

این فایل فقط برای مشاهده می باشد برای خرید فایل ورد و قابل ویرایش این پروژه و پایان نامه با قیمت فقط ۵۰۰۰ تومان به سایت علمی و پژوهشی آسمان مراجعه کنید. www.asebankafinet.ir

عنوان پروژه:

بررسی دو نوع خوردگی، خوردگی بین دانه ای و خوردگی
توام با تنش در فولادهای زنگ زن آستینیتی

استاد راهنما:

سایت علمی و پژوهشی آسمان

فهرست مطالب

۴	مقدمه
۵	تعریف خوردگی
۶	خوردگی الکتروشیمیایی
۸.....	خوردگی پکتواخت و خوردگی موضعی
۱۰.....	اثر جوشکاری بر خوردگی
۱۱.....	پدیده‌های متالورژیکی ناشی از جوشکاری
۱۲	تغییرات فازی و جدایش
۱۵	خوردگی بین دانه‌ای
۱۷.....	خوردگی بین دانه ای فولادهای زنگ نزن اوستنیتی در اثر جوشکاری
۲۲.....	عوامل موثر بر خوردگی بین دانه ای
۲۳.....	ترکیب شیمیایی و ریز ساختار
۲۶	کروم و نیکل
۲۸	تیتانیوم و نیوبیوم
۲۹	مولیبدن
۳۰	منگنز و سیلیسیم
۳۱	نیتروژن
۳۲	فریت
۳۴	اندازه دانه
۳۵.....	تاریخچه حرارتی (THERMAL HISTORY)

تنش و تغییر شکل پلاستیک.....	۳۹
اثر محیط	۴۰
دامنه کاربرد روشهای جوشکاری پیشنهادی.....	۴۶
اثر فرایند جوشکاری و شرایط جوشکاری در وقوع حساسیت.....	۴۷
رابطه بین انرژی جوش حساس کننده و حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای.....	۵۱
خوردگی KLA در فولادهای زنگ‌نزن تثبیت شده.....	۵۳
خصوصیات KLA	۵۴
آنالیز دلایل KLA	۵۷
KLA در اتصالات جوشکاری شده از جنس فولادهای زنگ‌نزن.....	۶۶
خوردگی توام با تنش ۱	۶۹
شکل ترکها	۷۱
طبقه بندی مکانیزمها	۷۳
مکانیزمهای متالورژیکی	۷۴
مکانیزمهای حل شدن	۷۵
مکانیزمهای هیدروژن	۷۶
مکانیزمهای مکانیکی	۷۷
روشهای جلوگیری	۷۸
نتیجه گیری	۸۰
مراجع:	۸۲

چکیده

این تحقیق در دو بخش، بخش اول به بررسی خوردگی بین دانه ای^۱ و دیگری به خوردگی توام با تنش^۲ در فولادهای زنگ نزن پرداخته شده است. اینکه پدیده حساس شدن چیست و چه عواملی سبب حساس شدن فولاد می شوند مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به برخی از راههای عمومی پیشگیری از مستعد شدن فولادها برای خوردگی بین دانه ای اشاره شده است. در مورد خوردگی تنشی هم فاکتورهای اثر گذار در این پدیده آورده شده است. در پایان هربخش تحقیقات انجام گرفته در آن زمینه مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آنها جمع بندی^۱ شده است.

۱. Intergranular Corrosion

۲-Stress Corrosion Cracking

فولادهای زنگ‌نزن اوستنیتی به علت دارا بودن خواص مکانیکی مناسب و مقاومت عالی به خوردگی، کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارند. اگر چه حالت کارشده (Wrought) این فولادها، مقاوم به خوردگی است، اما حالت جوشکاری شده آن ممکن است مقاوم به خوردگی نباشد. سیکل حرارتی ناشی از جوشکاری و یا عملیات حرارتی تنش‌زدایی که بر فولاد اعمال می‌شود، ممکن است باعث رسوب فاز کاربید کروم در مرز دانه‌های فولاد، در منطقه متأثر از جوش بشود. نتیجه این فرایند، کاهش غلظت عنصر کروم در مناطق چسبیده به رسوبها است که ممکن است این اختلاف غلظت در ترکیب شیمیایی، باعث از دست رفتن مقاومت فولاد به خوردگی بشود و فولاد به نوعی خوردگی به نام "خوردگی بین دانه‌ای" حساس بشود. اگر فولاد تحت این شرایط، در محیط سرویس قرار بگیرد، مناطق حساس شده، خورده می‌شوند و در نهایت، قطعه دچار شکست ناشی از خوردگی خواهد شد.

طبق آمارهای موجود، سهم عمده‌ای از شکست قطعات در صنایع، شکست ناشی از خوردگی می‌باشد که قسمتی از آن نیز به خوردگی بین دانه‌ای مربوط می‌شود. در نتیجه، با توجه به اهمیت موضوع، هنگام انتخاب فولاد، باید از مقاومت به خوردگی بین دانه‌ای فولاد مورد نظر، بعد از اتمام پروسه‌های ساخت، اطمینان حاصل نمود.

خوردگی بین دانه‌ای، اولین بار حدود ۷۵ سال پیش شناخته شد. از آن موقع به بعد، تحقیقات فراوانی به منظور شناخت بهتر این پدیده و روشهای جلوگیری از آن صورت گرفت. در طول این مدت، در عملیات تولید فولاد و روشهای جوشکاری آن، تغییرات قابل ملاحظه‌ای اتفاق افتاده است. با این همه، کماکان این سؤال مطرح است که هم اکنون نیز در استفاده از این فولادها، با پدیده خوردگی بین دانه‌ای روبرو می‌شویم یا خیر؟

نتیجه تحقیقات فراوان انجام شده در سالیان گذشته و یافته‌های محققان در زمینه مقابله با این پدیده در این گزارش آورده شده است. شرایط ترکیب شیمیایی، روشهای جوشکاری، عملیات حرارتی و شرایط محیطی که تحت آن خوردگی بین دانه‌ای می‌تواند اتفاق بیفتد، مشخص شده و روشهای جوشکاری برای حداقل کردن این پدیده، معرفی شده است.

