بوده است. مثالی از این نوع ترک خوردن، در شکل ۵۵-۳ نشان داده شده است.



شکل ۵۵-۳ ترک خوردن فصلی فشنگ های نظامی آلمانی

در لوکوموتیوهای بخار اولیه، تعداد زیادی از دیگهای بخار که به روش پرچکاری ساخته شده بودند، منفجر شدند. مطالعه انهدامها نشان دادند که ترکها یا شکست ترد، از سوراخ پرچها شروع شده بودند. این نواحی در مرحله پرچکاری، کار سرد شده بودند، و آنالیز رسوبات سفید رنگی که در این نواحی وجود داشت، نشان داد که مواد قلیائی هیدروکسید سدیم جزٔ اصلی است. به این ترتیب شکست ترد در حضور مواد قلیائی اصطلاح تردی بازی را بوجود آورد. در شکل ۵۶-۳ ورقی که بوسیله تردی بازی ترک خورده است نشان داده شده است. ترکها خیلی ریز بوده و تعدادشان زیاد است و به

2- Caustic embrittlement



شکل ۵۶-۳ ورقه فولاد کربنی از یک تانک نگهداری باز که بوسیلهٔ تردی بازی منهدم شده است.

وسیلهٔ یک محلول رنگی که در آنها نفوذ کرده است، قابل رویت شده‌اند. در حالی که تنش به تنهائی به طریق معمول در متالورژی مکانیکی اثر می‌کند (مثلاً خزش، خستگی، گسیختگی) و خوردگی نیز به تنهائی واکنشهای انحلال را باعث می‌شود، اثر هم زمان و توام این دو باهم گاهی اوقات نتایج ناگواری که در بالا بدان اشاره شد، ببار می‌آورند.

تمام سیستمهای فلز و محیط خورنده باعث scc نمی‌شوند. مثال خوبی در این مورد مقایسه بین برنجها و فولادهای زنگ نزن آستینتی می‌باشد. فولادهای زنگ نزن در محیط های کلرور دار ترک می‌خورند، لکن در محیطهای حاوی آمونیاک ترک نخواهند خورد در حالیکه برنجها در محیطهای آمونیاک دار ترک می‌خورند و در محیطهای کلروردار ترک نمی‌خورند. بعلاوه تعداد محیطهای مختلفی که در آنها یک آلیاژ ترک خواهد خورد، معمولاً کم می‌باشد. مثلاً فولادهای زنگ نزن در اسید سولفوریک، اسید نیتریک، اسید استیک، یا آب خالص ترک نخواهند خورد. لکن در محیطهای کلروردار بازی ترک خواهند خورد.

فاکتورهای مهم در scc درجه حرارت، ترکیب شیمیائی محلول ، ترکیب شیمیائی

فلز، تنش و ساختمان فلز می‌باشد. در قسمتهای بعدی این فاکتورها بهمراه مطالبی درباره شکل ترکها، مکانیزم تشکیل و روشهای جلوگیری از آنها بحث خواهد گردید.

۳-۳۸ شکل ترکها[1]

ترکهای scc شبیه ترکهائی که در شکست ترد ایجاد می‌شوند می‌باشند در حالی که حقیقتاً ناشی از پروسسهای خوردگی موضعی هستند. لکن، اگر چه این ترکها واقعاً ترکهای مکانیکی نیستند.با وجود این، مناسب است مراحل و اشکال عمومی شکل ۳-۵۳ را به عنوان ترک قلمداد کرد.

در scc هر دو نوع بین دانه‌ای[2] و میان دانه‌ای[3] مشاهده می‌گردد.

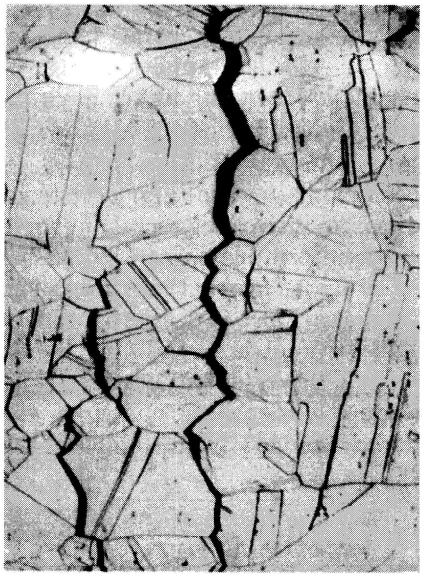
ترکهای بین دانه‌ای در طول مرزها حرکت می‌کند. در حالیکه ترکهای میان دانه‌ای از داخل دانه ها عبور می‌نماید شکل ۳-۵۳ مثالی از ترکهای میان دانه‌ای و شکل ۳-۵۷ مثالی از نوع ترک بین دانه‌ای می باشد. غالباً در یک آلیاژ، هر دو نوع ترک ممکن است بوجود بیایند. نوع ترک بستگی به محیط خورنده و ساختمان فلز دارد. تغییر نوع و شکل ترک در محیطهای مختلف در آلیاژهای پرنیکل، آلیاژهای آهن -کرم و برنجها دیده شده است.

ترک خوردن معمولاً در جهت عمود بر تنش اعمال شده اتفاق می‌افتد. ترکهای شکل ۳-۵۳ و ۳-۵۷ به همین منوال بوده‌اند. یک مثال جالب توجه در شکل ۳-۵۸ نشان داده شده است. در این شکل، فلز تحت تنشهای کششی دوبعدی قرار دارد (کلاهک نیمکره‌ای یک تانک بافشار داخلی بالا) ترکها در جهات مختلف قرار داشته و شدت شاخه شاخه شدن آنها نیز متفاوت است . در بعضی موارد ترکها شاخه شاخه نیستند، شکل ۳-۵۶، و در بعضی دیگر چند شاخه‌ای هستند (مثل دلتای یک رودخانه در شکل ۳-۵۳). بسته به ساختمان فلز وترکیب شیمیائی محیط خورنده، شکل ترک می‌تواند حالتهای مختلف فوق الذکر را داشته باشد.

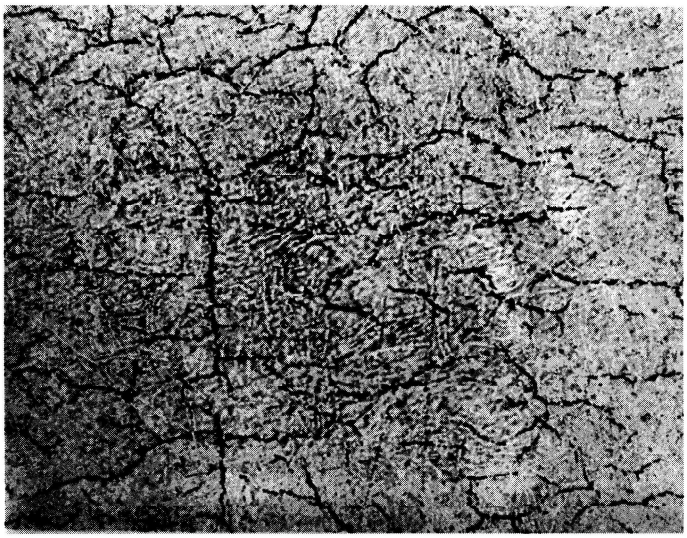
۳-۳۹ اثرات تنش

همانطورکه در شکل ۳-۵۹ نشان داده شده است، افزایش تنش، زمان شکست را

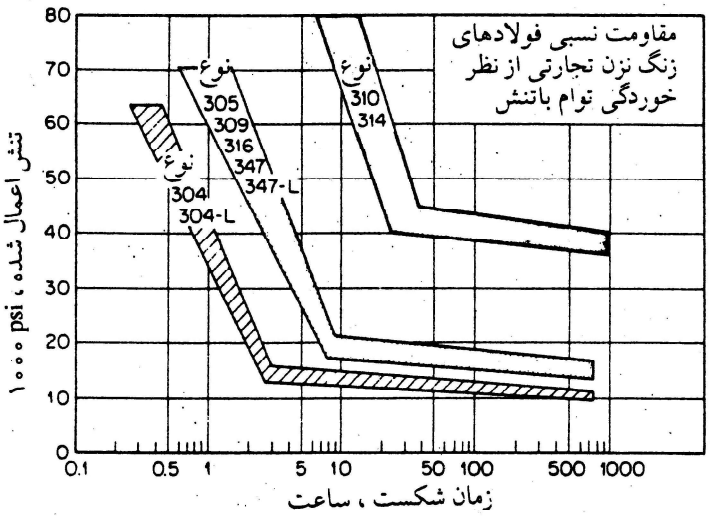
1- Crack Morphology
2- Intergranular
3- Tansgranular



شکل ۵۷-۳ scc بین دانه‌ای برنج



شکل ۵۸-۳ scc قسمت سریک تانک از آلیاژ تیتانیم - ۶٪ آلومینیم - ۴٪ وانادیم حاوی N_2O_4 بدون آب (anhydrous)



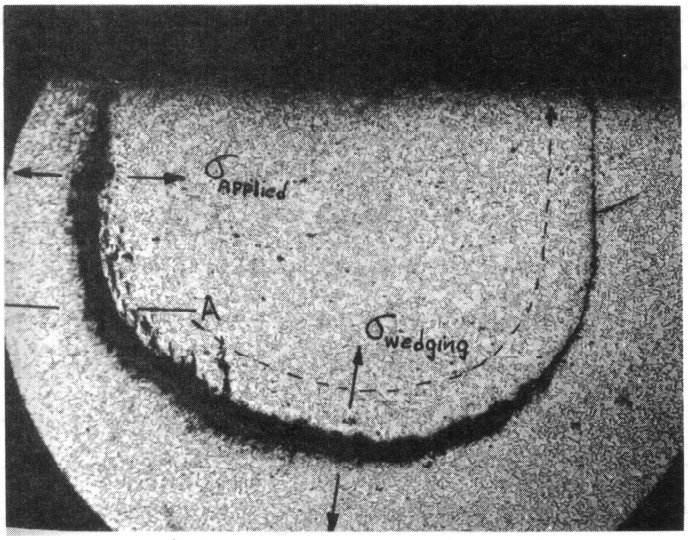
شکل ۵۹-۳ مقاومت نسبی فولادهای زنگ نزن تجارتی به scc در محلول کلرور منیزیم ۴۲٪ جوشان

تقلیل می‌دهد. همچنین به نظر می‌رسد که برای هر آلیاژ تنشی وجود دارد که در کمتر از آن شکست اتفاق نخواهد افتاد. حد تنش مجاز برای مصونیت از نظر scc ، بستگی به درجه حرارت، ترکیب شیمیائی فلز ، و ترکیب شیمیائی محیط دارد. بطورکلی حد تنش مجاز بین ۱۰ تا ۷۰ درصد تنش تسلیم است. برای هر زوج آلیاژ ـ محیط احتمالاً یک تنش مجاز وجود دارد[1]، لکن این تنش مجاز را بایستی با احتیاط بکار برد. زیرا شرایط محیطی ممکن است در حین عمل تغییر نمایند.

بنابراین معیار اصلی تنشهائی که باعث scc می‌گردند، این است که کششی بوده و از یک حدی بالاتر باشند. این تنشها می‌توانند هر نوعی اعم از ، تنش اعمال شده، پس ماند، حرارتی، و یا در اثر جوشکاری باشند. در حقیقت موارد زیادی وجود دارد که scc بدون وجود تنش خارجی اتفاق افتاده است. فولادهای جوشکاری شده، دارای تنشهای پس مانده نزدیک نقطه تسلیم می‌باشند.

محصولات خوردگی نیز از منابع مولد تنش می‌باشند. در محلهای بسته، تنشهائی به بزرگی Psi ۱۰۰۰۰ می‌توانند به وسیله محصولات خوردگی بوجود آید. در شکل

1- Threshold stress



شکل ۶۰-۳ تاثیر گوه مانند محصولات خوردگی، این ترک در فولاد زنگ نزن در اثر تنشهای حاصل از محصولات خوردگی در مسیر دایره‌ای پیدا کرده است.
(H.W.pickering,M.G.Fontana and F.H.Beck, Corrosion 18;230t (June 1962))

۶۰-۳ یک ترک scc که بوسیله محصولات خوردگی توسعه یافته است، نشان داده شده است.

تاثیر گوه بالغ بر (۱۰ Ksi) ۱۰/۰۰۰ b/in2 منجر به تنشهای خیلی بالایی در راس ترک می گردد زیرا رأس ترک یک شیار تیز است که عامل تجمع تنش می باشد.

هوداگ و پیج [۱] نشان می‌دهند که تنشهای به شدت موضعی بالغ بر ۲۰۰۰ Mpa (مگاپاسکال)، یا تقریباً ۲۸۹ Ksi حاصل می گردد. این نویسندگان مسئله را از دید مکانیک شکست بررسی نموده‌اند. تنشهای بالا منجر به فرو رفتگی [۲] لوله های حرارتی بشرحی که در پاراگراف بعدی خواهد آمد می شوند.

1- S.J.Hudak and R.A.Page,Analyss of Oxide Wedging During Environmental Assisted Crack Growrh, *Corrosion*,285-290 (July 1983)

2- Denting

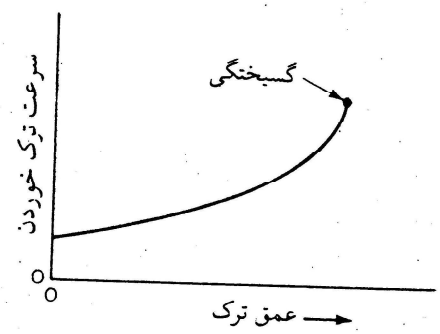
پدیده‌ای بنام فرورفتگی در نیروگاههای هسته‌ای مشاهده شده است. لوله‌های اینکونل در محل عبور از نگهدارنده های فولاد کربنی به داخل، فرورفتگی پیدا می‌کنند. فضای استوانه‌ای شکل بین سطح خارجی لوله و سطح داخلی سوراخ در فولاد کربنی به وسیلهٔ محصولات خوردگی پر می‌شود. حجم محصولات خوردگی که در این شیار بسته ایجاد می‌شود بیشتر از حجم فلزی است که خورده شده است و فشار حاصل باعث تورفتگی اینکونل می‌شود. در این شرایط تنشهای بوجود آمده زیادتر از تنش تسلیم آلیاژ است این حالت شبیه تأثیر گوه مانند محصولات خوردگی در یک ترک حاصل از خوردگی توام با تنش است که در شکل ۶۰-۳ نشان داده شده است.

وضعیت مشابهی شامل چدن پر سیلیسم و چدن خاکستری معمولی در معرض اولئوم (اسید سولفوریک دود کننده) وجود دارد. اسید در طول ورقهای گرافیتی به داخل نفوذ می کند (شکل ۱-۵ رجوع شود)، فولاد زمینه را خورده، و با ایجاد فشار در این نواحی مسدود باعث ترک خوردن چدن، که بعضی وقتها ناگهانی است می شود. (به قسمت ۲-۷ مراجعه شود). اولین تجربهٔ من با تاثیر گوه در دههٔ ۱۹۳۰ با چنین موردی بود.

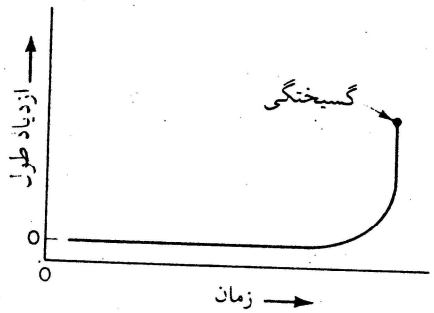
۴۰-۳ زمان شکست

زمان در scc پارامتر مهمی است، زیرا خسارت فیزیکی مهمی که در scc اتفاق می‌افتد در مراحل نهائی صورت می‌گیرد. با نفوذ ترکها به داخل فلز، سطح مقطع موثر فلز کم می‌شود و در نتیجه تنش افزایش می‌یابد و نهایتاً شکست نهائی، مکانیکی خواهد بود.

این مطلب در شکلهای ۶۱-۳ و ۶۲-۳ نشان داده شده‌اند. در شکل ۶۱-۳ رابطهٔ سرعت شکست بر حسب عمق ترک، در نمونه‌ای که تحت نیروی کششی ثابتی قرار دارد، نشان داده شده است. ابتدا سرعت حرکت ترک تقریباً ثابت است، ولی با پیشروی ترک، سطح مقطع نمونه تقلیل یافته و تنش اعمال شده روی بقیه سطح مقطع نمونه افزایش می‌یابد. در نتیجه سرعت حرکت ترک نیز با پیشروی خود ترک افزایش می‌یابد تا موقعی که گسیختگی واقع گردد. درست قبل از گسیختگی فلز، سطح مقطع فلز آنقدر کم شده است که تنش روی آن مساوی یا بزرگتر تنش نهائی (استحکام نهائی) فلز شده است و انهدام در اثر گسیختگی مکانیکی بوجود می آید. در شکل ۶۲-۳ رابطه بین زمان



شکل ۶۱-۳ سرعت پیشروی ترک نسبت به عمق ترک تحت بارکششی



شکل ۶۲-۳ ازدیاد طول نمونه به عنوان تابعی از زمان در یک آزمایش scc بانیروی ثابت

آزمایش و ازدیاد طول نمونه در مرحله scc نشان داده شده است. در مراحل اولیه ترک خوردن، پهنای دهانه ترک کم است و ازدیاد طول خیلی کمی در نمونه بوجود می‌آید. در مراحل بعدی ترکها بازتر می‌شوند. قبل از گسیختگی تغییر شکل پلاستیکی قابل ملاحظه‌ای نیز بوقوع می‌پیوندد و تغییر طول بزرگی مشاهده می‌گردد.