قسمتی از این گزارش به پدیده Knife Line Attack و مکانیزم تشکیل و روشهای جلوگیری از آن اختصاص دارد. Knife Line Attack نیز نوعی خوردگی موضعی است که مکانیزم آن با مکانیزم خوردگی بین دانه‌ای تفاوت دارد و در فولادهای تثبیت شده اتفاق می‌افتد، ولی به علت شباهت به خوردگی بین دانه‌ای، در بعضی مراجع، نوعی از خوردگی بین دانه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

تعریف خوردگی

به تغییراتی که در نتیجه واکنش‌های شیمیایی یا الکتروشیمیایی مواد با محیط اطراف آنها ایجاد شده و باعث تخریب تدریجی قطعات می‌شود، خوردگی گفته می‌شود. خوردگی، یک واکنش نامطلوب است که سبب جدا شدن تدریجی اتمها از سطح قطعات و تخریب آنها می‌شود که در نهایت باعث شکست قطعه شده و خساراتی را بوجود می‌آورد [۱].

سرعت فعل و انفعالات خوردگی به عواملی مانند درجه حرارت و غلظت محیط اثرکننده بستگی دارد. البته عوامل دیگری نیز مانند تنش مکانیکی (Stress) و فرسایش (Erosion) می‌تواند به خوردگی کمک کند [۱].

پدیده خوردگی، در اغلب فلزات و آلیاژهای آنها ظاهر می‌شود زیرا اغلب فلزات و آلیاژها تمایل به ایجاد ترکیباتی با اتمها یا مولکولهایی از محیط اطراف خود که تحت شرایط موجود از لحاظ ترمودینامیکی پایدار است، دارند. فقط تعداد کمی از فلزات مانند طلا یا پلاتین، تحت شرایط معمولی پایدار هستند و تمایلی به ایجاد واکنش با محیط اطراف ندارند [۱].

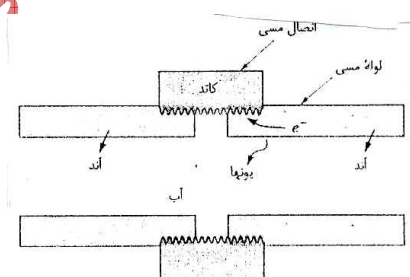
در ادامه این فصل به تشریح برخی از خوردگی‌های مرسوم پرداخته می‌شود.

خوردگی الکتروشیمیایی

متداولترین نوع خوردگی، خوردگی الکتروشیمیایی است. این نوع خوردگی غالباً در محیط آبی که شامل یونهای نمک محلول است رخ می‌دهد. بنابراین آب حاوی یونها، از مایعات الکتrolیتی محسوب می‌شود که محیط مناسبی برای انجام بیشترین واکنشهای خوردگی است. برای درک بهتر خوردگی الکتروشیمیایی، در ذیل، به تشریح واکنشهای الکتروشیمیایی پرداخته می‌شود [۱].

موقعی که قطعه فلزی، در مایع الکتrolیتی (مانند HCl) قرار گیرد، اتمهای فلز در اسید حل می‌شوند یا به عبارتی، توسط اسید خورده می‌شوند. بدین صورت اتمهای فلز طبق واکنش $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$ ، به صورت یون، از فلز جدا می‌شوند و داخل الکتrolیت قرار می‌گیرند. به این ترتیب مدار الکتریکی در سیستم (بین فلز و الکتrolیت) برقرار می‌شود. مطابق شکل ۱-۱ این سیستم دارای ۴ جزء است:

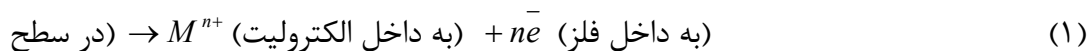
- ۱- آند: الکترونها را به مدار داده و یونهای فلزی از آن جدا می‌شوند و آند زنگ می‌زند.
- ۲- کاتد: الکترونها را می‌گیرد.
- ۳- اتصال الکتریکی: به منظور جریان الکترونها از آند به سمت کاتد و ادامه واکنش بین آند و کاتد برقرار می‌شود.
- ۴- الکتrolیت مایع: که باید با آند و کاتد در تماس باشد. الکتrolیت هادی بوده و مدار الکتریکی را کامل می‌کند. الکتrolیتها، وسیله حرکت یونهای فلزی را از سطح آند به سمت کاتد تأمین می‌کنند [۱].



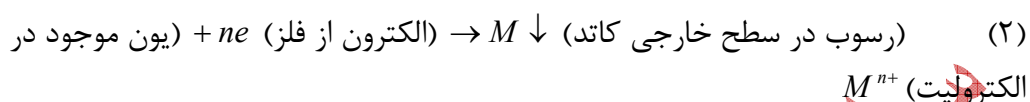
شکل ۱-۱- اجزای یک پیل ساده الکتروشیمیایی [۱].

بنابراین واکنشهای خوردگی الکتروشیمیایی، با واکنشهای اکسیداسیون که الکترونها را تولید می‌کند و واکنشهای احیاء که آنها را مصرف می‌کند، در ارتباط است. هر واکنش، یعنی واکنشهای

اکسیداسیون و احیاء باید همزمان و با سرعت یکسان انجام شوند. واکنش زیر بصورت اکسیداسیون در آند انجام می‌گیرد به صورتی که فلز، یونیزه می‌شود :



فلز M برعکس، واکنش زیر که در آن فلز با گرفتن الکترون به صورت فلز اتمی آزاد می‌شود (واکنش احیاء)، واکنش کاتدی نامیده می‌شود :



تمایل فلزات برای خوردگی در محیط خورنده خاص متفاوت است. یکی از روشهایی که برای مقایسه تمایل فلزات برای شکل‌گیری یونهای فلز در محلولهای مایع به کار می‌رود، مقایسه پتانسیلهای اکسیداسیون یا احیای نیم پیل آنها با پتانسیل مربوط به نیم پیل یون هیدروژن به عنوان مبناست (الکتروود هیدروژن استاندارد) [۱].