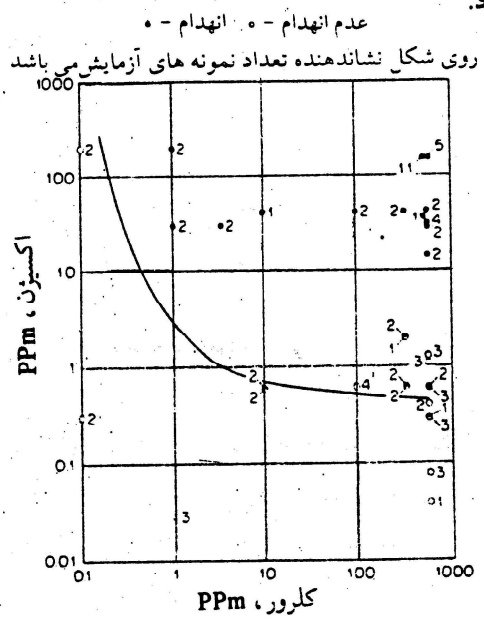
یک سئوال همیشگی و مهم درباره scc این است که: آزمایش scc چه مدت بایستی بطول انجامد؟ شکلهای ۶۱-۳ و ۶۲-۳ نشان می‌دهند که آزمایش را بایستی تا انهدام نمونه (گسیختگی) ادامه داد. آزمایشات کوتاه مدت scc بی فایده خواهند بود، زیرا قبل از انهدام نمونه شواهد خیلی ضعیفی از نقطه نظر فیزیکی و مکانیکی در اثر

ترک خوردن وجود دارد.

۳-۴۱ فاکتورهای محیطی

در حال حاضر الگوی کلی برای محیطهائی که در آلیاژهای مختلف باعث ایجاد scc می‌شوند وجود ندارد. scc در بعضی محیطهای آبی واقع می‌شود. هم چنین در بعضی نمکهای مذاب و فلزات مذاب و نیز مایعات غیر آلی (معدنی) فاقد آب اتفاق می‌افتد. (رجوع شود به شکلهای ۵۸-۳ و ۶-۸)

وجود اکسید کننده ها غالباً اثر زیادی بر تمایل به ترک خوردن دارد. شکل ۶۳-۳ اثرات مشترک کلرور و اکسیژن حل شده بر scc فولاد زنگ نزن نوع ۳۰۴ را نشان می‌دهد. در حقیقت وجود اکسیژن حل شده و یا اکسیدکننده های دیگر لازمه ترک خوردن فولادهای زنگ نزن آستینتی در محلولهای کلردار می‌باشد و اگر اکسیژن حذف گردد، شکست اتفاق نخواهد افتاد.



شکل ۶۳-۳ رابطه پیشنهادی بین مقدار اکسیژن و کلرور آب بویلر که به وسیلهٔ مواد قلیائی و فسفات تصفیه و آماده شده، و استعداد فولاد زنگ نزن آستینتی به scc که در معرض بخار آب فوق الذکر قرار گرفته.

(W.Lee Williams,*Corrosion*, 13:539t,Aug,1957)

در جدول ۱۲-۳ تعدادی از سیستمهای محیط - آلیاژ که ترک خوردن در آنها واقع می‌شود نشان داده شده است. محیطهای جدیدی که باعث scc در آلیاژهای مختلف می‌گردند دائماً پیدا می‌شوند. لذا همواره لازم است در صورت تغییر ترکیب محیط، آلیاژ مورد نظر را از نظر تمایل به scc ارزیابی نمود (با آزمایشات scc). ویژگی محیطهائی که باعث ایجاد scc می‌گردند این است که آلیاژ در حالتی که فاقد تنش می‌باشد در آنها به مقدار خیلی جزئی خورده می‌شود. اگرچه غالباً گزارش می‌شود که scc فولاد در محلولهای سولفور هیدروژن و محلولهای حاوی سیانید اتفاق افتاده است. جدول ۱۲-۳ لکن بدون شک این انهدامها ناشی از تردی هیدروژنی است تاscc (به قسمت خسارات هیدروژنی در همین فصل مراجعه گردد).

شبیه اکثر واکنشهای شیمیائی، scc با افزایش درجه حرارت، شدت می‌یابد. در بعضی سیستمها، مثل آلیاژهای منیزیم، شکست به سهولت در درجه حرارت محیط واقع می‌گردد. در بعضی دیگر درجه حرارت جوش لازم است. اکثر آلیاژهائی که مستعد به ترک خوردن هستند، حداقل در ۱۰۰°C شروع به ترک خوردن می‌نمایند. در شکل ۶۴-۳ اثر درجه حرارت بر ترک خوردن فولادهای زنگ نزن آستینتی نشان داده شده است. در همین رابطه نیز در مورد تردی بازی فولاد جوشکاری شده، نتایج در شکل ۶۵-۳ نشان داده شده است.

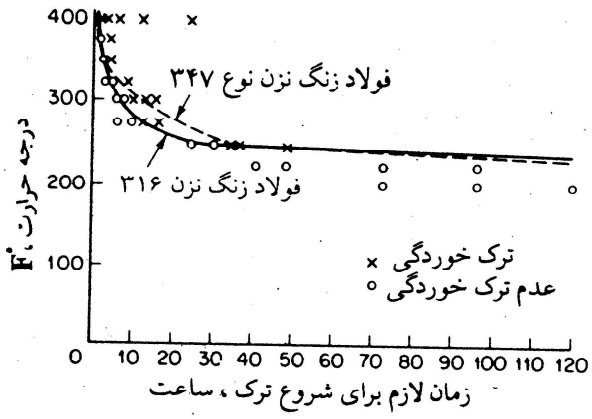
حالت فیزیکی محیط نیز مهم است. آلیاژهائی که در معرض محیطهای آبی تک فاز قرار می‌گیرند، گاهی اوقات کمتر صدمه می بینند تا موقعی‌که در همان درجه حرارت و تنش در معرض ترشدن و خشک شدن متناوب قراربگیرند.

اتوکلاو[1] نشان داده شده در شکل ۱۰-۴ برای آزمایشات scc تحت شرایط بخار و کندانس بخار مشتمل بر آب حاوی کلرور در ۴۰۰ می‌باشد. مایع کندانس شده در سقف اتوکلاو قطره قطره روی نمونه هامی چکد و بسرعت خنک می‌گردد. و باعث افزایش غلظت کلرید می گردد در این درجه حرارت کلرور سدیم در فاز بخار وجود دارد. فولاد زنگ نزن ۸-۱۸ در تنش پائینی حدودpsi ۲۰۰۰ بمدت ۲ ساعت در این شرایط ترک خورده است. اگر نمونه ها را در داخل محلول قرار می‌دادیم برای ترک خوردن نیاز به تنشهای بالاتر و زمانهای طولانی‌تری داشت. نتایج مشابهی، موقعی که

1- R.W.Staehle,F.H.Beck,and M.G.Fontana, Mechanism of Stress Corrosion of Austenitic Stainless Steels,*Corrosion*,Vol.15:P.51(1959).

جدول ۱۲-۳ محیطهایی که ممکن است باعث Scc فلزات و آلیاژها گردند

فلز یا آلیاژ	محیط	آلیاژ	محیط
آلیاژی‌های آلومینیم	محلولهای $NaCl-H_2O_2$	فولاد معمولی	محلولهای NaOH
	محلولهای NaCl		محلولهای $NaOH-Na_2SiO_2$
	آب دریا		محلولهای نیترات کلسیم،آمونیم، و سدیم
	هوا،بخارآب		مخلوطهای اسید ($H_2So_4-HNO_3$)
آلیاژهای مس	بخار و محلولهای آمونیاک		محلولهای HCN
	آمینها		محلولهای اسیدی H_2S
	آب ، بخارآب		آب دریا
آلیاژهای طلا	محلولهای $FeCl_3$		آلیاژهای Na-Pb مذاب
	اسیداستیک - محلولهای نمک	فولادهای زنگ‌نزن	محلولهای اسیدی کلردارمثل
اینکونل	محلولهای سودسوزآور		$BaCl_2,MgCl_2$
سرب	محلولهای استات سرب		محلولهای $NaCl-H_2O$
آلیاژهای منیزیم	محلولهای $NaCl-K_2CrO_4$		آب دریا
	آتمسفرهای روستائی و دریائی		H_2S
	آب مقطر		محلولهای $NaOH-H_2S$
مونل	سود سوزآور مذاب		بخار کندانس از آبهای کلردار
	اسید فلوریدریک	تیتانیم	اسید نیتریک دودزا،آب دریا
	اسید هیدروفلوسیلسیک		N_2O_4 , متانول - HCl
نیکل	سودسوزآور مذاب		

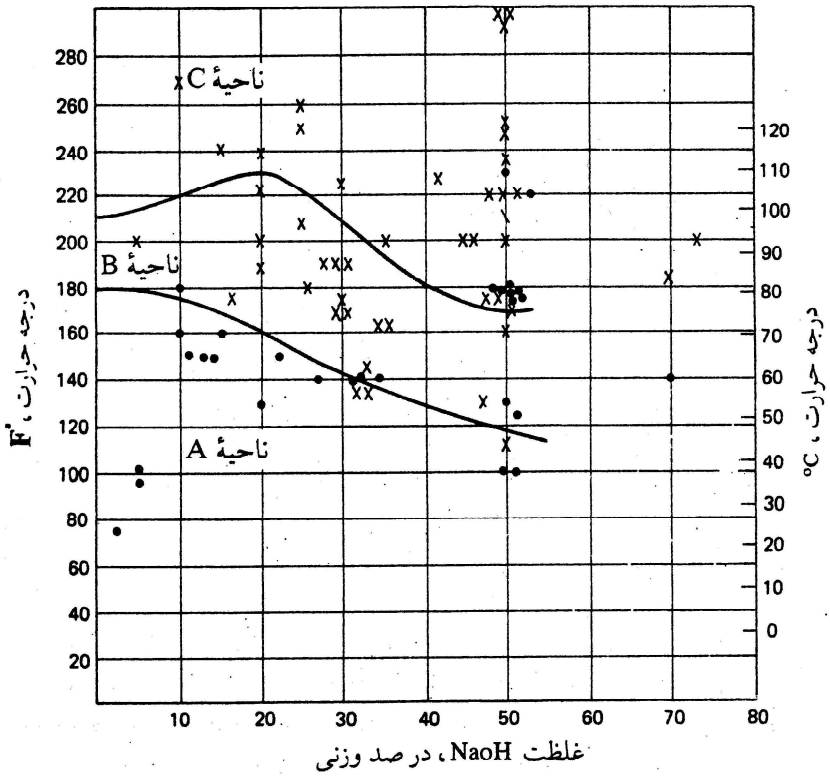


شکل ۶۴-۳ اثر درجه حرارت بر زمان شروع ترکها در فولادهای زنگ نزن نوع ۳۱۶ و ۳۴۷ در آب حاوی ppm ۸۷۵ نمک طعام (NaCl)

[W. W. Kirk, F.H.Beck, M. G. Fantana,stress Corosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in High Temperature Chloride Waters, in T.Rhodin(ed), Physical Metallurgy of Stress Corrosion Fracture, Interscience P ublishers,inc, New yorK,1959

نمونه بطور متناوب بداخل آب فرو برده شده و از آن بیرون آید، بدست می‌آید.

ارتباط جالبی بین این آزمایشات و نتایج بدست آمده در عمل وجود دارد. شکل ۶۶-۳ مثال بسیار خوبی در این مورد است. این اتوکلاواز فولاد زنگ نزن ۸-۱۸ فورج شده و برای کار در درجه حرارت و فشار بالا مورد استفاده قرار می‌گرفته است. ضخامت دیواره آن ۲ اینچ و ارزش آن ۲۰۰۰۰ دلار بوده است. این اتوکلاو فقط چند بار که مجموع زمان این چند بار، به چند ساعت می‌رسید، مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از مواد نفوذ کننده رنگی، ترکها در سطح خارجی اتوکلاو دیده می‌شود. این سطح به وسیله آب شهر که از کیفیت خوبی هم برخوردار بود، خنک می‌شد. بعد از هر بار کار آب سردکننده در جدار بیرونی اتوکلاو تخلیه می‌شد. قطرات آب که روی سطح اتوکلاو باقی می‌ماندند، در اثر تبخیر خنک می‌شدند و کلرور موجود در آن غلیظتر و متمرکز می‌شد.



شکل ۶۵-۳ دیاگرام NACE در مورد هیدروکسید سدیم (کاستیک، سودا) و اطلاعاتی که مبنای آن هستند. (انتشارات MTI شمارهٔ ۱۵، ۱۹۸۵) [اطلاعات از:

[H.W.SchmiH,et al,*Corrosion*,7,295-302,(1951)

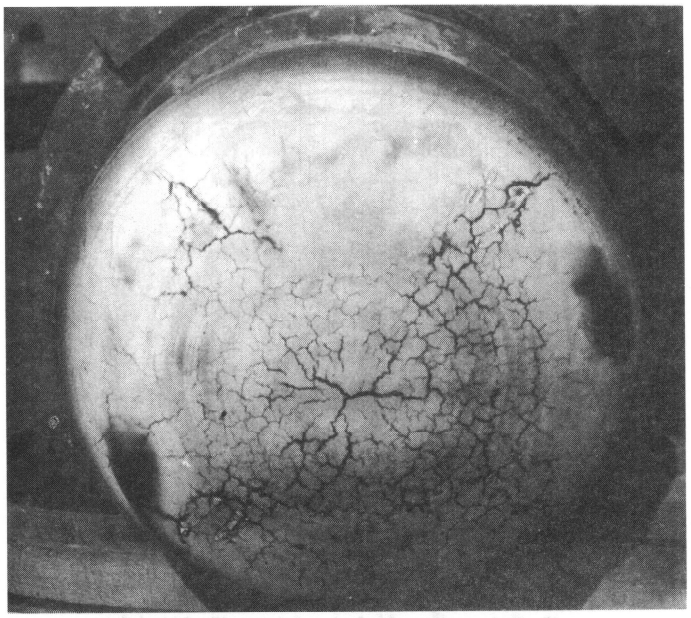
راهنما: ● عدم شکست

× شکست

ناحیهٔ A – فولاد کربنی، تنش زدایی لازم نیست، خطوط جوشکاری شده که با بخار گرم می‌شوند تنش زدایی شود.

ناحیهٔ B – فولاد کربنی، جوشها و خمها تنش زدایی شود.

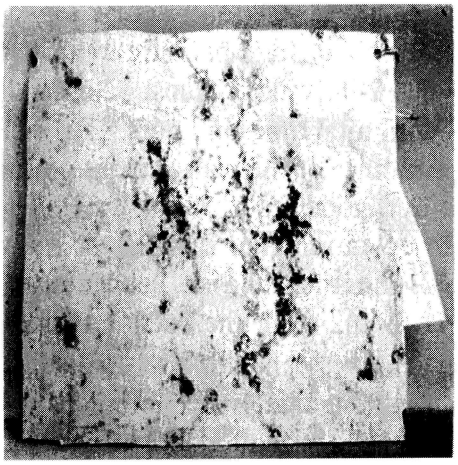
ناحیهٔ C – در این ناحیهٔ کاربرد آلیاژهای نیکل بایستی در نظر گرفته شود. زه های والوهادر نواحی B و C بایستی آلیاژ نیکل باشد.



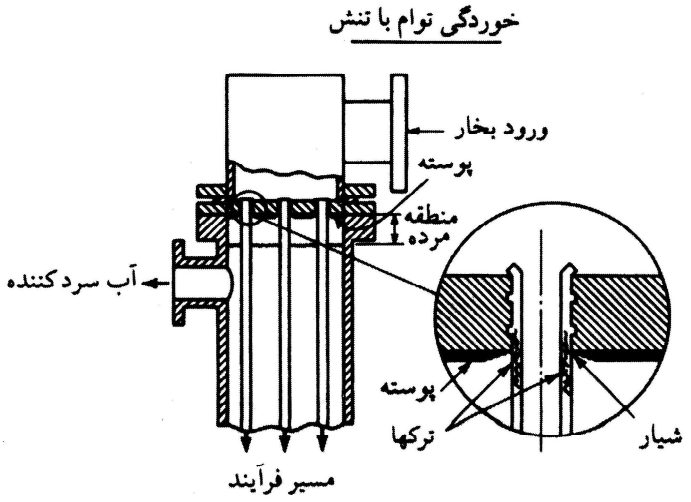
شکل ۶۶-۳ scc اتوکلاو از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴

شکل ۶۷-۳ ترک خوردن سطح خارجی یک تانک از فولاد زنگ نزن ۸-۱۸ را نشان می‌دهد. در اینجا نیز از مواد رنگی نافذ برای نشان دادن ترکها استفاده شده است. این تانک حاوی آب مقطر گرم بوده است. سطح خارجی به وسیله یک ماده عایق حاوی چند ppm کلرور پوشیده شده بود. در اثر نفوذ باران به این عایق کلرور موجود در آن شسته شده و محلول حاصل روی سطح خشک شده و تغلیظ شده بود. در این کارخانه ترکهای زیادی از این قبیل روی تانکها و خطوط لوله مشاهده شد. این گونه تجارب بسیار متداول بوده و scc سطوح خارجی نام گرفته‌اند.

شکل ۶۸-۳ موقعیت ترکها را در یک کندانسور از جنس فولاد زنگ نزن که به حالت عمودی قرار دارد، نشان می‌دهد. تلاطم سطح آب در منطقه مرده باعث تر و خشک شدن متناوب آن منطقه گردیده است. این مسئله با هوا گیری کندانسور و از بین بردن منطقه مرده حل شد. با این عمل لوله ها همواره در تماس با محلول قرار می‌گرفتند و دیگر scc در آنها واقع نمی‌شد.



شکل ۶۷-۳ scc خارجی فولاد زنگ نزن ۳۰۴



شکل ۶۸-۳ ترک خوردن لوله های فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در منطقهٔ مرده

هاروی‌یاما[۱] مقالهٔ بسیار عالی تحت عنوان ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش (scc) مبدلهای حرارتی لوله‌ای از جنس فولاد زنگ نزن در آب خنک کننده، نوشته است[۲]، این مقاله در برگیرندهٔ مطالعهٔ ۷۱۵ مبدل حرارتی صنعتی است که چندین سال مورد بهره برداری قرار گرفته‌اند. بعضی از نتیجه گیریهای وی عبارتند از: نحوهٔ ترک خوردن (scc) در ۴۷ درصد از مواد میان دانه‌ای و در ۱۶ درصد میان دانه‌ای بعلاوه بین دانه‌ای و ۸ درصد بین دانه‌ای بود. مهمترین عامل ترک خوردن وجود فضای بخار بود که در ۳۴ درصد موارد مشاهده شد که فاصله زیادی با علل دیگر ترک خوردن داشت. جایگزین کردن با آلیاژهای دیگر در ۳۱ درصد از موارد، بهترین روش جلوگیری از scc بود. انواع فولادهای زنگ نزن ۳۰۴، ۳۱۶، و ۳۲۱ عملکرد مشابهی داشتند اگر چه انواع با کربن پائین تر انهدامهای بیشتری نشان دادند. در مورد انواع فریتی یا دوبلکس هیچ گونه انهدامی گزارش نشد. مبدلهای افقی وآنهایی که آب در داخل لوله ها بود کمتر در معرض scc قرار گرفتند. این تحقیق شامل سرد کردن با آب دریا نبود.

یک بررسی به وسیله د . ر مکینتایر (Chem.Eng,p.132,Apr.5,1982) از واحدهای شیمیایی سواحل خلیج نشان داد که بازاء هر مورد هواگیری غلط، هر کدام یک مبدل عمودی در سال از دست داده‌اند. دو مقالهٔ دیگر در این رابطه عبارتند از چگونه از عهدهٔ کار با یک مبدلی که به طور ناصحیح هوا گیری می شود برآئیم، توسط ک. ت . بل(Chem.Eng.Progr.pp.54-55,July,93) و عیب یابی مبدلهای حرارتی لوله‌ای به وسیلهٔ س .یوکل (Chem.Engin.pp.57-80,July 25,1983) در ارتباط با لوله های مبدلهای حرارتی اسمالوود[۳] کار آیی لوله ها را بطرز عالی خلاصه کرده است. وی نواقص از نوع خوردگی را به شرح زیر بیان می‌کند: (۱) جایگزینی اشتباهی آلیاژ نامناسب، (۲) خوردگی فلز جوش، (۳) تمیز کردن غلط، (۴) خوردگی موقع آزمایش حمل و نقل و نصب، (۵) تنشهای پس ماند، (۶) عملیات حرارتی غلط، (۷) فلزات ناخواسته‌ای که در سطح فلز فرو رفته‌اند، (۸) جهت خاص قرار گرفتن کریستالها، (۹) زبری سطح، (۱۰) فرو رفتگی ها، (۱۱) آلودگیهای حاصل از درجه حرارت های بالا.

1- S.Harvyama

2- *Materials Performance*,pp. 14-19,Mar.1982)

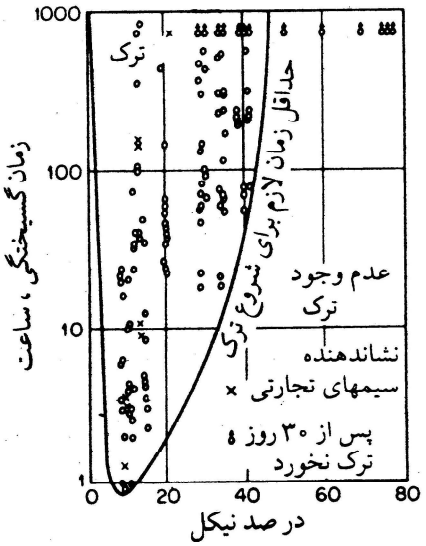
3- R.E.Smallwood, Heat Exchamger Tubing Reliability, *Materials Performance*, 16:27-34 (Feb 1977)

مثالی در مورد شماره ۱۱ جذب کربن در اثر کربوره شدن موضعی یا عمومی فلز می‌باشد. (جذب کربن بوسیلهٔ قطعات ریختگی در قسمت ۲۰-۳ بحث شده است). مثالهایی در مورد هر کدام از این نواقص ذکر شده است. نواقص مکانیکی نیز بحث شده‌اند، و روشهای پیداکردن نواقص، مثل اولتراسونیک، ارائه شده است. یک برنامه کنترل کیفیت در این زمینه پیش بینی شده است.

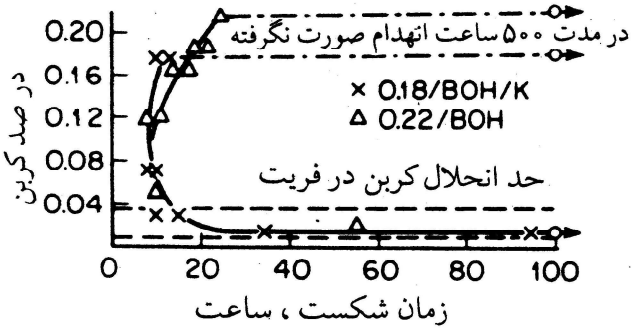
۴۲-۳ فاکتورهای متالورژیکی

فاکتورهای موثر در scc عبارتند از ترکیب شیمیائی متوسط، جهت ارجح کریستال‌ها (طرز قرارگرفتن کریستالها)، ترکیب و توزیع رسوبات در داخل فلز، واکنش نابجائیها با یکدیگر و میزان پیشروی تغییر حالتهای فازی (یا درجه شبه پایداری). این فاکتورها به علاوه ترکیب شیمیائی محیط و تنش اعمال شده، زمان شکست را تعیین می‌کنند.

در شکلهای ۶۹-۳ (افزورد نیکل به آلیاژ ۱۸Cr-Fe) و ۷۰-۳ تاثیر ترکیب آلیاژ در فولادهای زنگ نزن آستینتی و فولادهای کم کربن معمولی نشان داده شده است. در



شکل ۶۹-۳ scc سیمهائی از جنس آهن - نیکل - کرم در محلول ۴۲٪ کلرورمنیزیم جوشان



شکل ۷۰-۳ تاثیر مقدار کربن بر زمان شکست فولاد کم کربن در تماس با نیترات کلسیم آمونیم جوشان

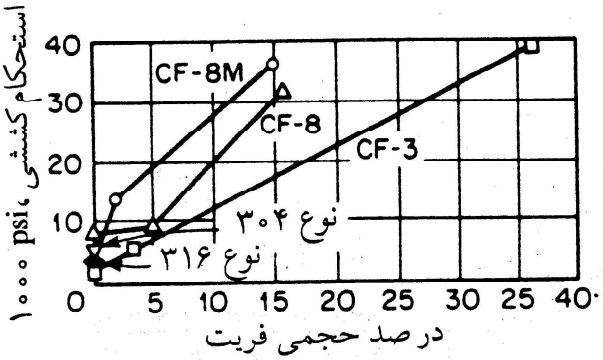
هر دوحالت در یک ترکیب خاص یک مینیمم در منحنی زمان شکست وجود دارد. در حقیقت این پدیده در سیستمهای آلیاژی دیگر نیز واقع می‌گردد (هر چند که عمومیت ندارد)، مثلاً در سیستم Cu-Au.

در گذشته گفته می‌شد که فلزات خالص ترک نمی‌خورند، لکن نشان داده شده است که مس ۹۹/۹۹۹٪ در محلولهای آمونیاکی حاوی یونهای کمپلکس $Cu(NH_3)_5^{++}$ ترک می‌خورند[1]. در حالی که یکی از روشهای جلوگیری از ترک خوردن استفاده از فلزات خالص می‌باشد، لکن بایستی از این روش با احتیاط استفاده نمود.

آلیاژهای آلومینیم با استحکام بالا دارای استعداد بیشتری به scc در جهات عمود بر جهت نورد نسبت به جهت طولی می‌باشند. این اثر ناشی از توزیع رسوبات در اثر نورد می‌باشد.

شکل ۷۱-۳ نشان می‌دهد که در فولادهای زنگ نزن ریختگی با افزایش درصد فریت در ساختمان فلز، مقاومت به scc افزایش یافته است. مناطق فریتی در زمینه آستینتی، پیشروی ترکها را مانع می‌گردند.

1- E.N.Pugh,W.G.Montague,A.R.C.Westwood, *Corrosion Sci.*, Vol.6:P345 (1966)



شکل ۷۱-۳ تاثیر درصد فریت بر تنش لازم برای ایجاد scc در چندین فولاد زنگ نزن در حالت ریختگی. در این شکل انواع ۳۰۴ و ۳۱۶ با صفر درصد فریت نیز نشان داده شده‌اند. نمونه ها به مدت ۸ ساعت در معرض کندانس از آبی با ۸۷۵ppm کلرور در ۴۰۰ درجهٔ فارنهایت قرار گرفته‌اند.

۴۳-۳ مکانیزم

اگر چه scc یکی از مهمترین مسائل خوردگی می‌باشد، مکانیزم آن هنوز به خوبی روشن نشده است. در تحقیقات خوردگی، این یک سئوال بزرگ است که هنوز جواب آن داده نشده است. دلیل اصلی این موضوع روابط پیچیده خواص فلز، فصل مشترک، و محیط خورنده می‌باشد. به علاوه، بنظر می‌رسد که مکانیزم scc در کلیه سیستمهای فلز- محیط خورنده یکسان نباشد. قابل اعتمادترین و مفید ترین اطلاعات از تجارب عملی بدست آمده است. تعدادی از مراحل عملیاتی ممکن یا پروسسهایی که مورد استفاده قرار می گیرند در اینجا مورد بحث قرار می گیرد.

در بوجود آوردن و آغاز نمودن ترکها،خوردگی رل مهمی را بازی می‌کند. یک حفره، شیار، یا غیر یکنواختی دیگر روی سطح باعث تمرکز تنش در آن نقاط می‌گردد[1]. تمرکز تنش در راس یک شیار با تقلیل شعاع شیار به شدت افزایش می‌یابد. ترکهای scc غالباً از ته حفره ها شروع می‌گردند.

1- Stress risers

به مجرد آنکه ترک ایجاد شد، راس ترک دارای شعاع بسیار کوچکی بوده وباعث تمرکز تنش بسیار بالائی می‌گردد، پردو[۱] با استفاده از تقویت کننده های صوتی نشان داد که رشد ترک پله پله یا با پرشهای کوتاه صورت می‌گیرد[۲]. در حقیقت صدای پینگ پینگ با گوش غیر مسلح شنیده می‌شد.

پریست[۳] لزوم وجود همزمان تنش کششی و خوردگی را برای ادامهٔ پیشروی ترکها به وسیلهٔ آزمایش زیر اثبات نمود[۴]. با اعمال حفاظت کاتدی به یک نمونه که در آن ترکها در حال پیشروی بوده‌اند، حرکت آنها متوقف شده است (خوردگی متوقف شده ولی وضعیت تنشی نمونه تغییری نکرده است). با برداشتن حفاظت کاتدی، ترکها دوباره شروع به پیشروی نمودند، این عمل بارها تکرار شد، در این تحقیق، از پیشروی ترکها عکسبرداری شد و پیشروی آنها با سرعت واقعی نمایش داده شد.

چون تنش موجود در راس ترک بالاست، لذا دراین نواحی تغییر شکل پلاستیکی صورت می‌گیرد. اگر آلیاژ در حالت تعادلی نباشد، ممکن است استحاله های فازی انجام گیرند. (مثلاً، تبدیل آستنیت به مارتنزیت در فولادهای زنگ نزن نیکل‌دار)، فاز جدید می‌تواند دارای استحکام، حساسیت در برابر هیدروژن، یا مقاومت خوردگی متفاوتی را داشته باشد. اگر آلیاژ در حالت تعادلی باشد، ممکن است مناطق کار سرد شده (مناطقی که تغییر شکل پلاستیکی داده‌اند)، به واسطهٔ ظاهر شدن مداوم پله‌های لغزشی دارای مقاومت کمتری از نظر خوردگی نسبت به بقیه فلز باشند. اگر قبل از تماس با محلول، فلزات به سختی کار سرد شوند، سرعت خوردگی بالائی که جوابگوی پیشروی سریع ترکها در مرحلهٔ scc باشد بدست نخواهد آمد. مکانیزم دینامیکی فوق می‌تواند این پدیده را توجیه نماید.

نشان داده شده است که نقش تنش کششی در پاره کردن پوسته های محافظ، موقع شروع و رشد ترکها، بسیار مهم است. پوسته های ناشی از کدر شدن فلز (مثل برنجها)، پوسته های اکسیدی نازک، لایه هائی که غنی تر از عنصر آلیاژی نجیب تر بوده (مثل آلیاژهای مس، طلا و بعضی فولادهای زنگ نزن) و یا دیگر فیلمهای پسیو از این

1- Pardue

2- W.M.Pardue, F.H.Beck, and M.G.Fontana, Am.Soc.Metals,Trans.Quart., Vol.54:P.539-548 (1961) 3- Priest

4- D.K.Priest,F.H.Beck, and M.G.Fontana, Trans.Am.Soc.Metals, Vol.47:P.473-492 (1955)

قبیل می‌باشند. شکستن پوسته های غیر فعال یا لایه های سطحی غنی شده روی فولاد زنگ نزن، امکان خوردگی سریع در نقاط مختلف سطح را فراهم می‌سازد و به این وسیله ترکهاآغاز می‌شوند. شکست پوسته های راس یک ترک در حال پیشروی، سطح فلزی بدون پوشش را در معرض محیط خورنده قرار می‌دهد و پیشروی ادامه می‌یابد. موقعی که انحلال موضعی سریع انجام می‌شود، پیشروی ترک نیز سریع خواهد بود.

در مورد ترکهای بین دانه‌ای، ممکن است مرز دانه ها آندی تر باشند (مقاومت خوردگی کمتر). این حالت ممکن است در اثر راسب شدن فازها، فقیر شدن یا غنی شدن نسبت به یک عنصر آلیاژی و یا جذب سطحی اتفاق افتاده باشد وبه این ترتیب مسیر مستعدی برای رشد ترکها بوجود آورد. یک مثال دیگر در زمینهٔ انحلال موضعی، ترک خوردن فولادهای کم کربن در محلولهای نیترات می‌باشد. دراین حالت کاربید آهن نسبت به فریت کاتدی می‌باشد..

این مثالها پیچیدگی روابط بین فلز و محیط را روشن می‌سازد و وجود سیستم آلیاژ- محیط خاص برای ترک خوردن آلیاژها را توصیه می نماید. در چند سال گذشته تحقیقات و اصلاحات بسیار زیادی در زمینهٔ ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش (scc) صورت گرفته است اهمیت موضوع با این واقعیت که تلاشها و بودجه های صرف شده در مورد مطالعهٔ خوردگی توام با تنش به تنهایی بیشتر از تمام انواع دیگر خوردگی بوده است، تاکید می‌شود. مطالعهٔ وسیع مخصوصاً در زمینهٔ انرژی هسته‌ای و سیستمهای تبدیل ذغالسنگ ادامه دارد سقوط پل سیلور[۱] در رودخانهٔ اوهایو[۲] که منجر به کشته شدن حدود ۴۰ نفر گردید باعث معطوف شدن اذهان عمومی به این نوع خوردگی شده است. انهدامهای پر هزینه در واحدهای صنعتی باعث مطالعهٔ وسیع این خوردگی شده است .

مراحل و مکانیزمهای مفصل و زیادی برای ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش زوجهای فلز – محیط خاص ارائه شده‌اند. دو مدل اصلی در مورد یک مکانیزم کلی عبارتند از (۱) مدل انحلالی که در آن به خاطر پاره شدن پوستهٔ غیر فعال در اثر تغییر شکل فلز در راس ترک انحلال آندی (شکل ۷۹-۳) در راس ترک اتفاق می افتد و (۲) مدل مکانیکی که در آن بعضی عوامل خاص با جذب سطحی و واکنش با پیوندهای اتمها که تحت تنش نیز هستند باعث کاهش استحکام پیوندها می‌شوند. مدل اولی عمومی

1- Silver Bridge 2- Ohio River

تراز دومی بنظر می‌رسد. انشعابات زیادی دربارهٔ هر مدل فرض شده است تردی هیدروژنی مخصوصاً در مورد آلیاژهای با استحکام بالا فاکتور مهمی می‌تواند باشد در اکثر کارهای مهندسی، تجارب گذشته بهترین راهنما هستند و در مرحلهٔ دوم آزمایشات معتبر و مطمئن در تمام موارد شیمی، متالورژی، و مکانیک (حوزه های تنشی) بایستی در نظر گرفته شوند.

در زمان نوشتن این فصل، یک کتاب مرجع در زمینهٔ ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش و خوردگی توام با خستگی[۱] تحت نظارت پروفسور راجر استیلی در دانشگاه ایالتی اوهایو در دست تهیه است این پروژه بوسیله آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفته[۲] حمایت می‌شود. هدف اصلی کتاب کمک به طراحی مهندسی می‌باشد کتاب قرار است در ۱۹۸۶ به چاپ برسد. این کتاب بهترین و مفیدترین اطلاعات مهندسی را در زمینهٔ ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش و زیر شاخهٔ مهم آن خوردگی خستگی ارائه می‌دهد.

۳-۴۴ جداول چند محیطی

علاوه بر اطلاعاتی که در جاهای دیگر در این کتاب ارائه گردیده است، در اینجا چند جدول که نشان دهندهٔ تمایل به ترک خوردن در سیستمهای فلزات و الیاژها در محیطهای مختلف، شامل فلزات مذاب ارائه می گردد. این جداول از دستور العمل شمارهٔ ۱۵ انستیتو تکنولوژی مواد صنایع شیمیایی[۳](MTI) با عنوان راهنمای جلوگیری از ترک خوردن، تحت اثر تنش و خوردگی در صنایع شیمیایی می باشد. بایستی تاکید شود که این جداول صرفاً جنبه راهنمایی داشته و تصویر خوبی از مسئله ارائه می دهند.