مجموعه ویدئوهای آموزشی
پیشرو هفتی آسمان

خوردگی یکنواخت و خوردگی موضعی

عنوان خوردگی موضعی، در مقایسه با خوردگی یکنواخت به کار می‌رود. خوردگی یکنواخت هنگامی اتفاق می‌افتد که شار یونهای فلزی از سطح و شار یونهای کاتدی (روابط ۱ و ۲ در صفحه قبل) به سطح، در ابعاد اتمی، یکنواخت باشد. از نقطه نظر عملی، خوردگی یکنواخت هنگامی اتفاق می‌افتد که سایت‌های (sites) موضعی کاتدی و آندی، به اندازه کافی کوچک باشند و بطور یکنواخت توزیع شده باشند تا به شکست به واسطه موضعی شدن واکنش آندی منجر نشوند. در واقع، هر ناهمواری فیزیکی در سطح فلز، به تشکیل یک آند موضعی تمایل دارد مانند مرزدانه‌ها، عیوب کریستالی نظیر نابجائیها، پله‌های سطحی، فازهای متفاوت و سطح خشن ناشی از ماشینکاری، سنگ زدن، خراش و همچنین صفحات کریستالی مختلف شبکه کریستالی از یک فلز، آرایش اتمی مختلف دارند و رفتار الکتروشیمیایی متفاوتی از خود نشان می‌دهند (مثلاً "بعضی صفحات در محیط‌های آبی آندی‌تر می‌شوند). دانه‌های سطحی از یک فلز پلی کریستال ممکن است در معرض محیط خورنده، سرعت خوردگی متفاوتی از خود نشان دهند. اغلب اوقات این اختلاف در رفتار موضعی کوچک است و در مقیاس ماکروسکوپی خوردگی بصورت یکنواخت ظاهر می‌شود. در بعضی حالات، حمله خوردگی بسیار موضعی است و به شکست موضعی (localized failure) منجر می‌شود [۲].

خوردگی موضعی ممکن است در اثر عوامل مختلفی اتفاق بیفتد. در مورد خوردگی مورد نظر ما، خوردگی موضعی در اثر تغییر در ترکیب شیمیایی اتفاق می‌افتد که عبارتست از جدایش شیمیایی در نتیجه رسوب یک فاز از محلول جامدی که از نظر ترمودینامیکی ناپایدار است. تعداد زیادی از آلیاژها هنگامی که در سرویس قرار می‌گیرند و وقتی که در سرعت‌های بالا سرد شده باشند، رفتار مقاوم به خوردگی از خود نشان می‌دهند. مقاومت به خوردگی فقط برای ترکیبات آلیاژی بدست می‌آید که در دمای بالا محلول جامد کاملی تشکیل دهند و این محلول جامد در سرعت‌های سرد کردن عملی، باقی بماند. اگر سرد شدن خیلی آرام باشد یا به دنبال کوئنچ کردن (سرد کردن سریع) دوباره آلیاژ را تا دمای نسبتاً بالا حرارت دهیم، یک یا چند فاز از محلول جامد رسوب می‌کنند و تغییرات موضعی در ترکیب شیمیایی به واسطه تشکیل رسوب ممکن است آلیاژ را به خوردگی موضعی حساس کند، بسته به نوع آلیاژ، زمان مورد نیاز برای رسوب، ممکن است از چند ثانیه تا چند ساعت باشد. زمانهای کم در جوشکاری و زمانهای بالا در تنش‌زدایی اهمیت دارد [۲].

خوردگی‌های موضعی، بطور متداول در فولادهای زنگ‌نزن بویژه در فولادهای زنگ‌نزن اوستنیتی، اتفاق می‌افتد. طبق آماری که از صنایع شیمیایی Dupont منتشر شده است، از ۶۸۵ مورد شکست در خطوط لوله و تجهیزات این کارخانه در مدت ۴ سال که بیشتر از ۹۰ درصد آنها از جنس فولاد زنگ‌نزن بوده‌اند، ۵۵/۲ درصد آن مربوط به خوردگی می‌باشد. همانطوریکه در جدول ۱-۱ نشان داده

شده است، قسمت عمده شکست‌های ناشی از خوردگی، به خوردگی‌های موضعی از نوع SCC، IGC، Pitting، Corrosion Fatigue و Crevice corrosion ارتباط دارد. از این بین، حدود ۵/۶ درصد شکست‌ها نیز به خوردگی بین دانه‌ای مربوط می‌شود [۳].

جدول ۱-۱: درصد شکست‌های ناشی از خوردگی در صنایع Dupont در مدت ۴ سال [۳].

Types of Corrosion Failures	1968	1969	1970	1971	Cumulative
General	18.1	18.1	15.2	9.2	15.2
Stress corrosion cracking	13.1	11.5	11.5	15.5	13.1
Pitting	10.1	8.6	8.8	4.2	7.9
Intergranular	7.1	5.3	2.7	9.2	5.6
Erosion-corrosion	6.1	3.3	3.2	4.2	3.8
Weld corrosion	0.0	1.9	1.8	6.3	2.5
Corrosion fatigue	0.0	1.4	2.7	0.7	1.5
High Temperature	0.0	1.9	1.4	1.3	1.3
Crevice	1.0	1.0	0.9	0.7	0.9
Others	5.0	3.5	3.9	2.5	3.4
Total corrosion	60.5	56.5	52.1	54.8	55.2
Mechanical	39.5	43.5	47.9	45.2	44.8