جدول ۱۳-۳ وضعیت را در مورد فولادهای کربنی نشان می دهد. علامت A به مفهوم ASTM است، Gr به معنی نوع، و HSLA به معنی فولاد کم آلیاژی و پر استحکام می‌باشد. در فصل ۵ مواد مهندسی شامل فلزات و آلیاژها تشریح شده‌اند. فولادهای کم

1- Stress CorrosionCracking and Corrosion Fatigue Hand book

2- Advanced Research Projects Agency,ARPA

3- Materials Technology Institute of the Chemical Process Industries,inc (یا باختصار MTI)

جدول ۱۳-۳ فولادهای کم آلیاژی نسبت به محیطهای مختلف

	Cl^-, اسید	Cl^-, خنثی	Cl^-, اکسیدان	آب دریا	آب با خلوص بالا	OH^-	HCN	S^{2-}	S^{2-}/Cl^-	کربناتها
A۵۱۶ Gr.۷۰ C-M	X	۱	۱	۱	A	۵	۲	۲	۲	۴
A۱۰۶B C-Mn	X	۱	۱	۱	A	۵	۲	۲	۲	۴
A۲۸۵ Gr.C C.Mn	X	۱	۱	۱	A	۵	۲	۲	۲	۴
A۲۴۲ HSLA	X	۱	۱	۱		۵	۲	۲	۲	۴
A۵۱۷ Gr.F HSLA	X	۱	۱	۱		۵	۵	۵	۵	۴
A۳۸۷(۲۲)۲۱/۴CR-۱MO	X	۱	۱	۱		۵	۲	۲	۲	۴
AISI ۴۱۴۰	X	۱	۱	۱	۳	۵	۵	۵	۵	۴
AISI ۴۳۴۰	X	۱	۱	۱	۳	۵	۵	۵	۵	۴

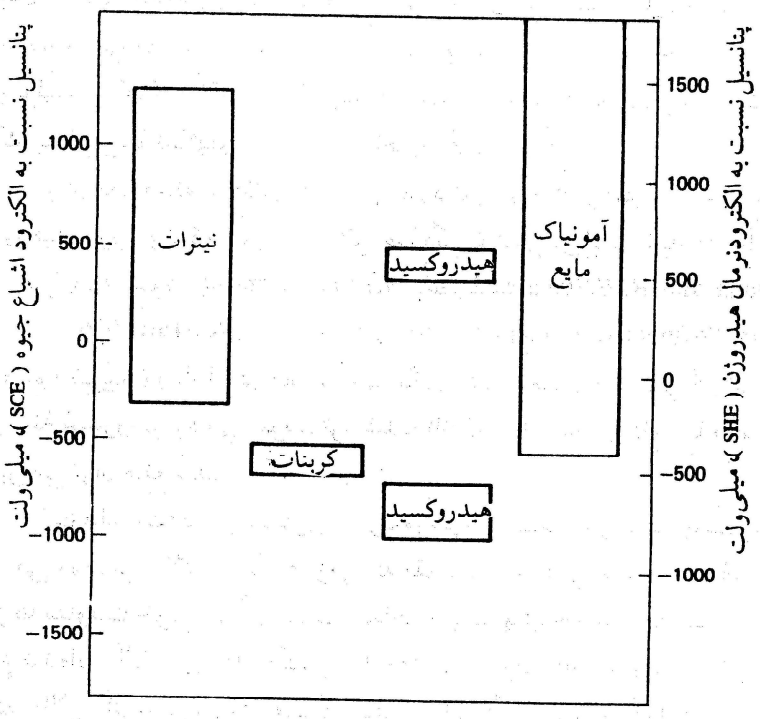
	SO_3^{2-}	SO_4^{2-}	CrO_4	NO_3^-	NH_3	$-H_2O$	آمینها	Hf	Cd	Al	Bi
A۵۱۶ Gr.۷۰ C-M	۱	A	۱	۵	۴	۴	۴	۱	۵	X	۱
A۱۰۶B C-Mn	۱	A	۱	۵	۴	۴	۴	۱	۵	X	۱
A۲۸۵ Gr.C C.Mn	۱	A	۱	۵	۴	۴	۴	۱	۵	X	۱
A۲۴۲ HSLA	۱	A	۱		۴	۴	۴	۱	۵	X	۱
A۵۱۷ Gr.F HSLA	۱	A	۱	۵	۴	۴	۴	۱	۵	X	۱
A۳۸۷(۲۲)۲۱/۴CR-۱MO	۴	A	۱		۴	۴	۴	۵	۵	X	۱
AISI ۴۱۴۰	۴	A	۱	۵	۴	۴	۴	۵	۵	X	۱
AISI ۴۳۴۰	۴	A	۱	۵	۴	۴	۴	۵	۵	X	۱

	Hg	Li	Pb	Sn	Zn	PO_4^{3-}
A۵۱۶ Gr.۷۰ C-M	۱	۵	۱	۱	۵	۴
A۱۰۶B C-Mn	۱	۵	۱	۱	۵	۴
A۲۸۵ Gr.C C.Mn	۱	۵	۱	۱	۵	۴
A۲۴۲ HSLA	۱	۵	۱	۱	۵	۴
A۵۱۷ Gr.F HSLA	۱	۵	۱	۱	۵	
A۳۸۷(۲۲)۲۱/۴CR-۱MO	۱	۵	۱	۱	۵	
AISI ۴۱۴۰	۱	۵	۱	۱	۵	
AISI ۴۳۴۰	۱	۵	۱	۱	۵	

توضیحات : ۱ مقاوم.
۲ مقاوم مگراینکه سخت یا کار سرد شده باشد با سختی بالاتر از RC ۲۲.
۳ مقاوم مگراینکه سخت شده باشد بالاتر از سختی RC ۳۳.
۴ مقاوم بجز در بعضی محدوده‌های دما - غلظت - به متن مراجعه شود.
۵ مقاوم نیست.
X برای این محیط توصیه نمی‌شود - خوردگی عمومی یا حفره‌دار شدن سریع.
A مقاوم مگراینکه بطریق آندی پولاریزه شود.

آلیاژی یا با استحکام متوسط دارای استحکام تسلیم کمتراز ۱۸۰/۰۰۰ پوند بر اینچ مربع می‌باشند. فولادهای کم آلیاژی با استحکام خیلی بالا (مثلاً AISI۴۳۴۰) به ترک خوردن در اثر خوردگی و تنش خیلی مستعدتر هستند نسبت به فولادهای ضعیف تر. بطورکلی با افزایش استحکام، فولاد به ترک خوردن مستعد تر می شود. مقادیر Kiscc معمولاً کسر کوچکتری از استحکام کششی هستند. Kiscc فاکتور تمرکز تنش بحرانی در حالت کرنش دوبعدی در شرایط خوردگی توام با تنش است. مکانیک شکست در قسمتهای بعدی در همین فصل مورد بحث قرار خواهد گرفت .

در شکل ۷۲-۳ محدوده های پتانسیل که در آن scc فولاد کربنی روی می‌دهد در



شکل ۷۲-۳ دیاگرام شماتیکی نشان دهنده محدودههای پتانسیل که در آن scc فولاد کربنی در محلولهای مختلف واقع می شود.

۵ محلول نشان داده شده است (از دستورالعمل MTI). این به آن معنی است که تغییرات در ترکیب محلول یا دما می تواند پتانسیل سیستم رابه منطقهٔ خطر وارد کند یا خارج سازد. حفاظت کاتدی و/یا اضافه کردن ممانعت کننده ها می توانند مانع ترک خوردن شوند.

جدول ۱۴-۳ برای فولادهای زنگ نزن نوردی است، جدول ۱۵-۳ برای آلیاژهای مس، جدول ۱۶-۳ برای آلیاژهای آلومینیم، جدول ۱۷-۳ برای آلیاژهای تیتانیم و زیرکونیم، و جدول ۱۸-۳ برای سایر فولادهای زنگ نزن و آلیاژهای پرنیکل می‌باشد. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد تیتانیم، رجوع شود به یک مقالهٔ پیمایشی عالی و مفصل به وسیلهٔ بلاک برن، فی‌نی، بک[1].

علاوه بر اطلاعات ارائه شده در جدول ۱۷-۳، زیرکونیم و آلیاژهای آن در این محیطها از نظر scc مقاوم هستند: آب خالص، هوای مرطوب، بخار، و اکثر محلولهای سولفاتها و نیتراتها. این فلزات در این محلولها مستعد به ترک خوردن هستند: در محلولهای $FeCl_3$ و $CuCl_2$، هالوژنها در آب، بخارات هالوژن، و مایعات آلی مثل تتراکلرید کربن، و نمکهای مذاب در دماهای بالا.

برای یک مقالهٔ پیمایشی عالی در مورد اورانیم و آلیاژهای آن به ن. ج. مانگانی تردی هیدروژنی و ترک خوردن در اثر خوردگی و تنش اورانیم وآلیاژهای آن در کتاب زیر مراجعه شود. M.G.Fontana and R.W.Staehle,eds,*Advances in Corrocion Science and Technology*, Vol.6,pp.89-161,Plenum Press,NewTark1976

کلومبیم (نیوبیم) و تانتال در معرض خوردگی تنشی معمول قرار نمی گیرند. این فلزات به وسیلهٔ هیدروژن ترد می شوند. ترد شدن تانتال در اسیدهای داغ رابا متصل کردن به پلاتین می توان مانع شد.

آلیاژهای منیزیم در بسیاری موارد موقعی‌که سبکی وزن یک فاکتور مهم است بکار می رود. بر خلاف تصور عمومی که مقاومت خوردگی منیزیم ضعیف است، این آلیاژ ها مقاومت خوبی در آب نشان داده‌اند. سیستمهای حفاظتی مطمئنی مثل پوششها ابداع شده‌اند. آلیاژهایی که منگنز دارند مقاومت خوبی دارند، ولی آنهایی که دارای مقادیر بالایی آلومینیم و روی هستند خیلی به خوردگی تنشی مستعد هستند.

1- "Stress Corrosion Cracking of Titaniom Alloys " in M.G.Fontana and R. W. Staehle, eds., *Advances in Corrosion Science and Technology*, Vol.3,pp.67-292, Plenum Press, New York, 1973

جدول ۱۴ـ۳ فولادهای زنگ‌نزن در حالت نوردی نسبت به محیط‌های مختلف

	Cl^-، اسید	Cl^-، خنثی	Cl^-، اکسیدان	F^-، SiF_6^{-2}	OH^-	S^-	S^{-2}/Cl^-	SO_4^{-2}	CrO_4^{-2}	NO_3^-	NH_3	O_2SCC	آب دریا	Cd	Al	Hg	Li	Pb	Zn
فریتی																			
۴۰۵	X	۱	۱		۱	۱	۱		۱	۱	۱	۳	X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۰۹	X	۱	۱		۱	۱	۱		۱	۱	۱	۳	X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۲۹	X	۱	۱		۱	۱	۱		۱	۱	۱	۳	X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۳۰	X	۱	۱		۱	۱	۱		۱	۱	۱	۳	X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۳۴	X	۱	۱		۱	۱	۱		۱	۱	۱	۳	X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۳۶	X	۱	۱		۱	۱	۱		۱	۱	۱	۳	X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۴۲	X	۱	۱		۱	۱	۱		۱	۱	۱	۳	X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۴۶	X	۱	۱		۱	۱	۱		۱	۱	۱	۳	X	۵	X	۱	۵	۱	۵
مارتنزیتی																			
۴۰۳	X	۲	۳	۳	۴	۲	۲	۴	۱	۴			X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۱۰	X	۳	۳	۳	۴	۲	۲	۴	۱	۴			X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۱۴	X	۳	۳	۳	۴	۵	۵	۴	۱	۴			X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۱۶	X	۳	۳	۳	۴	۵	۵	۴	۱	۴			X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۲۰	X	۳	۳	۳	۴	۲	۲	۴	۱	۴			X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۲۲	X	۳	۳	۳	۴	۵	۲	۴	۱	۴			X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۳۱	X	۳	۳	۳	۴	۵	۵	۴	۱	۴			X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۴۰A	X	۳	۳	۳	۴	۵	۵	۴	۱	۴			X	۵	X	۱	۵	۱	۵
۴۴۰C	X	۳	۳	۳	۴	۵	۵	۴	۱	۴			X	۵	X	۱	۵	۱	۵
دوپلکس																			
SAF ۲۲۰۵	۴	۴	۴			۲	۲		۱	۱			X		X	۱		۱	۵
Uranus ۵۰	X	۴	۴		۴	۲	۲		۱	۱			X		X	۱		۱	۵
۳RE ۶۰	X	۴	۴				۵		۱	۱			X		X	۱		۱	۵
Ferralium ۲۵۵	۴	۴	۴		۴	۲	۲		۱	۱			X		X	۱		۱	۵
AISI ۳۲۹	X	۴	۴		۴		۵		۱	۱			X		X	۱		۱	۵

توضیحات : ۱ مقاوم
۲ مقاوم مگر اینکه کار سرد یا سخت شده باشد بالاتر از ۲۲Re
۳ مقاوم مگر اینکه سخت شده باشد بالاتر از ۳۳Re
۴ مقاوم بجز در بعضی محدوده‌های دما ـ غلظت ـ به متن مراجعه شود
X برای این محیط توصیه نمی‌شود ـ خوردگی عمومی یا حفره‌دار شدن سریع

جدول ۱۵-۳ آلیاژهای مس نسبت به محیطهای مختلف

کد CDA	Cl^-	CrO^{-2}_4	HPO^{-2}_4	HCO^{-2}_4	OH^-	S^{-2}	S^{-2}/Cl^-	SO_2	SO^{-2}_3	SO^{-2}_4	NO^-_2	NO^-_3	NH_3	بخار	آب‌دریا	Bi	Hg	Li	Pb	Sn	Zn	امیها + O_2
مس ETP ۱۱۰	۱				۱	۱							۲		۱	۵	۵	۵	۱	۱		۲
مس DHP ۱۲۲	۱				۱	۱	X						۲		۱	۵	۵	۵	۱	۱	۱	۲
برنز ۲۲۰	۱				۱	۱							۵		۱	۵	۵	۵		۱	۱	۵
برنج قرمز ۲۳۰	۱				۴	۱		۱		۴	۵	۵	۵		۱	۵	۵	۵	۵	۵	۱	۵
برنج کارتریج ۲۶۰			۴	۴	۴	۱		۵		۴	۵	۵	۵		۱	۵	۵	۵	۵	۵	۱	۵
برنج زرد ۲۷۰	۴		۴	۴	۴	۱				۴	۵	۵	۵		۲	۵	۵	۵	۵	۵	۱	۵
فلز مونتز ۲۸۰	۴		۴	۴	۴	۱				۴	۵	۵	۵		۲	۵	۵	۵	۵	۵	۱	۵
برنج آدمیرالتی ۴۴۳	۱	۱	۱	۱	۴	۱		۵		۴	۵	۵	۵		۱	۵	۵	۵	۵	۵	۱	۵
برنج آلومینیم ۶۸۷	۱				۴	۱		۵		۴	۵	۵	۵		۱	۵	۵	۵	۵	۵	۱	۵
برنج دریایی ۴۶۴	۱				۴	۱				۴	۵	۵	۵		۱	۵	۵	۵	۵	۵	۱	۵
فسفر برنز ۵۱۰	۱				۱	۱		۱					۵		۱	۵	۵	۵			۱	۵
آلومینیم برنز ۶۱۳	۱				۱	۱							۵		۱	۵	۵	۵			۱	۱
آلومینیم برنز ۶۱۴D	۱				۱	۱							۵	۵	۱	۵	۵	۵			۱	۵
نیکل - آلومینیم‌برنز ۶۳۰	۱				۱	۱							۵		۱	۵	۵	۵			۱	۵
برنز پرسیلیسیم ۶۵۵	۱				۱	۱							۲	۵	۱	۵	۵	۵			۱	۲
برنز منگنز ۶۷۵	۳*				۱	۱							۵		۳*	۵	۵	۵			۱	۵
کوپرونیکل ۱۰-۶۹۰-۷	۱				۱	۱	x	۱		۱	۱	۱	۴		۱	۵	۵	۵			۱	۲
کوپرنیکل ۳۰-۷۰-۷۱۵					۱	۱	x	۱		۱	۱	۱	۴		۱	۵	۵	۵			۱	۲
فلز اونس ۸۳۶	۱				۱	۱							۵		۱	۵	۵	۵			۱	۵
برنز منگنز ۸۶۵	۱				۱	۱							۵		۳*	۵	۵	۵			۱	۵
برنز ۹۰۵G	۱				۱	۱							۵		۱	۵	۵	۵			۱	۵
برنز ۹۲۲M	۱				۱	۱							۵		۱	۵	۵	۵			۱	۵
برنز نیکل - آلومینیم - منگنز ۹۵۷	۱				۱	۱							۵		۱	۵	۵	۵			۱	۵
برنز - نیکل - آلومینیم ۹۵۸	۱				۱	۰							۵		۱	۵	۵	۵			۱	۵
کوپرونیکل ۹۶۴	۱				۱	۱	x						۴		۱	۵	۵	۵			۱	۲
نیکل نقره‌ای ۷۷۰						۱	۱	۵				۵	۵		۵	۵	۵	۵			۱	۵

جدول ۱۵-۳

کد CDA	N_2H_4 + O_2	Pb-Sn لحیم	Cl^- اکسید	سیترانها	تارتاراتها
مس ETP ۱۱۰		۱			
مس DHP ۱۲۲		۱			
برنز ۲۲۰					
برنج قرمز ۲۳۰	۵	۵	۱		
برنج کارتریج ۲۶۰	۵	۵	۴	۴	۴
برنج زرد ۲۷۰	۵	۵	۴	۴	۴
فلز مونتز ۲۸۰	۵	۵	۴		
برنج آدمیرالتی ۴۴۳	۵	۵	۴	۴	۴
برنج آلومینیم ۶۸۷	۵	۵	۱		
برنج دریایی ۴۶۴	۵	۵			
فسفر برنز ۵۱۰		۱			

توضیحات : * حلالهای کلرینه

۱ مقاوم

۲ مقاوم مگراینکه سخت یا کار سرد شده باشد

۳ مقاوم مگراینکه حساس شده باشد

۴ مقاوم بجز در دماهای یا غلظتهای خاص ـ برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود

X برای این محیط توصیه نمی‌شود

جدول ۱۶-۳ آلیاژهای آلومینیم نسبت به محیطهای مختلف

	خنثی	OH^-	NH_3	NO_3^-	S^{-2}	S^{-2}/Cl^-	*	اسید	آب دریا	SO_4^{-2}	Cd	Al	Bi	Hg	Li	Pb	Ga	Sn	**
۱۱۰۰	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۲۰۲۴	۵	X	۱	۱	۱	۱	۵	X	۵		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۳۰۰۳	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۵۰۵۲	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۵۰۸۳	۳	X	۱	۱	۱	۱	۳	X	۳		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۵۱۵۴	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۶۰۶۱	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۶۰۶۳	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۷۰۷۵	۵	X	۱		۱	۱	۵	X	۵		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۲۴۲	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۲۹۵	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
A۳۳۲	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
A۳۵۶	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
B۴۴۳	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۵۱۴	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵
۹۲۰	۱	X	۱	۱	۱	۱	۱	X	۱		۱	—	۱	۵	۱	۱	۵	۵	۵

توضیحات : * آب با خلوص بالا
** فلزات قلیایی
۱ مقاوم
۳ مقاوم در بعضی موارد
۵ مقاوم نیست
X برای این محیط توصیه نمی‌شود ـ خوردگی عمومی یا حفره‌دار شدن سریع

جدول ۱۷-۳ آلیاژهای تیتانیم و زیرکونیم نسبت به محیطهای مختلف

Type	UNS	Cl^- اسید	Cl^- خنثی	Cl^- اکسیدکننده	OH^-	NH_4	NO_3^-	S^{-2}	S^{-2}/Cl^-
C.P.Gr. ۱ Ti	R۵۰۲۵۰	۱	۱	۱	X	۱	۴	۱	۱
C.P.Gr. ۲ Ti	R۵۰۴۰۰	۱	۱	۱	X	۱	۴	۱	۱
Ti-Pd Gr.۷	R۵۲۴۰۰	۱	۱	۱	X	۱	۴	۱	۱
Ti-۶Al-۴V Gr.۵	R۵۶۴۰۰	۲	۲	۲	X	۱	۴	۱	۱
Low Alloy Gr.۱۲		۱	۱	۱	X	۱	۴	۱	۱
C.P.Zr	R۷۰۲۰۰	۱	۱	۱	۱	۱	۴	۱	۱
Zircaloy	R۷۰۴۰۰	A	A	A	۱	۱	۴	۱	۱
Zircaloy	R۷۰۵۰۰	A	A	A	۱	۱	۴	۱	۱

	O_2SCC	MeOH	Br_2	*	I	Hg	Ga	Cd	Sn	Ag	Ce
C.P.Gr. ۱ Ti	۱	۵		۱		۵	۵	۵	۱	۱	
C.P.Gr. ۲ Ti	۱	۵		۱		۵	۵	۵	۱	۱	
Ti-Pd Gr.۷	۱	۵		۱		۵	۵	۵	۱	۱	
Ti-۶Al-۴V Gr.۵	۱	۵		۵		۵	۵	۵	۵	۵	
Low Alloy Gr.۱۲	۱	۵		۱		۵	۵	۵	۱	۱	
C.P.Zr	۱	۵	۵	۵	۵	۵					۵
Zircaloy	۱	۵	۵	۵	۵	۵					۵
Zircaloy	۱	۵	۵	۵	۵	۵					۵

توضیحات: * حلالهای کلرینه شده.

۱ مقاوم.

۲ مقاوم مگراینکه سخت یا کار سرد شده باشد.

۳ مقاوم مگراینکه حساس شده باشد.

۴ مقاوم بجز شرایط دما و غلظتهای خاص - برای توضیحات بیشتر.

۵ مقاوم نیست.

X برای این محیط توصیه نمی‌شود.

A مقاوم مگراینکه بطریق آندی پولاریزه شود - برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود.

جدول ۱۸ـ۳ ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش در محیطهای مختلف ـ سیستمهای آلیاژی

این جدول نشاندهنده آماری است بر اساس تجارب CFI و بایستی فقط بعنوان یک راهنما برای جداسازی مورد استفاده قرار گیرد.

UNS	Cl^-, اسید	Cl^-, خنثی	Cl^-, اکسیدان	F^- BR$^-$	SiF_6^{2-}	I	OH^-	S^{2-}	S^{2-}/Cl	$S_4O_6^{2-}$	SO_3^{2-}	SO_4^{2-}	CrO_4^{2-}
S۱۵۷۰۰	۵	۴			۱	۱		۵				۵	۱
S۱۷۴۰۰	۵	۴			۱			۵				۵	۱
S۱۷۷۰۰	۵	۵			۱			۵				۵	۱
S۲۰۲۰۰	۵	۵	۵		۱	۱	۴	۲		۳	۳	۱	۱
S۲۰۹۱۰	۵	۵	۵		۱	۱	۴	۲		۳	۳	۱	۱
S۲۱۶۰۰	۵	۵	۵		۱	۱	۴	۲		۳	۳	۱	۱
S۲۱۶۰۳	۵	۵	۵		۱	۱	۴	۲		۳،۴	۳،۴	۱	۱
S۲۱۸۰۰	۵	۴	۵		۱	۱	۴	۲		۳	۳	۱	۱
S۳۰۴۰۰	۵	۵	۵		۱	۱[h]	۴	۲	۵	۳	۳	۱	۱
S۳۰۴۰۳	۵	۵	۵		۱	۱[h]	۴	۲	۵	۳،۴	۳،۴	۱	۱
S۳۰۹۰۸	۵	۵	۵		۱	۱	۴	۲		۳	۳	۱	۱
S۳۱۰۰۸	۵	۵	۵		۱	۱[j]	۴	۲		۳	۳	۱	۱
S۳۱۶۰۰	۵	۵	۵	۴	۱	۱[j]	۴	۲	۱[i]	۳	۳	۱	۱
S۳۱۶۰۳	۵	۵	۵		k	k	۴	۲	۱[i]	۳،۴	۳،۴	۱	۱
S۳۱۷۰۰	۵	۵	۵		۱	۱	۴	۲	۱[i]	۳	۳	۱	۱
S۳۱۷۰۳	۵	۵	۵		۱	۱	۴	۲	۱[i]	۳،۴	۳،۴	۱	۱
S۳۲۱۰۰	۵	۵	۵		۱	۱	۴	۲		۱	۱	۱	۱
S۳۲۹۰۰	۴	۵	۵		۲	۲	۴					۱	۱
S۳۴۷۰۰	۵	۵	۵		۱	۱	۴	۲		۱	۱	۱	۱
S۳۸۱۰۰	۴	۴	۵		۱	۱	۴					۱	۱
S۴۳۱۰۰	۵	۵	۵		۲		۴					۲	۱
S۴۴۶۲۵	۴	۱	۴				۴	۲					۱
S۴۴۶۲۶	۴	۱	۴				۴	۲					۱
S۴۴۷۰۰	۱	۱	۱				۴	۲					۱
S۴۵۰۰۰	۴	۱	۴		۲		۴	۲				۲	۱
S۴۵۵۰۰	۴	۱	۴		۲		۴	۲				۲	۱
N۰۲۲۰۰	۴	۱	X	۱	۲	۱	۱	X				۱	۱
N۰۲۲۰۱	۴	۱	X	۱	۲	۲،۴	۱	X				۱	۱
N۰۴۴۰۰	a	۱	X	۱	۵	۱	۴					۱	۴
N۰۵۵۰۰	۱	۱	X		۵	۱	۴					۱	۱
N۰۶۰۰۷	۴	۱	۱	۱	۱	۱	۴				۱	۱	۱
N۰۶۴۵۵	۴	۱		۱	۱	۱		۲	۳[k]	۱			۱
N۰۶۶۰۰	۱	۱		۱	۲	۱	۲	۲،۳		۳	۳	۳[b]	۱
N۰۶۶۰۱	۱	۱		۱	۲	۱	۴	۲					۱
N۰۶۶۲۵	۳[g]	۱		۱	۱	۱		۲	۳[k]	۳	۳		۱
N۰۶۶۹۰	۱	۱		۱		۱							۱
N۰۷۷۱۸	۵[c]	۱											۱
N۰۷۷۵۰		۱		۵[c]					۵[c]				۱
N۰۸۰۲۰	۴	۴	۴	۱	۱	۱	۴		۱	۱		۱	۱
N۰۸۷۰۰	۴	۱	۴	۱	۱	۱						۱	۱
	۴	۱	۴	۱	۱	۱						۱	۱
N۰۸۳۶۶	۴	۱	۴	۱	۱	۱						۱	۱
	۴	۱	۴	۱	۱	۱						۱	۱
	۴	۱	۴	۱	۱	۱						۱	۱
N۰۸۹۰۴	۴	۱		۱	۱	۱						۱	۱
N۰۸۸۰۰	۴	۱		۱	۱	۱	۴		۱	۳	۳		۱
N۰۸۸۲۵	۴	۱		۱	۱	۱	۴			۱	۱	۱	۱
N۱۰۰۰۱	۳[f]	۱			۴		۴			۱		۴	۱
N۱۰۰۰۲	۴[g]	۱	۳		۴	۱		۱	۲	۱		۴	۱
N۱۰۲۷۶	۲،۳،۴	۱			۱	۱	۴	۱	۲،۳	۱			۱
N۱۰۶۵۵	۱	۱			۴					۱	۱		۱

توضیحات: ۱ مقاوم. ۲ مقاوم مگراینکه کار سرد شده باشد یا سخت شده باشد. ۳ مقاوم مگراینکه حساس شده باشد. ۴ مقاوم بجز شرایط دما- غلظت‌های خاص - به متن مراجعه شود. ۵ مقاوم نیست. X برای این محیط توصیه نمی‌شود.

ادامه جدول ۱۸-۳

آلیاژ	Zn	Sn	S	Pb	Li	Hg	Bi	Al	Cd	آب دریا	O_2SCC	Azo Dyes	NH_3	NO_3^-
PH۱۵-۷Mo	۵									X		۱	۱	۱
۱۷-۴PH	۵									X			۱	۱
۱۷-۷PH	۵									X		۱	۱	۱
۲۰۲	۵							۵	۵	X		۱	۱	۱
Nitronic ۵۰	۵							۵	۵	X		۱	۱	۱
۲۱۶	۵							۵	۵	X		۱	۱	۱
۲۱۶L	۵							۵	۵	X		۱	۱	۱
Nitronic ۶۰	۵							۵	۵	X		۱	۱	۱
۳۰۴	۵							۵	۵	X	۳	۱	۱	۱
۳۰۴L	۵					۴		۵	۵	X	۳،۴	۱	۱	۱
۳۰۹S	۵					۴		۵	۵	X	۳	۱	۱	۱
۳۱۰S	۵					۴		۵	۵	X	۳	۱	۱	۱
۳۱۶	۵					۴		۵	۵	X	۳	۱	۱	۱
۳۱۶L	۵					۴		۵	۵	X	۳،۴	۱	۱	۱
۳۱۷	۵					۴		۵	۵	X	۳	۱	۱	۱
۳۱۷L	۵					۴		۵	۵	X	۳	۱	۱	۱
۳۲۱	۵					۴		۵	۵	X	۱	۱	۱	۱
۳۲۹	۵							۵	۵	X		۱	۱	۱
۳۴۷	۵					۴		۵	۵	X	۱	۱	۱	۱
۱۸-۱۸-۲	۵							۵	۵	X		۱	۱	۱
۴۳۱	۵									X		۱	۱	۱
۲۶-۱(XM-۲۷)	۵									X		۱	۱	۱
۲۶-۱S(XM-۳۳)	۵									X		۱	۱	۱
۲۹-۴	۵									۴		۱	۱	۱
Custom۴۵۰	۵									X		۱	۱	۱
Custom۴۵۵	۵									X		۱	۱	۱
Ni۲۰۰		۴	۵	۵	۵	۴	۵				۱		۱	۱
Ni۲۰۱		۴	۵	۵	۵	۴	۵				۱		۱	۱
Monel۴۰۰		۴	۵	۵	۵	۵	۵			۴	۱		۴	۴
K-۵۰۰		۵	۵		۵	۵	۵							
Alloy G	۱							۵	۵				۱	۱
Alloy C-۴	۱		۴					۵	۵			۱	۱	۱
Alloy۶۰۰	۴		۴	۴		۱		۵	۵	۴	۵[e]	۱	۱	۱
Alloy۶۰۱			۴					۵	۵		۱	۱	۱	۱
Alloy۶۲۵			۴					۵	۵		۵	۱	۱	۱
Alloy۶۹۰			۲					۵	۵		۵	۱	۱	۱
Alloy۷۱۸			۵								۵[c]	۱	۱	۱
Alloy۷۵۰		۵	۵							۴	۵[c]	۱	۱	۱
Alloy۲۰Cb-۳	۵					۴		۵	۵			۱	۱	۱
Js۷۰۰	۵					۴		۵	۵			۱	۱	۱
۲RN۶۵	۵					۴		۵	۵			۱	۱	۱
A-L۶X	۵					۴		۵	۵			۱	۱	۱
Js-۷۷۷	۵					۴		۵	۵			۱	۱	۱
۲RK۶۵						۵		۵	۵			۱	۱	۱
۹۰۴L	۵					۴		۵	۵			۱	۱	۱
Alloy۸۰۰	۴					۴		۵	۵		۱	۱	۱	۱
Alloy۸۲۵								۵	۵		۵	۱	۱	۱
Alloy B	۱		۵		۵			۵	۵		۵	۵	۱	۱
Alloy C	۱		۴					۵	۵	۴	۵	۱	۱	۱
Alloy C-۲۷۶	۱		۴					۵	۵		۵	۱	۱	۱
Alloy B-۲	۱		۵					۵	۵				۱	۱

(a) $CuCl_2$ ۱۰٪ در HCl، pH ۲/۵(b)، (c) پیرسخت شده به مدت ۱ ساعت در ۲۸۹°C(۵۵۲°F)، سرد شده درهوا بعلاوه ۸ ساعت در ۷۱۸°C(۱۳۲۵°F)، سرد شده درکوره تا ۶۲۱°C(۱۱۵۰°F)، سرد شده در هوا. (d) پیر سخت شده به مدت ۲ ساعت در ۱۱۴۹°C(۲۱۰۰°F)، سرد شده در هوا بعلاوه ۲۰ ساعت در ۷۰۴°C(۱۳۰۰°F)، سرد شده درهوا. (e) تنش نقطهٔ تسلیم آستانه. (f) کلرور روی (g) کلرورآلومینیم در HCl در ۴۵۰°C(۸۴۳°F)، (h) یک مورد مشکوک (i) در شرایط بی‌هوازی (j) ید در المانهای سوخت هسته‌ای (k) به صورت کانال متصل به فولاد کربنی در پیل گالوانیکی

۴۵-۳ طبقه بندی مکانیزمها

همان طور که اشاره گردید، پیچیدگی اندرکنش بین محیطهای مختلف، ماهیت آلیاژ، ساختار متالورژیکی، و غیره ، نشان می دهد که امکان وجود یک مکانیزم واحد برای خوردگی تنشی تمام سیستمهای فلز- محیط، وجود ندارد. استرایکر[1] (در یک مقاله‌ای که قرار است در ۱۹۸۵ به چاپ برسد) بعضی از مکانیزمهای scc را که در سیستمهای مختلف می توانند عمل نمایند بشرح زیر طبقه بندی کرده است

۱ـ مکانیزمهای متالورژیکی

الف – هم صفحه بودن نابجایی ها. مقاومت در برابر ترک خوردن مربوط می شود به طرز قرارگرفتن نابجایی ها. در فولادهای زنگ نزن که مستعد به این نوع ترک خوردن هستند نابجایی ها بصورت دسته های هم صفحه قرار می گیرند، در صورتی که در آلیاژهایی که مقاوم هستند نابجایی ها بصورت سلولی یا در هم پیچیده قرار می گیرند.

ب – پیر تنشی و جدایش میکرونی. در پیر تنشی فولادهای زنگ نزن آستینتی، سیلانهای پلاستیکی ناگهانی و تند اتفاق می افتد. این پدیده همراه است با جدایش میکرونی اتمهای حل شونده به نواقص دینامیکی در ساختار کریستالی. این نوع جدایش می تواند باعث رفتار ترک خوردن در اثر خوردگی تنشی بطریق میان دانه‌ای شود. سرعت ترک خوردن، به وسیلهٔ دیفوزیون اتمهای حل شونده و همچنین پولاریزاسیون الکتروشیمیایی محدود می‌شود.

ج – جذب شدن. عوامل فعال سطحی به سطح جذب می شوند و با باندهای تحت کرنش در نوک ترک اندرکنش نموده وباعث کاهش استحکام باند شده و سبب اشاعهٔ ترک می‌شوند.

۲ـ مکانیزمهای حل شدن

الف – تشدیدحل شدن در اثر تنش . ترک باانحلال آندی موضعی گسترش می یابد. نقش اصلی تغییر شکل پلاستیکی تشدید فرآیند حل شدن می‌باشد.

ب – تشکیل فیلم در دیوارهٔ ترکها، بر اساس مکانیزم هم صفحه‌ای بودن نابجایی ها، ترکها در محلی که پله های لغزشی به سطح می‌رسند شروع می‌شوند. رشد ترکها در

1- M. A. Streicher

نتیجهٔ انحلال فلزی است که در حال تسلیم است. با رشد ترک، پوستهٔ روی دیوارهٔ ترک مجدداً تشکیل می‌شود و بعنوان کاتد عمل می‌کند.

ج – غنی شدن نسبت به عنصر نجیب. ترکیب شیمیایی پله های لغزشی دارای غلظت کمتری از نیکل نسبت به سطح غنی شده است، در نتیجه پلهٔ لغزشی آنقدر حل می شود تا مقدار نیکل به مقدار غنی شدهٔ سطح قبلی برسد.

د– ترک خوردن در اثر خوردگی، توام باتنش، با شکستن و پاره شده مداوم فیلمهای غیر فعال پیشروی می کند. در محل پارگی، عمل انحلال صورت می گیرد تا مجدداً حالت غیر فعال بوجود آید.

هـ – مهاجرت ین کلرید. ین کلرید از طریق فیلم پاره شده به مناطقی که دارای بالاترین تنش هستند مهاجرت می کند. بنابراین نقش ین کلرید پاره کردن فیلم بوده و در نتیجه امکان انحلال فلز را فراهم می آورد.

۳ـ مکانیزمهای هیدروژن

الف – تشکیل هیدرید. هیدروژن وارد فولاد زنگ نزن ۳۰۴ می گردد و تشکیل مارتزیت می دهد، و به داخل رشته‌های[1] عمود بر جهت اعمال تنش نفوذکرده و سپس باعث ترک خوردن می شود.