اثر جوشکاری بر خوردگی

اگر چه شکل کار شده (Wrought) یک فلز یا آلیاژ در یک محیط بخصوص، مقاوم به خوردگی است، ولی حالت جوشکاری شده آن ممکن است مقاوم به خوردگی نباشد. اگر چه مثالهای بسیاری وجود دارد که در آنها فلز جوش، مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به فلز پایه جوشکاری نشده نشان می‌دهد، در مواقعی نیز فلز جوش، مقاومت به خوردگی خود را از دست می‌دهد. شکست ناشی از خوردگی در جوش در حالتی که فلز پایه و فیلر به درستی انتخاب شوند و کدها و استانداردهای صنعتی هم رعایت شوند و جوش با نفوذ کامل و دارای شکل مناسب هم رسوب داده شود، می‌تواند اتفاق بیفتد [۴]. بعضی اوقات مشکل است که بفهمیم چرا جوشها خورده می‌شوند، ولی بطور کلی یک یا چند مورد از فاکتورهای زیر ممکن است در خوردگی جوشها مؤثر باشند:

طراحی جوش

تکنیکهای تولید (Fabrication Technique)

عملیات جوشکاری (Welding Practice)

پاسهای جوشکاری (Welding Sequence)

رطوبت

ذرات معدنی و آلی

پوسته و فیلم اکسیدی

سرباره و Spatter جوش

ذوب یا نفوذ ناقص جوش

تخلخل

ترک ها (شیارها)

تنشهای پسماند بالا

انتخاب نادرست فیلر

پرداخت نهایی سطح (Final Surface Finish)

پدیده‌های متالورژیکی ناشی از جوشکاری

سیکل گرم شدن و سرد شدن که در طول فرایند جوشکاری اتفاق می‌افتد، بر زیر ساختار و ترکیب سطح جوشها و فلز پایه مجاور تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، ممکن است جوشهای بدون فیلر و جوشهایی که با فیلری که از نظر ترکیب شیمیایی با فلز پایه یکسان است (match) بوجود بیایند و به خاطر یک یا چند عامل از عوامل زیر، مقاومت به خوردگی کمتری نسبت به فلز پایه‌ای که به درستی آنیل شده است، داشته باشند [۴]:

Micro Segregation

رسوب فازهای ثانویه

تشکیل نواحی مخلوط نشده (Unmixed zone)

تبلور مجدد و رشد در منطقه HAZ

تبخیر عناصر آلیاژی از حوضچه جوش مذاب

آلودگی های حوضچه جوش منجمد شونده

تغییرات فازی و جدایش

بعضی اوقات لازم است که پس از عملیات جوشکاری، عملیات تنش زدایی بر روی مقاطع سنگین از جنس فولادهای زنگ نزن انجام شود و این عملیات معمولاً شامل نگه داشتن قطعه در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد برای مدت چند ساعت می باشد. دماهای کاری برای فولادهای ۱۸Cr-۱۰Ni تا حدود ۷۵۰ درجه سانتی گراد و برای grade های مقاوم در برابر حرارت (Heat Resisting) در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد می باشد. در این دماها و مخصوصاً در محدوده ۹۰۰-۶۰۰ درجه سانتی گراد، استحاله فریت به فازهای σ و χ و رسوب کاربیدها، ممکن است اتفاق بیفتد [۶].

ترکیب شیمیایی فازهای σ و χ در فلز جوش فولاد ۳۱۶ پس از عملیات حرارتی در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد، در جدول ۱-۲ آمده است. تشکیل فازهای σ و χ با افزایش درصد مولیبدن و کروم، ترغیب می شود و به عنوان مثال، در یک نمونه فلز جوش از جنس فولاد ۳۱۶، فریت از این عناصر غنی می باشد. جدول ۱-۳ ترکیب شیمیایی دو فلز جوش، یکی حاوی ۶ درصد فریت و دیگری حاوی ۱۸ درصد فریت را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود، جدایش مولیبدن در فریت، بسیار زیاد می باشد که این امر، تشکیل مقدار قابل توجهی فاز σ و χ را در فلز جوشی که حاوی فریت بیشتری است، پس از عملیات حرارتی در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد، نتیجه می دهد [۶].

جدول ۱-۱: ترکیب شیمیایی فازهای حاصل از تجربه فریت و فاز کاربید [۶].

Phase	Composition (mass %)			
	Cr	Ni	Mo	Fe
Carbide	65	1	5	25
σ	28	4	8	58
χ	23	4	13	57

مطالعات نشان داده که فلز جوشهای کروم - نیکل اوستنیتی به Microsegregation حساسند و این حساسیت اولاً به دلیل تشکیل دندريت و ثانياً به خاطر تقسیم شدن عناصر حل شونده بین دو فاز فریت و اوستنیت و ثالثاً به خاطر رسوب کاربید و ترکیبهای بین فلزی می باشد. اگر این اثر به اندازه کافی شدید باشد، باعث تهی شدن بعضی نواحی، از کروم و مولیبدن می شود تا حدی که مقاومت به خوردگی آنها به مقدار زیادی کاهش می یابد [۶].

جدول ۲-۰۱: ترکیب شیمیایی اوستنیت و فریت در فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ در شرایط as-weld [۶].

Weld metal ferrite number	Element	Bulk analysis	Austenite	Ferrite	Change in composition (%)	
					Austenite	Ferrite
FN6	Cr	18.0	18	23	0	+27
	Ni	8.9	9	5	+6	-46
	Mo	1.85	2	4	-3	+82
	Fe	68.5	68	66	-1	-4
FN18	Cr	20.5	21	26	0	+27
	Ni	10.1	11	6	+5	-44
	Mo	3.1	3	5	-14	+56
	Fe	64.8	64	62	0	-4

همچنین، جدایش، پسیو بودن فلز جوش را تا حدی کاهش می‌دهد که نسبت به اطراف خود آندی می‌شود، و این امر باعث خوردگی ترجیحی فلز جوش می‌شود. در شرایطی که این حمله امکان‌پذیر است و برای آلیاژهایی که حاوی مولیبدن هستند (به اندازه فولاد ۳۱۶)، اثر جدایش می‌تواند با افزایش درصد مولیبدن و کروم جبران شود و تولیدکنندگان الکترودهای پوشش‌دار، این نکته را در نظر می‌گیرند [۶].

مسأله جدایش برای فولادهای سوپر اوستینی بسیار شدیدتر است. این فولادها برای مقاومت در محیط‌هایی با خوردگی شدید به کار می‌روند نظیر محیط‌هایی که حاوی یونهای کلرید می‌باشند. این فولادها معمولاً حاوی حدود ۶ درصد مولیبدن می‌باشند. درمورد این فولادها، جبران کردن اثر جدایش با آلیاژهای پایه آهن امکان‌پذیر نیست، بنابراین برای جوشکاری این فولادها، از مواد مصرفی پایه نیکل استفاده می‌شود. جدول ۴-۱ مقایسه ترکیب شیمیایی یک آلیاژ با ترکیب شیمیایی نوک دندريت آن و ترکیب شیمیایی نواحی بین دندریتی، برای رسوب جوش حاصل از فولاد سوپر اوستیتی بدون استفاده از فیلر و با استفاده از فیلر پایه نیکل با دو ترکیب شیمیایی مختلف را نشان می‌دهد [۶].

جدول ۳-۱: Microsegregation فولاد زنگ‌نزن سوپر اوستینی [۶].

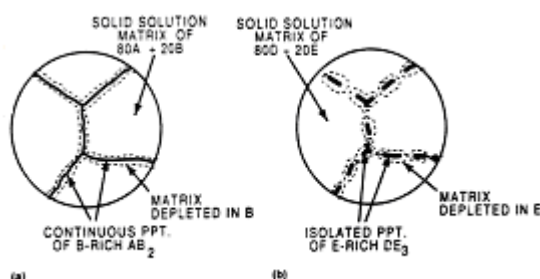
Filler	Element	Bulk	Composition (% by mass)	
			Dendrite core	Interdendritic
None	Mo	6.1	4.2	6.9
	Cr	20.2	19.3	20.5
	Ni	17.6	17.6	19.2
ERNiCrMo-3	Mo	7.6	5.8	10.5
	Cr	21.4	20.7	20.9
	Ni	47.2	47.7	43.6
ERNiCrMo-4	Mo	11.3	9.8	14.4
	Cr	17.3	17.2	18.1
	Ni	40.7	43.1	39.2

سپات علمی و پژوهشی آسمان

خوردگی بین دانه‌ای

رسوب از یک محلول جامد ناپایدار است و چون مرزدانه‌ها مسیرهای نفوذ مناسب و نیز مکانهای جوانه زنی مناسب برای رسوب فازها هستند، معمولاً در مرزدانه‌ها اتفاق می‌افتد (انرژی لازم برای تشکیل یک رسوب در مرزدانه کم است). همراه این فرایند، یک گرادیان ترکیب شیمیایی به واسطه تهی شدن نواحی اطراف مرزدانه از عنصر حل شونده (که فصل مشترک‌های فاز رسوب کرده با دانه‌های اطراف است)، بوجود می‌آید. نتیجه این فرایندها، غلظت کمتر عنصر حل شونده در مناطقی از محلول جامد چسبیده به رسوبها است که ممکن است این اختلاف در ترکیب شیمیایی برای شروع خوردگی در این نواحی موضعی کافی باشد [۲].

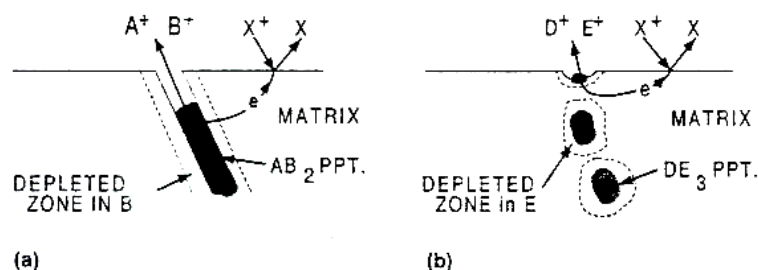
یک متغیر مهم، مقدار پیوستگی فاز رسوب کرده در مرزدانه‌هاست. اگر این رسوب مانند مورد a در شکل ۲ دورتادور دانه‌ها بطور پیوسته باشد، تمام مرزدانه‌ها یک ناحیه پیوسته در اطرافشان خواهند داشت که از عنصر حل شونده (که به سمت مرزدانه‌ها نفوذ می‌کند) تهی شده است. اگر رسوب ناپیوسته باشد، مانند مورد b در شکل ۲-۱، مناطقی در مرز دانه بین ذرات رسوب کرده وجود دارد که از نظر ترکیب شیمیایی تغییر نکرده و یا کمتر تغییر کرده است [۲]. حمله خوردگی به این بستگی خواهد داشت که کدامیک از نواحی قسمت تغییر نکرده داخل دانه، نواحی تهی شده چسبیده به مرزدانه‌ها و فاز رشد کرده، تمایل دارند به عنوان سطح کاتدی یا آندی عمل کنند [۲].



شکل ۱۰-۱- نمایش شماتیک ریزساختار حساس به خوردگی بین دانه‌ای a: رسوب پیوسته و b: رسوب ناپیوسته [۲].

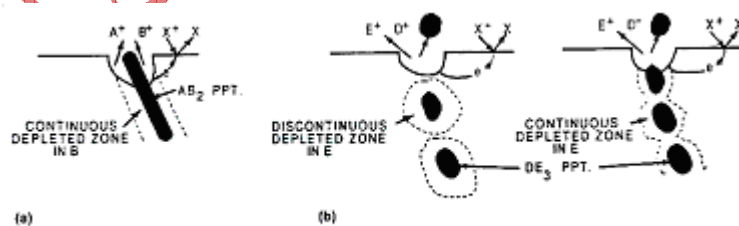
اگر فاز دوم رسوب کرده، پیوسته باشد و نسبت به هر دو ناحیه تهی شده و کمتر تهی شده (یا دست نخورده) محلول جامد اطراف، آندی باشد، رسوب خورده می‌شود و یک شکاف پیوسته بوجود می‌آورد که تمایل به منتشر شدن در دورتا دور دانه دارد، این مورد در شکل ۱-۳ قسمت a نشان داده شده است. همچنین طبق مورد b در شکل ۱-۳، اگر فاز دوم ناپیوسته و آندی باشد، رسوب خورده می‌شود و حفره‌های ایزوله (isolated pit) در طول مرزدانه‌ها بوجود می‌آورد. روشن است که در حالت اول،

شرایط سخت تری بوجود می‌آورد که به جدایش کامل دانه‌ها در طول مرزدانه و جدایش (disintegration) احتمالی آلیاژ منتهی می‌شود [۲].