ب – تردی هیدروژنی. هیدروژن در داخل فلز در نوک ترک تجمع می یابد، و باعث تضعیف موضعی باندها می شود. یاباتشکیل حفره ها یا باکاهش استحکام باندها. ترکها با شکست مکانیکی منطقهٔ ضعیف شده پیشروی می کنند.

۴ـ مکانیزمهای مکانیکی

الف – حفره های تونلی و پارگی. پیشروی ترک با تشکیل حفره های عمیق یا تونلهایی که در اثر انحلال بوجود می آیند و متعاقب آن به یکدیگر متصل می شوند و بصورت پارگی انجام می شود.

ب – تاثیر گوه ناشی از محصولات خوردگی. محصولات خوردگی در ترکهای موجود جمع می شوند در نتیجه با تاثیر شبیه گوه باعث باز شدن و پیشروی ترک می‌شوند.

1- Stringers

۴۶ - ۳ روشهای جلوگیری

همانطور که در بالا بدان اشاره رفت، مکانیزم scc بطور کامل درک نشده است. در نتیجه روشهای جلوگیری از این نوع خوردگی ماهیتاً یاکلی وعمومی هستند و یا تجربی. scc را می‌توان با کاربرد یک یا چند روش زیر تقلیل دادیا مرتفع نمود:

۱ـ کم کردن تنش تا زیر حد مجاز (در صورتیکه تنش حد مجاز وجود داشته باشد)، مثلاً با کم کردن بارروی فلز یا ضخیمتر کردن قطعه . تنش گیری فولادهای کربنی ساده در ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه فارنهایت ۵۹۳، و فولادهای زنگنزن آستینتی معمولاً در ۱۵۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه فارنهایت انجام می‌گیرد.

۲ـ حذف اجزاء و ناخالصیهای مضر محیط، مثلاً دگازه کردن ، دمینراله کردن یا تقطیر نمودن.

۳ـ اگر تغییر محیط وتقلیل تنش هیچ کدام عملی نباشند بایستی آلیاژ را عوض نمود. مثلاً موقعی که فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ تحت scc قرار می‌گیرد، روش معمول این است که از اینکونل (دارای مقدار نیکل بیشتر) استفاده می‌شود . اگرچه فولاد ساده کربنی در مقابل خوردگی عمومی مستعدتر است ، لکن در مقابل scc از فولادها زنگ‌نزن نیز مقاومتر می باشد. مثلاً مبدلهای حرارتی که در تماس با آب دریا یا آبهای نمکدار (شور) قرار دارند.معمولاً از فولاد کربنی معمولی ساخته می شوند.

۴ـ کاربرد حفاظت کاتدی، کاتدی تنها موقعی بایستی بکاربرده حفاظت شود که کاملاً اثبات شده باشد که انهدام در اثر scc بوده است. در صورتی که انهدام در اثر تردی هیدروژنی بوده باشد، جریان کاتدی اعمال شده در حفاظت کاتدی باعث بدتر شدن مسئله می‌شود.

۵ـ اضافه کردن ممانعت کننده‌ها به سیستم در صورت امکان . در محیطهای خورندهٔ متوسط، فسفاتها و ممانعت کننده‌های آلی و معدنی دیگر بطور موفقیت آمیزی scc را تقلیل داده‌اند. در تمام کاربردهائی که از ممانعت کننده استفاده می‌گردد، بایستی مقدار ممانعت کننده ، کافی باشد تا از احتمال خوردگی موضعی و حفره‌دار شدن جلوگیری شود.

۶ـ گاهی اوقات از پوششهااستفاده می‌شود ، نقش آنها آن است که مانع از تماس محیط با فلز می‌شوند. مثلاً پوشش دادن مخازن و لوله‌ها که بوسیله عایق نیز پوشیده می‌شوند. لکن ، بطورکلی این روش برای فلزات بدون پوشش ممکن است خطرناک باشد.

۷ـ ساچمه‌زنی (همچنین تحت عنوان شات بلاست کردن) باعث ایجاد تنشهای پس ماند فشاری در سطح فلز می‌گردد. ول‌فول و مال‌هال[۱] نشان دادند که در نتیجه ساچمه‌زنی با ساچمه های شیشه‌ای مقاومت به خوردگی تنش به میزان خیلی زیاد افزایش یافت. فولاد زنگ‌نزن نوع ۴۱۰ در معرض محلول ٪۳ نمک طعام در دمای محیط با نوع ۳۰۴ در معرض محلول ٪۴۲ کلرورمنیزیم در ۱۵۰ درجهٔ سانتیگراد ، وآلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ در محلول $K_2Cr_2O_7$-CrO_3-NaCl در دمای محیط. یک مقاله‌ای در این رابطه توسط دی‌لی[۲] نیز جالب توجه می‌باشد.

برای اینکه نتیجهٔ خوبی عاید شود تمام سطح فلزی که در معرض محیط قرار می‌گیرد در دستگاه تمام شده بایستی شات‌بلاست شود. لایهٔ سطحی که دارای تنش فشاری است خیلی نازک است ـ معمولاً چند هزارم اینچ . مثالی از یک کاربرد موفقیت آمیز شامل سانتریفوژ از جنس فولاد زنگ‌نزن نوع ۳۱۶ برای کار با کلریدهای آلی در دمای ۶۰ درجهٔ سانتیگراد بود که پس از یکسال کار scc گسترده‌ای نشان داد. موقعی که با سانتریفوژ ۳۱۶ شات‌بلاست شده جایگزین گردید، هیچ گونه ترکی تا ۴۲ ماه مشاهده نشد. ساچمه زنی سطحی که ترک خورده توصیه نمی‌شود.

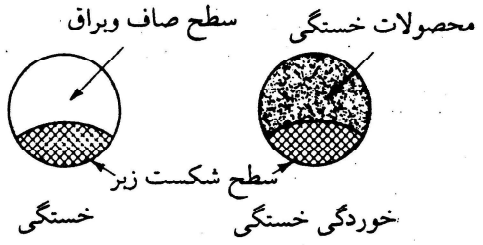
۴۷ـ۳ خوردگی توام با خستگی[۳]

شکست فلز در اثر تنشهای متناوب را خستگی می‌نامند. معمولاً شکستها خستگی در تنشهائی زیر نقطه تسلیم و بعداز تعداد زیادی نوسانات تنشی اتفاق می‌افتد. در شکل ۷۳ـ۳ بطور شماتیکی شکست خستگی یک میله استوانه‌ای نشان داده شده است . به طورکلی شکست ناشی از خستگی یک میله استوانه‌ای نشان داده شده است. به طورکلی شکست ناشی از خستگی مشتمل بر ناحیه بزرگی است که صاف بوده و ناحیه کوچکی که زبر وخشن بوده و دارای ظاهر کریستالی و شکری است . مطالعات نشان داده‌اند که در مرحله اشاعه ترکهای خستگی در فلز تنشهای متناوب باعث کوبیدن سطوح شکست روی هم دیگر و صاف کردن آنها می‌گردد. اشاعه ترک ادامه می‌یابد تا

1- M. Woelful and R. Mulhall, Glass Bead Impact Testing, *Metal Progress*,57-59 (Sept.1982).

2- J.J.Daley, Controlled Shot peening Prevents Scc,*Chem.Eng.* 113-116(Feb.1970).

3- Corrosion Fatigue,CF

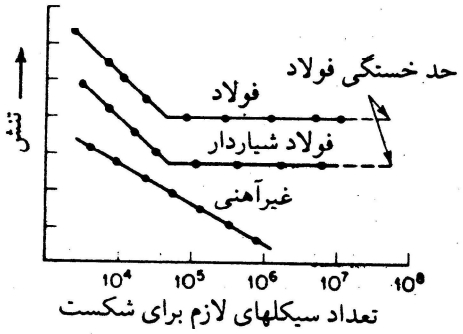


شکل ۷۳-۳ نمایش شماتیکی شکستهای ناشی از خستگی و خوردگی - خستگی

موقعی که سطح مقطع فلز آن قدر کم شود که تنش روی آن از تنش نهائی فلز بیشتر شده و شکست ترد در نمونه واقع می‌گردد. شکست ترد معمولاً ظاهر زبرتری دارد. ظاهر معمول شکستهای ناشی ازخستگی منجر به نامگذاری غلط آن به (نسبت دادن این نوع شکست به) "کریستالیزاسیون " شده است . واضح است که این نام غلط می‌باشد، زیرا تمام فلزات به صورت کریستالی هستندو سطح خشنی که روی سطح شکسته شده دیده میشود در نتیجه شکست ترد است نه در اثر کریستالیزاسیون.

در آزمایشات خستگی، فلز تحت تنشهای متناوب قرار می‌گیرد و زمان لازم برای شکست را در دامنه‌های مختلف اندازه می‌گیرند. نتایج این گونه آزمایشات در شکل نشان داده شده است. عمر خستگی فولاد وسایر آلیاژهای آهنی معمولاً از یک تنش معینی به پائین تر، مستقل از تنش می‌گردد. همان طور که در شکل ۷۴-۳ نشان داده شده است، این تنش را حد خستگی[1] می‌نامند. در حالت کلی اگر فلز تحت تنشی کمتر از حد خستگی قرار بگیرد، تعداد بینهایت سیکل تنش را بدون شکسته شدن تحمل خواهد کرد. همان طوری که در شکل ۷۴-۳ ملاحظه می‌گردد اگر قبل از آزمایش خستگی، در نمونه یک شیار بوجود آوریم، مقاومت خستگی تقلیل می‌یابد. مقاومت خستگی مستقیماً با شعاع راس شیار متناسب است. باکم شدن شعاع شیار، مقاومت خستگی نیز کم می‌شود. فلزات غیر آهنی مثل آلومینیم و منیزیم دارای حد خستگی نیستند. باتقلیل تنش خستگی، مقاومت خستگی یا عمر آنها افزایش می‌یابد لکن

1- Fatigue limit



شکل ۷۴-۳ نمایش شماتیکی رفتار فلزات آهنی و غیر آهنی از نظر خستگی

هیچگاه عمر آنها مستقل از تنش نمی‌گردد.

خوردگی ـ خستگی، تقلیل مقاومت خستگی در اثر وجود محیط خورند می‌باشد. بنابراین خوردگی ـ خستگی بر طبق ظاهر شکست تعیین نمی‌گردد بلکه برحسب خواص مکانیکی تعریف می‌گردد. شکل ۷۳-۳ نمونه کلی شکست ناشی از خوردگی ـ خستگی رانشان می‌دهد. معمولاً سطح بزرگی از مقطع شکست به وسیله محصولات خوردگی پوشیده و قسمت کوچکی که در اثر شکست ترد بوجود آمده، خشن و زبر می‌باشد. توجه کنید که وجود محصولات خوردگی در محل شکست لزوماً بر خوردگی ـ خستگی دلالت نمی‌کند. در مرحله خستگی معمولی ممکن است اکسید اسیون سطحی انجام پذیرد و وجود زنگ یا محصولات دیگر خوردگی دلالت بر کم شدن عمر خستگی فلز نیست. تاثیر خوردگی بر عمر خستگی را تنها با آزمایشات خوردگی ـ خستگی می‌توان تعیین نمود.

خوردگی ـ خستگی احتمالاً حالت خاصی از scc است. لکن نحوهٔ شکست و روشهای جلوگیری از آن متفاوت بوده و بهتر است جداگانه بررسی گردد. بعلت انهدامهای فاجعه آمیز در اثر خوردگی ـ خستگی در صنایع فضائی، هسته‌ای، اسکلتهای

دریائی (سکوهای شناور، زیر دریائی ها)، توجه مجددی به این مسئله شده، آزمایشات وسیع و مطالعات تئوریک عمیقی انجام گرفته است.

اگر چه مکانیزم و یا مکانیزمهای این نوع خوردگی هنوز روشن نشده ولی معلوم شده است که شروع ترکها و رشد آنها در برابر متغیرهای محیطی، عکس العملهای مختلفی نشان می دهد.

فاکتورهای محیطی: فاکتورهای محیطی به شدت بر مقاومت، در برابر خوردگی - خستگی فلز تاثیر می‌گذارد. در خستگی معمولی، فرکانس سیکل تنش تاثیر کمی بر مقاومت خستگی می‌گذارد. این فاکتور باعث سهولت در آزمایشات خستگی می‌گردد. زیرا آزمایش را می‌توان در فرکانس بالا و زمانهای کوتاهتر انجام داد. لکن مقاومت خوردگی - خستگی بستگی شدیدی به فرکانس سیکل تنش دارد. در فرکانسهای تنشی پائین، خوردگی - خستگی شدیدتر است، علت آن واضح است زیرا در فرکانسهای پائین تر، زمان تماس بین فلز و محیط خورنده بیشتر است، لذا در تعیین مقاومت خوردگی - خستگی، انجام آزمایش در شرایطی مشابه به آنچه در عمل وجود دارد است، اهمیت دارد.

محیط خورند نیز بر خوردگی - خستگی اثر می‌گذارد. مقدار اکسیژن، درجه حرارت، pH، و ترکیب شیمیائی محلول بر خوردگی - خستگی تاثیر می‌گذارند. مثلاً آهن، فولاد، فولادهای زنگ نزن، برنزهای آلومینیم دارای مقاومت خوبی در آب می‌باشند. در آب دریا آلومینیم و فولادها تنها ۷۰ تا ۸۰ درصد از مقاومت خستگی معمولی خود را دارند. آلیاژهای با کرم بالا در آب دریا، تنها حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد مقاومت خستگی معمولی خود را دارند. بدیهی است که خستگی - خوردگی همواره بایستی بر حسب فلز و محیط آن بیان گردد.

Crooker و Bogar[1] آلیاژهای فولاد، آلومینیم، و کرم را در آب دریا (طبیعی) آب دریا (براساس استاندارد ASTM)، و محلول ۳٪ کلرید سدیم آزمایش کردند که ترکیب شیمیایی محلول به ندرت تاثیر مهم یا تاثیر قابل پیش بینی برنتایج آزمایشات

1- F.D.Bogar and T. W. Crooker, Fatige Testing in Natural and Marine Corrosion Enviironments Substitute Ocean Waters, *Materials Performance*, 37(Aug.1983)

خوردگی خستگی در دریا می گذارد. دیویس،واسیلاروس، وگوداس[۱] کامپوزیتهای با زمینهٔ فلزی را مورد آزمایش قرار دادند.

مکانیزم: مکانیزم خوردگی ـ خستگی کاملاً روشن نیست، لکن علت این نوع خوردگی بطور کیفی مشخص شده است. آزمایشات خوردگی ـ خستگی آهن و آلیاژهای آهنی نشان می‌دهند که رفتار این آلیاژها شبیه رفتار فلزات غیر آهنی در آزمایشات خستگی معمولی است. همچنین بنظر می‌رسد که خوردگی ـ خستگی در محیطهائی که باعث حفره دار شدن می‌شوند، رایج تر است. این دو واقعیت دلالت بر این دارند که علت کم شدن مقاومت خستگی در حضور محیط خورنده این است که حفره ها به عنوان منابعی برای تمرکز تنش عمل نموده و باعث ایجاد ترکهائی در فلز می‌گردند. به احتمال زیاد در راس ترک، خوردگی شدیدتر است، و در نتیجه شعاع ترک ناپایدار بوده و چون در اثر تنشهای مکانیکی توام با انحلال الکتروشیمیائی، شعاع راس ترک، دائم کمتر می‌شود (ترک تیز تر می‌گردد)، منحنی خستگی فلزات آهنی که در معرض محیط خورنده قرار دارند نیز شبیه منحنی فلزات غیر آهنی است. شکست های ناشی از خوردگی ـ خستگی معمولاً میان دانه‌ای[۲] بوده و فاقد شاخه شاخه شدن که از ویژگیهای اکثر شکستهای ناشی از scc است می‌باشند. مراحل نهائی خوردگی ـ خستگی شبیه مراحل نهائی خستگی معمولی است. شکست نهائی صددرصد مکانیکی بوده و به محلول خورنده نیازی ندارد.

وای، شیم، تاناکا[۳] بر اندرکنش پیچیدهٔ بار، محیط، و متغیرهای متالورژیکی تاکید می کنند. برای اینکه نتایج آزمایشات در مورد طراحی بکار رود، یک مدل بایستی بطور کمی رشد ترک را برحسب فرآیندهای مختلف، شامل انتقال عوامل مخرب به نوک ترک، واکنشهای شیمیایی موضعی در نوک ترک، ورود و دیفوزیون هیدروژن، و اثرات تردکنندهٔ آن مشخص کند. R.P.Gandgloff[۴] ترکهای کوچک را مورد بحث قرار

1- D.A.Davis, M. G. Vassilaros, and J.P Gudas, Corrosion Fatigue of Metal Matrix Composites in sea Water, *Materials Performance*, 38-42 (Mar.1982).

2- Transgranular

3- R. P. Wei, G. Shim and k. Tanaka," Corrosion Fatigue and Modeling,"TMS-AIME Fall Meeting, 1983.

4- R. P. Gandgloff,"Localized Chemistry Effects on the Growth Kinetics of Small Cracks," TMS-AIME Fall meeting,1983.

می‌دهد و همچنین مدلی ارائه می دهد که فاکتورهای مختلف واندر کنش آنها رابر خوردگی خستگی و scc نشان می دهد.