شکل ۱۰-۲- پروفیل فصل مشترک خوردگی بین دانه‌ای هنگامی که فاز رسوب کرده آندی است: a: خوردگی ترجیحی فاز پیوسته AB_2 و b: خوردگی ترجیحی فاز ناپیوسته DE_3 [۲].

اگر مناطق تهی شده محلول جامد حساسیده به رسوب‌های مرزدانه، آندی باشد و واکنش کاتدی توسط ذرات رسوب و یا قسمت کمتر تهی شده محلول جامد داخل دانه انجام شود، حمله خوردگی در نواحی نزدیک رسوب، موضعی می‌شود که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. حمله خوردگی بسته به توزیع رسوب در مرزدانه، پیوسته و یا ناپیوسته خواهد بود. به ندرت مشاهده می‌شود که قسمت کمتر تهی شده محلول جامد داخل دانه، نسبت به نواحی تهی شده در مرزدانه، آندی شود. در این حالت به واسطه اینکه سطح کاتد نسبت به سطح آند بسیار بزرگ است، خوردگی موضعی با سرعت بسیار زیاد اتفاق می‌افتد [۲].

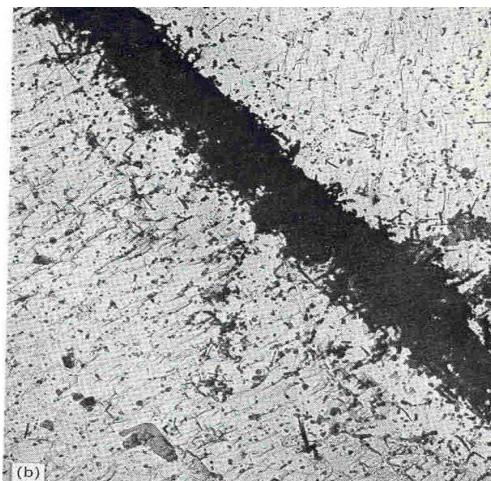
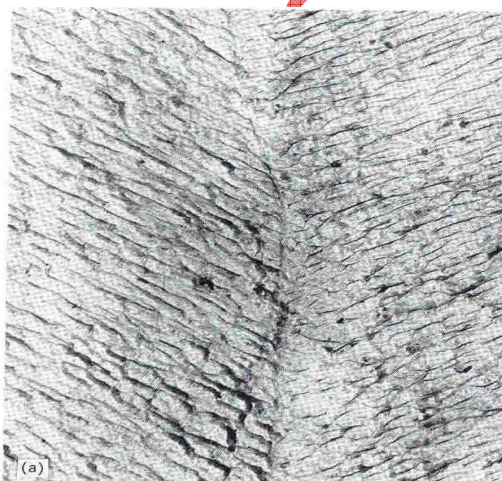


شکل ۱-۳- پروفیل فصل مشترک خوردگی بین دانه‌ای هنگامی که نواحی تهی شده از ماده حل شدنی آندی باشند: a: خوردگی بین دانه‌ای هنگامی که رسوب و نواحی تهی شده پیوسته هستند. b: خوردگی بین دانه‌ای هنگامی که رسوب و نواحی تهی شده پیوسته نیستند [۲].

خوردگی بین دانه ای فولادهای زنگ نزن اوستنیتی در اثر جوشکاری

فولادهای زنگ نزن اوستنیتی که حاوی تقریباً ۱۸ درصد کروم و ۱۰ درصد نیکل هستند، به خاطر مقاومت عالی به خوردگی کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف نظیر صنایع شیمیایی، نفت، تولید برق و محیط‌های خورنده دیگر دارند و نیز در کارخانجاتی که محصول تولیدی با خلوص بسیار بالا احتیاج است و آلودگی‌های ناشی از خوردگی قابل چشم پوشی نیست، استفاده می‌شوند [۵].

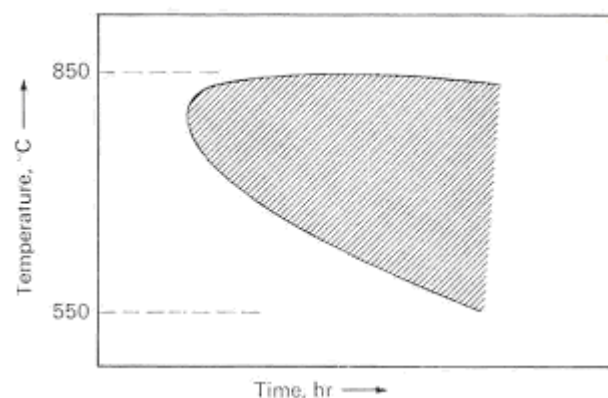
مقاومت به خوردگی این فولادها به خاطر خاصیت غیر فعال (Passive) بودن سطح آنها است. به این معنی که هنگامیکه فولاد زنگ نزن اوستنیتی حتی در یک محیط اکسید کننده ضعیف هم قرار بگیرد، یک فیلم نازک سخت و چسبنده از اکسید کروم، روی سطح آن تشکیل می‌شود که بطور مؤثر بین فلز و محیط خورنده مانند یک مانع عمل می‌کند. به منظور بدست آوردن خاصیت "پسیو" در آلیاژهای پایه آهن، ضروری است که به آنها حداقل حدود ۱۱-۱۰ درصد کروم اضافه شود. اما پایداری فیلم پسیو، با افزایش مقدار کروم، بهبود می‌یابد و در نهایت محتوای کروم ۱۸ درصد، به منظور تضمین پسیو بودن فولاد، در اغلب شرایط سرویس دهی فولاد به کار می‌رود. کروم در دماهای حدود ۵۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد میل ترکیبی شدیدی با کربن دارد و اگر فولاد زنگ نزن ۱۸/۱۰ (منظور، فولادها با محتوای ۱۸ درصد کروم و ۱۰ درصد نیکل است) در این بازه حرارتی، برای مدت زمان بیشتر از یک حد مشخص، حرارت داده شوند، کاربیدهای غنی از کروم در مرز دانه‌های فلز، تشکیل می‌شوند (شکل ۱-۵ و ۱-۶) [۵].



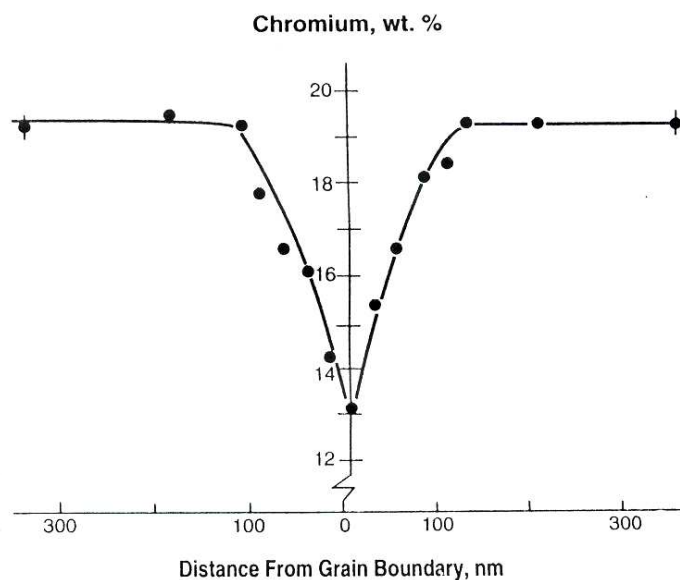
شکل ۱-۱- مرز دانه در a: فولاد زنگ نزن ۱۸/۱۰ عملیات انحلالی شده، هیچ کاربیدی وجود ندارد و b: فولاد زنگ نزن ۱۸/۱۰ حساس شده، رسوبات کاربید کروم زیادی دیده می‌شود [۵].

بزرگنمایی: ۱۰۰۰×

اگر این کاربیدها تشکیل شوند، محیط اطراف این کاربیدها، از عنصر کروم تهی می‌شود. مقدار کروم نواحی اطراف مرزدانه‌ها، ممکن است به مقداری برسد که از مقدار لازم برای پسیو ماندن، کمتر باشد (شکل ۷-۱) و اگر این اتفاق بیفتد، هنگام سرویس دهی در فولاد، خوردگی بین دانه‌ای اتفاق خواهد افتاد.



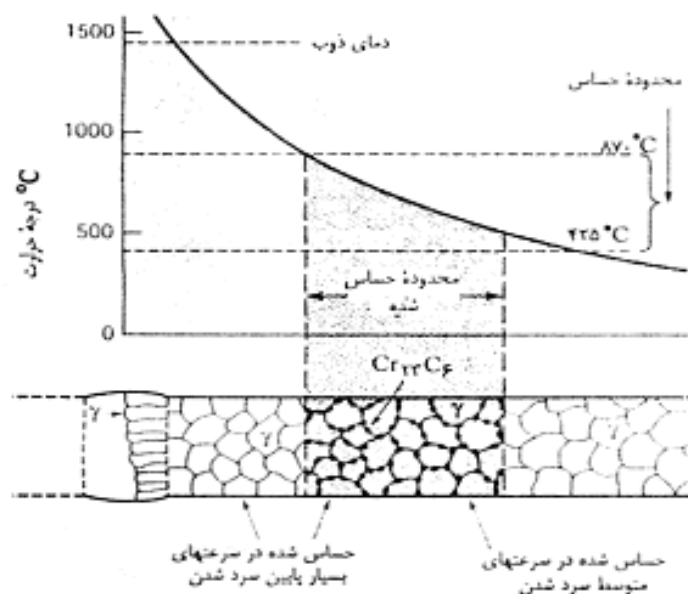
شکل ۷-۱-۲- حرارت دادن فولاد در منطقه خط‌چین، باعث حساسیت می‌شود [۵].



شکل ۱۰-۳- پروفیل غلظت کروم در عرض مرزدانه [۳].

در طول جوشکاری، نواحی نزدیک به جوش در منطقه HAZ در داخل دمای حساس‌کننده، حرارت

می‌بینند و در نتیجه، در این مناطق، تهی شدن اطراف مرزدانه‌ها از کروم و متعاقب آن خوردگی بین دانه‌ای اتفاق می‌افتد که این نوع خوردگی به خوردگی بین دانه‌ای مشهور است (شکل ۸-۱ و ۹-۱) [۵].

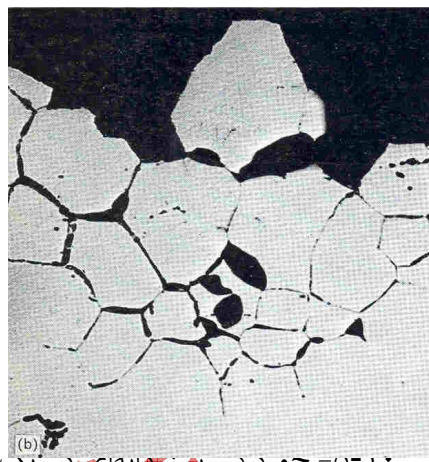
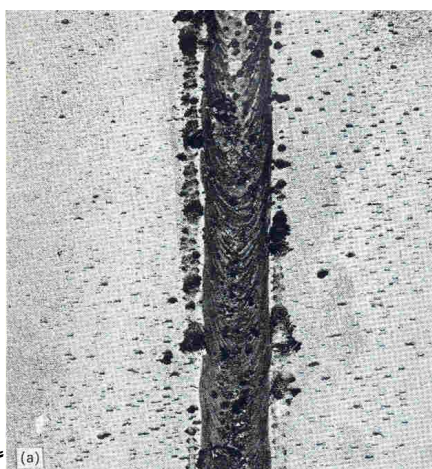


شکل ۴-۱- حداکثر درجه حرارت در اطراف جوش فولاد و تشکیل کاربید در دمای حساس کننده [۱].