روشهای جلوگیری: خوردگی ـ خستگی را می‌توان به روشهای مختلف مانع شد. افزایش استحکام کشش فلز یا آلیاژ، عمر خستگی معمولی را بهبود می‌بخشد لکن برای خوردگی ـخستگی مضر است . در مورد مقاومت خستگی معمولی، آلیاژهائی که دارای استحکام کششی بالائی هستند، در مقابل جوانه زدن و شروع ترکها مقاومت بیشتری می‌کنند. بایستی توجه نمود که در یک فلز با استحکام بالا، به مجرد اینکه ترک شروع شد، سرعت رشد سریع‌تر از سرعت رشد در ترکهای فلزی است که دارای استحکام کمتری می‌باشند. در خوردگی ـ خستگی ،ترک به سهولت در اثر خوردگی ایجاد می‌گردد، بنابراین از نقطه نظر مقاومت خوردگی ـ خستگی ، فلزی که دارای استحکام بیشتری است نا مناسب تر است. با کم کردن تنش روی فلز می‌توان خوردگی ـ خستگی را کم کرد یا کاملاً حذف نمود همچنین با تغییر طراحی جسم ، عملیات حرارتی تنش‌گیری یا با ساچمه زنی[1] به منظور ایجاد تنشهای فشاری روی سطح می‌توان تنش روی جسم را کم کرد. ممانعت کننده‌های خوردگی در کم کردن یا حذف اثرات این نوع خوردگی موثرند. همچنین با استفاده از پوششهائی مثل روی، کادمیم، نیکل، مس و نیتراته کردن مقاومت خوردگی خستگی افزایش می‌یابد. موقعی که اعمال پوششها، توسط الکترولیز انجام می‌شود بایستی از روشهائی استفاده شود که تنشهای کششی در پوشش بوجود نیاورند و همچنین هیدروژن وارد فلز نگردد.

عدهٔ زیادی از مهندسین، خستگی و خوردگی خستگی رابه همراه قطعات در حال چرخش، در نظر می‌گیرند، ولی انواع دیگر تجهیزات (که معمولاً استاتیکی در نظر گرفته می‌شوند) نیز می‌توانند با همین مکانیزمها منهدم شوند. مثلاً، من چندین مورد انهدامهای پر هزینهٔ لوله‌های مبدلهای حرارتی را بررسی کرده‌ام که ناشی از ارتعاشات دوره است. در طراحی تجهیزات بایستی اجتناب از ارتعاشات مدنظر قرار گیرد.

مراجع پیشنهادی:

Devereaux, O., A. J. McEvily, and R. W. Staehle, eds., *Corrosion Fatigue: Chemistry Mechanics and Microstructure*, National Association of Corrosion Engineers, Houston, Tex., 1972.

Corrosion Fatigue: Mechanics, Metallurgy, Electrochemistry, and Engineering, ASTM STP 801, Information Center, Battelle Laboratories, Columbus, Ohio, 1981.

Corrosion Fatigue: Mechanics, Metallurgy, Electrochemistry, and Engineering, ASTM STP 801, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, May 1983.

1- Shot - Peening

خسارت هیدروژنی[۱]

۴۸-۳ ویژگیها: خسارات هیدروژنی یک اصطلاح کلی است که دلالت بر خسارت مکانیکی وارد شده به فلز در اثر وجود یا واکنش با هیدروژن دارد. خسارت هیدروژنی را می‌توان به چهار گروه مشخص تقسیم بندی نمود.

۱- تاول زدن هیدروژنی[۲]

۲- تردی هیدروژنی[۳]

۳- دکربوره کردن[۴]

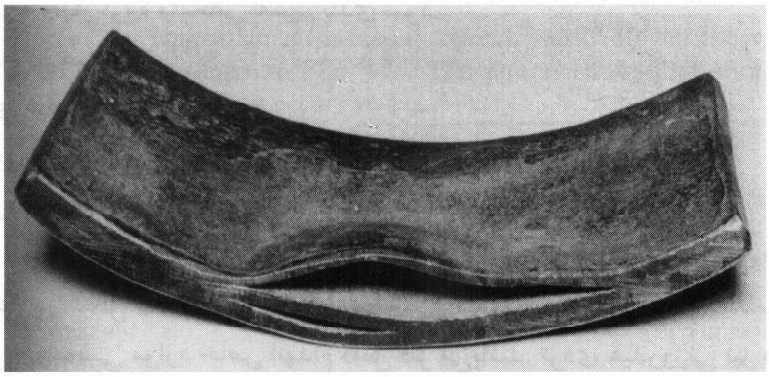
۴- خوردگی هیدروژنی[۵]

تاول زدن در اثر هیدروژن ناشی ازنفوذ هیدروژن به داخل فلز می‌باشد. مثالی از تاول زدن در شکل ۷۵-۳ نشان داده شده است. معمولاً نتیجه این واقعه تغییرفرم موضعی در بعضی موارد خاص انهدام کامل فلز می‌باشد. تردی هیدروژنی نیز در اثر نفوذ هیدروژن به داخل فلز است، لکن نتیجه این واقعه از دست دادن انعطاف پذیری فلز واستحکام آن می‌باشد.

دکربوره کردن یا از بین رفتن کربن فولاد، غالباً در اثر تماس هیدروژن مرطوب با فلز در درجه حرارت بالا می‌باشد. در اثر دکر بوره شدن استحکام کششی فولاد کم می‌شود. خوردگی هیدروژنی ، منظور واکنش بین هیدروژن و یکی از عناصر آلیاژی یا اجزاء تشکیل دهنده فلز در درجه حرارتهای بالا می‌باشد. مثال کلی درباره خوردگی هیدروژنی، تجزیه شدن و پوسیدن مس اکسیژن‌دار در حضور هیدروژن می‌باشد. دکربوره شدن و خوردگی هیدروژنی در درجه حرارتهای بالا اتفاق می‌افتند ودر فصل ۱۱ مفصلاً مورد بحث قرار خواهند گرفت .

تاول زدن در اثر هیدروژن و تردی هیدروژنی در صنایع نفت و صنایع مواد شیمیائی ، اسید شوئی و جوشکاری واقع می‌گردد و یا در نتیجه خوردگی بوجود می‌آید. چون هر دو حالت فوق باعث خسارات مکانیکی می‌شوند، در صورت عدم جلوگیری و پیشگیریهای لازم، انهدامها و شکستهای زودرس اتفاق می‌افتد.

1- Hydrogen Damage
2- Hydrogen Blistering
3- Hydrogen Embrittlement
4- Decarburization
5- Hydrogen Attack



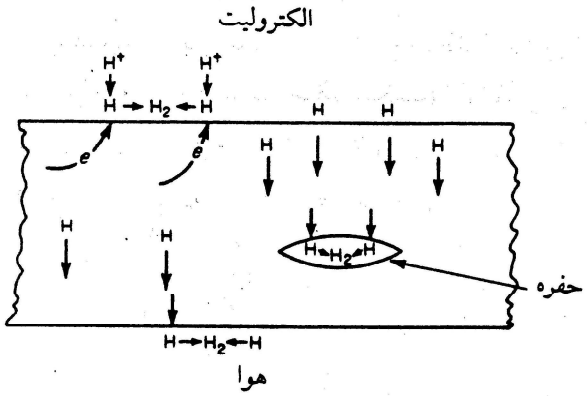
شکل ۷۵ـ۳ مقطع یک ورقه فولاد کربنی از یک پالایشگاه که پس از ۲ سال استفاده اتفاق افتاده .

۲۹-۳ فاکتورهای محیطی

هیدروژن اتمی تنها عنصری است که می‌تواند از فولاد و فلزات دیگر عبور نماید. هیدروژن مولکولی (H_2) قادر به عبور از فلزات نیست. به این ترتیب خسارات هیدروژنی تنها در اثر هیدروژن اتمی می‌باشد. منابع مختلف و متعددی وجود دارند که هیدروژن اتمی و نوزاد تولید می‌نمایند که به عنوان مثال می‌توان به اتمسفرهای مرطوب در درجه حرارتهای بالا، واکنشهای خوردگی و الکترولیز اشاره نمود.در اثر احیاء یونهای هیدرژون در واکنشهای خوردگی ، ابتدا هیدوژنهای اتمی بوجود می‌آید و بعد مولکول هیدروژن تولید می‌شود. بنابراین خوردگی و حفاظت کاتدی ، آبکاری الکتریکی و پروسسهای دیگر منابع اصلی تولید هیدوژنی هستند که در فلزات وجود دارد. بعضی مواد مثل یونهای سولفیدی ، ترکیبات فسفروارسینک سرعت احیاء یون هیدروژن راکم می‌کنند. اکثر این ترکیبات با تقلیل سرعت تشکیل مولکولهای هیدروژن، سرعت خوردگی راکم می‌کنند.در حضور این گونه مواد ، غلظت هیدروژن اتمی روی سطح فلز بیشتر می‌شود.

۳-۵۰ تاول زدن در اثر هیدروژن

در شکل ۷۶-۳ مکانیزم تاول زدن در اثر هیدروژن بطورشماتیکی نشان داده شده است . در این شکل مقطع دیواره یک تانک دیده می‌شود. در داخل تانک یک الکترولیت اسیدی وجود دارد و بیرون آن در معرض اتمسفر قرار دارد. آزاد شدن هیدروژن روی



شکل ۷۶-۳ نمایش شماتیکی مکانیزم تاول زدن در اثر هیدروژن

سطح داخلی در اثر واکنش خوردگی یا حفاظت کاتدی واقع می‌گردد. در هرلحظه غلظت ثابتی از اتمهای هیدروژن روی سطح فلز وجود دارد و مقداری از این اتمها به جای تشکیل مولکول، به داخل فلز نفوذ[1] می‌کنند. قسمت عمده هیدروژن از فولاد عبور نموده و در سطوح خارجی تانک تشکیل مولکول هیدروژن می‌دهند. اگر هیدروژن هنگام عبور از داخل فولاد به یک حفره برسد (نقص متد اول در فولادهای قابی[2] در این حفره ها مولکول هیدروژن تشکیل می‌شود. چون هیدروژن مولکولی نمی‌تواند از داخل فلز عبور کند. بنابراین غلظت هیدروژن و فشار آن در داخل حفره افزایش می‌یابد. فشار تعادلی هیدروژن مولکولی در تماس با هیدروژن اتمی چند صد هزار اتمسفر است که برای انهدام فلزات مهندسی موجود کافی می‌باشد.

تاول زدن هیدروژنی بیشتر در صنعت نفت متداول است. این پدیده در تانکهای ذخیره کننده و پروسسهای تصفیه مشاهده می گردد. یک روش برای کنترل آن افزودن ممانعت کننده به سیستم، مثل یون پلی سولفید، می‌باشد.

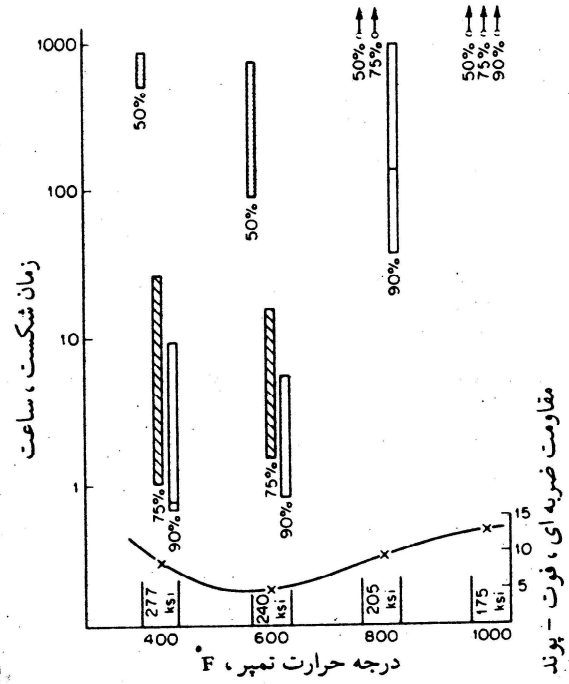
1- Diffusion

2- Rimmed steel

۵۱-۳ تردی هیدروژنی

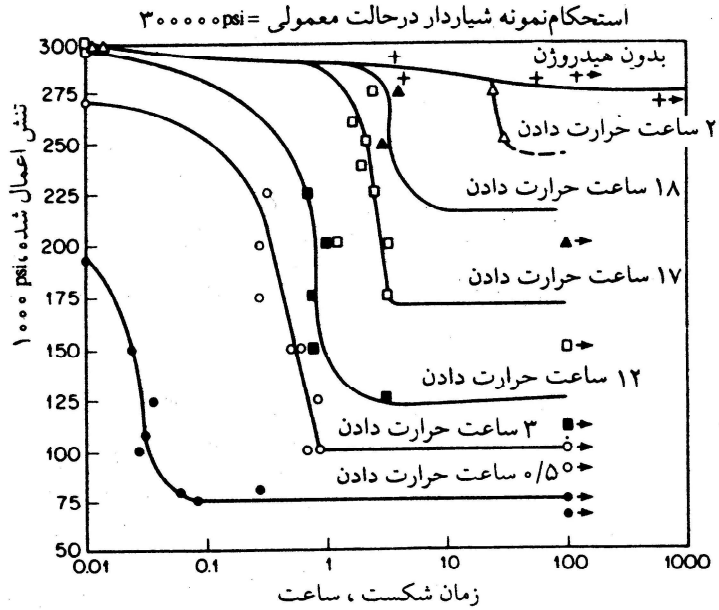
بر خلاف تاول زدن در اثر هیدروژن، مکانیزم صحیح و دقیق، تردی هیدروژنی معلوم نیست. علت اصلی در هر دو مورد یکسان بوده و به واسطه نفوذ هیدروژن اتمی به داخل ساختمان فلزی می باشد در مورد تیتانیم و فلزاتی که تمایل زیادی به تشکیل هیدرید دارند، هیدروژن حل شده تشکیل ترکیبات ترد هیدرید می‌دهد. در فلزات دیگر، مثل آهن و فولاد، واکنش بین هیدروژن حل شده و فلز کاملاً روشن نشده است.

شواهد نشان می‌دهند که قسمت اعظم شکستهای ناشی از تاثیر محیط در فولادهای فریتی و مارتنزیتی و آلیاژهای تیتانیم، ناشی از واکنش ترک در حال پیشروی با هیدروژن می‌باشد. ویژگی عمومی این شکستها در شکل ۷۷-۳ نشان داده شده است.



شکل ۷۷-۳ زمان شکست بر حسب درجه حرارت تمپر، برای فولاد ۴۳۴۰ تحت تنش بمقدار ۵۰، ۷۵، ۹۰، درصد تنش تعلیم. نمونه ها در معرض محلول ۳/۵ درصد کلرور سدیم قرار داشته و متناوباً تر و خشک شده‌اند.

در ایـــن شکـــل[۱] زمـــان شکست فـــولاد ۴۳۴۰،(۰/۴٪ C، ۰/۷٪ Mn، ۰/۰۴٪ P، ۰/۰۴٪S ۰/۳٪ Si، ۱/۸٪ Ni، ۰/۸٪ Cr، ۰/۲۵٪ Mo) بـا اسـتحکامهای مـختلف و تنشهای اعمال شده متفاوت نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود فـولاد ۴۳۴۰ در استحکامهای بالاتر برای ترک خوردن و شکستن مستعدتر است، و همچنین در یک استحکام خاص هر چه تنش بیشتر باشد، زمـان شکست کـمتر مـی‌گردد. در حقیقت این نحوه رفتار در مورد اکثر آلیاژهائی که در معرض تـردی هـیدروژنی واقـع شده‌اند، اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر در بیشترین سطح استحکام آلیاژ ها حساسیت زیادتری نسبت به ترک دار شدن از خود نشـان مـی‌دهند هـمچنین بـا افـزایش غـلظت هیدروژن تمایل به تردی بیشتر می‌شود، این مطلب در شکل ۷۸-۳[۲] نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که بعد از زمان معین با حرارت دادن یا پختن[۳] و در نتیجه کمتر



شکل ۷۸-۳ منحنی های خستگی استاتیکی در غلظتهای مختلف هـیدروژن کـه بـا پـختن فولاد ۴۳۴۰ در ۳۰۰ درجه فارنهایت در زمانهای مختلف حاصل شده است.

1- R.A.Davis, G.H.Dreyer, and W.C.Gallaugher, *Corrosion*, 20:93t (1964)

2- H.H.Johnson,E.J.Schneider, and A.R.Troiano, *Trans. AIME*,212:526-536 (1958)

3- Baking

شدن مقدار هیدروژن زمان شکست نمونه هائی که قبلاً به طریق شارژ کاتدی مقدار معینی هیدروژن وارد آنها شده است، افزایش می یابد.

اکثر مکانیزمهایی که برای تردی هیدروژنی پیشنهاد شده‌اند بر اساس مداخلهٔ هیدروژن در لغزش نابجایی ها قرار دارد. مداخلهٔ هیدروژن می تواند در اثر تجمع هیدروژن، نزدیک نابجایی ها یا حفره های میکرونی صورت گیرد، لکن مکانیزم دقیق هنوز معلوم نشده است.

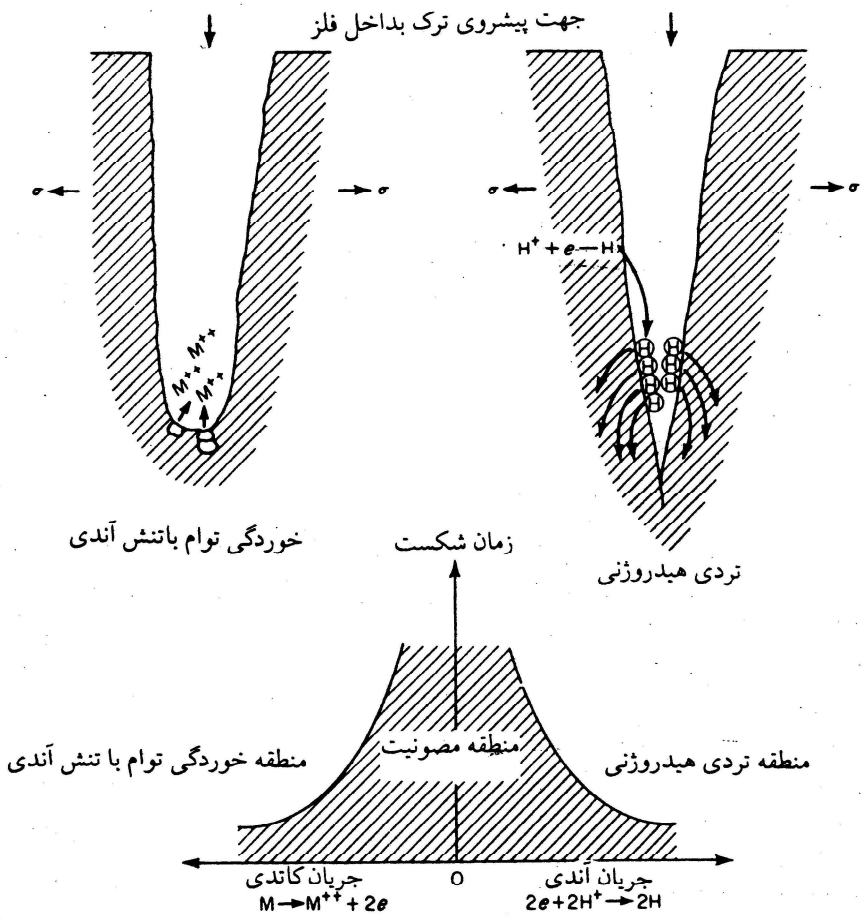
تردی هیدروژنی و ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش (scc) را از نحوه عکس العمل آنها در برابر جریان الکتریکی از هم تشخیص می‌دهند. مواردی که جریان بکار برده شده نمونه را آندی تر میکند و ترک خوردن تسریع می‌گردد، scc می‌باشد، زیرا واکنش انحلال آندی به پیشروی ترک کمک می‌کند. از طرف دیگر، مواقعی که ترک خوردن با اعمال جریان در جهت عکس حالت فوق (کاتدی) تسریع میگردد یعنی مواقعی که واکنش آزاد شدن هیدروژن روی نمونه بیشتر می‌گردد، تردی هیدروژنی می باشد. در شکل ۷۹-۳، این دوپدیده از نظر عکس العمل در برابر اعمال جریان با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

اگر چه تردی هیدروژنی توصیف کم و بیش جامع می باشد، ولی اصطلاحات دیگری نیز بکار می روند. اگر جذب در اثر تماس با گاز هیدروژن است، غالباً ترک خوردن تنشی هیدروژنی[1] نامیده می‌شود. اگر جذب هیدروژن در اثر واکنش خوردگی باشد scc یا گاهی اوقات ترک خوردن تنشی هیدروژنی نامیده می‌شود. اگر خوردگی در اثر حضور سولفید هیدروژن باشد، ترک خوردن تنشی سولفیدی نامیده می شود. جذب فقط چند ppm هیدروژن می تواند باعث ترک خوردن شود.

موقعی که هیدروژن قبلاً وجود دارد (قبل از استفاده) مثل قطعات الکتروپلیت شده، حرارت دادن باعث خارج شدن هیدروژن می شود (شکل ۷۸-۳). این روش همچنین موقع خواباندن تجهیزات هیدروژنه کردن که شامل اجزاء فولادی با استحکام بالا هستند بکار می رود.

تمایل به ترک خوردن در اثر هیدروژن با افزایش دما کاهش می یابد، و در بالاتر از حدود ۱۵۰ درجه فارنهایت (۷۰ درجهٔ سانتیگراد) تغییر قابل ملاحظه‌ای اتفاق می افتد. بجز در واکنشهای خوردگی مشتمل بر اسید فلوریدریک یا سولفید هیدروژن، ترک

1- Hydrogen Stress Cracking



شکل ۷۹-۳ این دو پدیده ازنظر عکس العمل در برابر اعمال جریان با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

خوردن تنشی هیدروژنی معمولاً در فولادهایی که نقطهٔ تسلیم آنها کمتر از ۱۵۰ psi (۱۰۰۰Mpa) می باشد مسئله‌ای نیست. در مورد این اسیدها حد نقطهٔ تسلیم به حدود ۸۰psi (۵۵۰Mpa) تقلیل می یابد[1].

1- R.S.Treseder, Guarding Against Hydrogen Embrittlement, *Chem. Eng.*, 105-108 (June 29,1981)

استیونز و برنشتاین[۱] اظهار می‌کنند که نتایج رشد ترک نشان می دهند که پلاستسیتهٔ نوک ترک و شاخه شاخه شدن آن در رشد ترک ناشی از هیدروژن در فولادهای HSLA موثر است. پاسکو و همکارانش[۲] مدلی برای جذب و همچنین معادلاتی برای محاسبهٔ نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌دهند.

آن و سو[۳] مطالعات کینتیکی تردی تیتانیم نوع ۱۲ را گزارش می‌کنند. هانا[۴] تردی هیدروژن مس را بررسی کرده است و تشکیل حبابهای بخار در مس در دماهای بالا و اثرات آنرا نشان می دهد.

برای مطالعهٔ عمیق متغیرهای متالورژیکی رجوع شود به مقالهٔ نقش متغیرهای متالورژیکی در شکست ناشی از هیدروژن

M.G.Fontana and R.W.Staehle,eds,*Advances in Corrosion Science and Technology*,vol.7,pp.53-175,Plenum Press,NewYork,1980

در این مقاله اکثر سیستمهای آلیاژی مهندسی و ترک خوردن های آندی مورد بحث قرار گرفته‌اند. تقریباً تمام متغیرها مورد بحث قرار گرفته‌اند و همچنین یک لیست رفرنس عالی ارائه شده است.

در مقالهٔ ترسدر، همچنین ترک خوردن تنشی سولفیدی که در حضور آب وسولفید هیدروژن واقع می شود مورد بحث قرار گرفته است. این مسئله در صنعت نفت از تولید تا تصفیه از اهمیت بالایی برخوردار است. ظاهراً سولفید آهن که روی سطح فلز تشکیل می شود، دارای تاثیر کاتالیزوری است و باعث افزایش مقدار هیدروژنی که وارد فلز می شود می گردد و از این بابت با سایر محصولات خوردگی متفاوت است. در اینجا مجدداً سطح بحرانی استحکام فولاد ۸۰psi (۵۵۰Mpa) است. یک فشار جزئی سولفید هیدروژن بیشتر از ۰/۰۵Psi (مطلق) می تواند باعث ترک خوردن شود.

1- M.F.Stevens and I.M.Bernstein, "MicrosTructrral Effects on Hydrogen Embrittlement of a Ti-ConTaining HSLA Steel."

2- R.W.Rasco etal ."An Absorption Model for stage II crack

3- T.M.Ahn and P.Soo,"The Kinetics of Hydrogen Embrittlement in ASTM Grade -12 Titanium Alloy."

4- M.D.Hanna, Hydrogen Embrittlement of copper:Formation and Growth of InTergranular H2O Bubbles

توجه : این چهار مقاله در کنفرانس پائیز TMS در ۱۹۸۳ ارائه شده‌اند.

در قسمت ۲۴-۴ روش آزمایش NACE به شمارهٔ ۷۷-۰۱-TM برای محیطهای ترش به منظور تعیین آلیاژهای قابل قبول آمده است وبعضی نتایج در آنجا ارائه شده است. برای اکثر فولادهای کربنی و کم آلیاژی، ماکزیمم منحنی ۲۲ راکول سی توصیه شده است. در جاهائیکه استحکامهای بالاتری مورد نیاز است، بعضی آلیاژهای مجاز تا منحنی ۳۳ راکول سی آمده است. انتخاب مواد مناسب روش اصلی برای کنترل ترک خوردن تنشی سولفیدی است.

ترن، ویلد و ترویانوز[1] مسئله ترک خوردن لوله های فولادی را بحث می‌کنند و اطلاعات دیگری ارائه را می‌دهند. ترسدر همچنین نظارت بر مسئله را بشرح زیر تشریح می‌کند: نظارت در حین کار بر شرایط فرآیند که می تواند منجر به اثرات تردی هیدروژنی گردد با استفاده از پروبهای هیدروژنی انجام می شود. اینها بر دو نوع هستند: یکنوع شامل یک لولهٔ نازک فولادی است که انتهای آن بسته است و در مسیر فرآیند قرار می‌گیرد، نوع دیگر بصورت یک محفظه‌ای است که در بیرون لوله یا مخزن قرار می‌گیرد. در هر حالت سرعت نفوذ هیدروژن از فولاد اندازه‌گیری می‌شود. این اطلاعات را می‌توان به شرایط سیستم مورد نظر ربط داد و برای نظارت بر اقدامات پیش گیری کننده مثل کاربرد ممانعت کننده‌ها بکار برد.

۵۲-۳ جلوگیری

تاول زدن در اثر هیدروژن را می‌توان با کاربرد یک یا چند روش ذیل جلوگیری نمود.

۱ـ استفاده از فولاد تمیز. فولادهای قابی[2] حاوی حفره های زیادی هستند و لذا جایگزین نمودن اینها با فولادهای کشته[3] مقاومت در برابر تاول زدن را به شدت افزایش می‌دهد، زیرا در این نوع فولادها، حفره های داخلی وجود ندارد.

۲ـ استفاده از پوششها. برای جلوگیری از تاول زدن در اثر هیدروژن، در مخازن فولادی هیدروژن غالباً ازپوشش ها و روکش های فلزی، معدنی، آلی استفاده می‌شود. برای اینکه این عمل موفقیت آمیز باشد، لازم است که پوشش یا روکش نسبت به

1- J.C.Turn,B.E.Wilde,and C.A.Troianos, On the Sulfide Cracking of Line Pipe Steels ,*Corrosion*, 364-370 (Sept.1983).

2- Rimmed

3- Killed

هیدروژن غیر قابل نفوذ باشد، همچنین در مقابل محیط داخل تانک نیز مقاوم باشد. فولادهای روکش[1] شده با فولاد زنگ نزن آستینتی یا نیکل غالباً بهمین منظور استفاده می شوند. همچنین لاستیکی و پلاستیکی و لایه های آجری نیز مورد استفاده قرارمی‌گیرند.

۳ـ استفاده از ممانعت کننده‌ها[2]. ممانعت کننده ها می‌توانند از تاول زدن در اثر هیدروژن جلوگیری نمایند، زیرا این گونه مواد سرعت خوردگی و سرعت احیأ یون هیدروژن را کم می‌کنند. لکن ممانعت کننده ها عمدتاً در سیستمهای بسته مصرف می‌گردند و در سیستمهای باز کاربرد محدودی دارند.

۴ـ از بین بردن سموم ، تاول زدن در اثر هیدروژن معمولاً در محیطهای خورنده‌ای که حاوی سمومی[3] برای واکنش آزاد شدن هیدروژن مثل سولفیدها، ترکیبات آرسنیک، سیانیدها و یونهای حاوی فسفر هستند اتفاق می افتد و بندرت در محیطهای اسیدی خالص واقع می‌گردند. بسیاری از این سموم در فرآیندهای پالایشگاهها وجود دارند و بدین دلیل تاول زدن در اثر هیدروژن یکی از مسائل اصلی صنعت نفت می‌باشد.

۵ـ جایگزین کردن آلیاژ. سرعت نفوذ هیدروژن در فولادهای نیکل دار و آلیاژهای با پایه نیکل کمتر بوده و لذا غالباً از این آلیاژها برای جلوگیری از تاول زدن استفاده می‌کنند.

اگر چه تردی هیدروژنی نیز ناشی از نفوذ هیدروژن بداخل فلز یا آلیاژ می‌باشد و از این نظر به تاول زدن در اثر هیدروژن شباهت دارد، ولی روشهای جلوگیری از این نوع خسارت متفاوت است. مثلاً استفاده از فولاد تمیز اثر نسبتاً کمی برتردی هیدروژنی دارد، زیرا در مکانیزم آن احتیاجی به وجود حفره ها نیست. تردی هیدروژنی را می‌توان باکاربرد یکی از چند روش زیر حذف نمود.

۱ـ کم کردن سرعت خوردگی، غالباً تردی هیدروژنی در مرحله عملیات اسید شوئی که خوردگی باعث آزاد شدن مقدار زیادی هیدروژن می‌گردد اتفاق می افتد. با افزودن ممانعت کننده (که بایستی با دقت کافی انتخاب گردد)، خوردگی فلز را می‌توان به مقدار قابل ملاحظه‌ای در مرحله اسید شوئی کم کرد و در نتیجه جذب هیدروژن به وسیله فلز نیز کم می‌شود.

1- Clad
2- Inhibitors
3- Poisons

۲ـ تغییر شرایط آبکاری. جذب هیدروژن[1] در مرحله آبکاری را می‌توان با انتخاب صحیح حمام یا وان و کنترل دقیق جریان آبکاری کنترل نمود. اگر آبکاری الکتریکی در شرایطی انجام گیرد که در کاتد هیدروژن آزاد گردد، کیفیت رسوبات بد خواهد بود و تردی هیدروژنی نیز واقع می‌گردد.

۳ـ پختن یا حرارت دادن[2]. تردی هیدروژنی مخصوصاً در فولادها، یک پدیده تقریباً رورسیبل است، یعنی اگر هیدروژن را از فلز خارج کنیم خواص مکانیکی فلز تفاوت کمی با فولاد عاری از هیدروژن دارد روش معمولی کم کردن هیدروژن در فولاد، حرارت دادن آن در درجه حرارتهای نسبتاً پائین (۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه فارنهایت) می‌باشد. (شکل ۷۸-۳)

۴ـ جایگزین کردن آلیاژها. فلزاتی که به تردی هیدروژنی مستعدترند فولادهای با استحکام خیلی بالا می‌باشند. آلیاژ کردن با نیکل و مولیبدن، این استعداد را کم می‌کنند.

۵ ـ جوشکاری صحیح. چنانچه تردی هیدروژنی در مرحله جوشکاری بوجود آید، بایستی از الکترودهای مناسب (کم هیدروژن)، استفاده شود. همچنین خشک نگه داشتن محل و اطراف جوش در مرحله جوشکاری بسیار مهم است، زیرا آب و بخار آب منبع اصلی هیدروژن می‌باشند.

۳-۵۳ مکانیک شکست

بحث جامع در مورد مکانیک شکست‌خارج‌از محدودهٔ این کتاب است، ولی ذکر چند نکته ضروری است. علاقمندان می توانند به دستور العمل شمارهٔ ۸ از انستیتو MTI کنترل شکست برای صنایع شیمیایی (۱۹۸۳) مراجعه نمایند. در این دستورالعمل مکانیک شکست به زبان ساده برای مهندسین خوردگی و آنهایی که ممکن است زمینهٔ خوبی در زمینهٔ مکانیک مهندسی نداشته باشند بیان شده است. مثالهایی از کاربرد این روش بیان شده است. در این دستورالعمل باختصار چارچوب اساسی مکانیک شکست بیان شده است، یعنی مقاومت یک ماده در برابر اثر شکست بوسیلهٔ تافنس شکست KIC بیان می شود. شکست موقعی حاصل می شود که فاکتور تمرکز تنش K به KICبرسد.

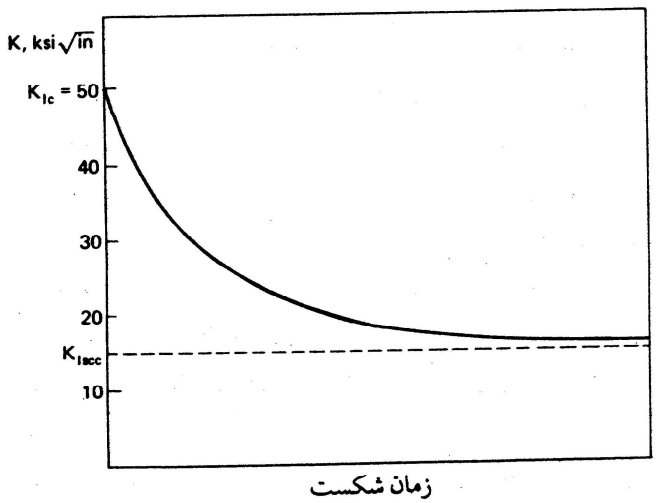
در ساده ترین صورت، فاکتور تمرکز تنش K بصورت $K= 1/۷۷\sigma\sqrt{\alpha}$ بیان

1- H.Pick up 2- Baking

می‌شود که در این رابطه تنش اعمال شده و اندازه ترکهای موجود می باشد. همانطور که گفته شد شکست موقعی اتفاق می‌افتد که $K=1/77\,\sigma\sqrt{\alpha} = KIC$ شود. این در مورد اشاعهٔ ترکها در اثر تنشهای مکانیکی است. در حضور محیط خورنده شرایط می تواند کاملاً متفاوت باشد.

همانطور که در قسمتهای قبلی در همین فصل اشاره شد، scc قابلیت تحمل بار فلز رابه شدت کاهش می‌دهد. در مورد KIC,scc با KISCC جایگزین می شود KISCC عبارتست از مقدار آستانه‌ای برای scc و عبارتست از بیشترین مقدار KIC که در کمتر از آن اشاعهٔ ترک صورت نمی گیرد. در شکل ۸۰-۳ این نکته نشان داده شده است. در این حالت ترکهای خوردگی تنشی در کمتر از مقدار ۱۵ اشاعه پیدا نمی کنند. در منطقه بین منحنی و خط چین، رشد ترک ممکن است کند باشد، ولی نهایتاً سرعت زیاد و بحرانی خواهد شد و انهدام ناگهانی حاصل خواهد شد. بطور کلی، این مطلب در مورد scc و خوردگی خستگی صادق است.

روش مکانیک شکست در مورد فولادهای کم آلیاژی با استحکام بالا (مثلاً فولاد ۴۳۴۰ در آب دریا) کاملاً روشن است، ولی در مورد فولادهای زنگ نزن آستینتی (مثل ۸-۱۸) تا حدودی سر درگم است، عمدتاً بخاطر ماهیت شاخه شاخه شدن ترکها (شکل ۵۳-۳) محدودیتهای دیگری نیز وجود دارد، مثلاً در مورد ورقها یا لوله های



شکل ۸۰-۳ اطلاعات در مورد خوردگی تنشی

نازک، بهترین توصیه آن است که از روش مکانیک شکست استفاده نکنید مگر آنکه درک خوبی از موضوع داشته باشید.

به عقیده من مکانیک شکست به این علت وارد صحنهٔ خوردگی شد که زمان لازم برای شروع ترکهابرای بسیاری از آلیاژهای مقاوم در برابر خوردگی در جاهای مختلف با یکدیگر فرق داشت. موقعی که شما با یک نمونه‌ای شروع می کنید که قبلاً در آن ترک وجود دارد و سپس اشاعهٔ آنرا مطالعه می‌کنید، این متغیر را حذف کرده‌اید.