برای جلوگیری از خوردگی بین دانه‌ای، سه روش می‌تواند استفاده شود که عبارتند از:

۱- استفاده از عناصر تثبیت کننده (Stabilizing) مانند تیتانیوم یا نیوبیوم به فولاد. این عناصر نسبت به کروم، میل ترکیبی بیشتری با کربن دارند. پس در شرایط مشابه، به جای کروم با کربن تشکیل کاربید می‌دهند و در نتیجه این عمل، کروم به اندازه کافی برای تشکیل فیلم پسیو در زمینه فولاد باقی می‌ماند [۵].

۲- استفاده از فولادهای (Extra Low Carbon) ELC. این فولادها حاوی کمتر از ۰.۰۳٪ کربن هستند و چون کربن کمی دارند، مقدار این کربن برای تشکیل کاربید، کافی نمی‌باشد و در نتیجه کروم نمی‌تواند با کربن، کاربید تشکیل دهد و در زمینه فولاد، باقی می‌ماند و با تشکیل فیلم پسیو، مقاومت به خوردگی را حفظ می‌کند [۵].



شکل ۱۰-۳- خوردگی بین دانه‌ای در یک ورق ۱۶ میلی‌متری گنمایي $\times 500$ [۵].

۳- عملیات حرارتی کل ساختار پس از اتمام فعالیت‌های ساخت، در دمای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد. دلیل انجام آن، حل کردن کاربیدهای موجود آمده در ساختار فولاد است که باعث می‌شود کروم به محلول جامد (یعنی زمینه فولاد) بازگردانیده شود. یکی از نکات مهم این روش، سرد کردن سریع فولاد پس از عملیات حرارتی می‌باشد. به این منظور که در محدوده حرارتی حساس کننده، دوباره کاربید کروم تشکیل نشود [۵]. به علت مشکلات اجرایی، این روش بندرت استفاده می‌شود.

پدیده خوردگی بین دانه‌ای به استفاده از فولادهای تثبیت نشده مربوط است. این پدیده حدود ۷۵ سال پیش، هنگامی که فولاد تثبیت نشده با درصد کربن بالا (حدود ۰/۱۲٪)، با استفاده از فرایند جوشکاری اکسی استیلن که روشی با انرژی جوش بالا است جوشکاری شده بود، مشاهده شد. امروزه فولادهای تثبیت نشده، معمولاً حاوی حدود ۰/۰۶ درصد کربن هستند و جوشکاری آنها معمولاً با روشهای قوس الکتریکی انجام می‌شود که در آن سرعت گرم شدن و سرد شدن، بالا است و به دلایل فوق، امروزه احتمال بروز خوردگی بین دانه‌ای، بسیار کاهش یافته است [۵].

با این وصف ترس از وقوع خوردگی بین دانه‌ای هنگام سرویس دهی، مانع از استفاده از فولادهای تثبیت نشده می‌شود، علی‌رغم اینکه انجام روش‌های ذکر شده به منظور اجتناب از خوردگی بین دانه‌ای، باعث افزایش قیمت فولاد می‌شود [۵].

در اغلب فولادهای کار شده، تنشهای طراحی برای دماهایی حدود دمای محیط، برای فولادهای تثبیت شده و تثبیت نشده، شبیه به هم است. بنابراین در استفاده از فولادهای تثبیت نشده، افت مکانیکی

رخ نمی‌دهد. از طرفی grade های ELC نسبت به فولادهای تثبیت شده و تثبیت نشده با درصد کربن بالاتر، استحکام کمتری دارند، بنابراین هنگام استفاده از فولادهای ELC، باید از مقاطع ضخیمتر استفاده کرد که این کار، باعث افزایش قیمت سازه مورد نظر نیز می‌شود [۵].

سپین علمی و پژوهشی آسمان

عوامل موثر بر خوردگی بین دانه ای

چهار فاکتور اصلی زیر، حساسیت فولاد زنگ نزن را به خوردگی بین دانه‌ای تعیین می‌کند [۵]:

۱- ترکیب شیمیایی و ریز ساختار

۲- تاریخچه حرارتی (Thermal History)

۳- تنش‌های درونی و خارجی که از تغییر شکل (Deformation)، جوشکاری و یا بارگذاری هنگام سرویس‌دهی ناشی می‌شوند.

۴- محیط سرویس

در ذیل، به توضیح در مورد هر یک از فاکتورهای ذکر شده در بالا، پرداخته می‌شود.

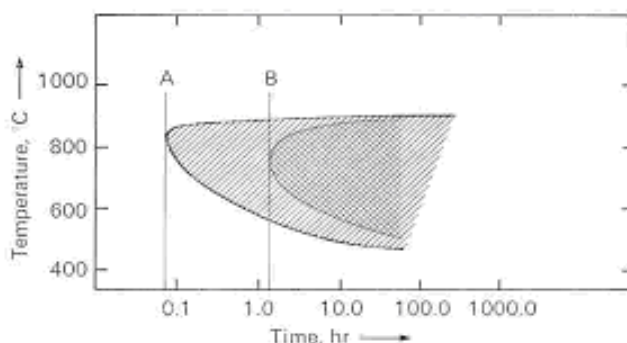
سلامی و پیرز هشتی آسمان

ترکیب شیمیایی و ریز ساختار

کربن

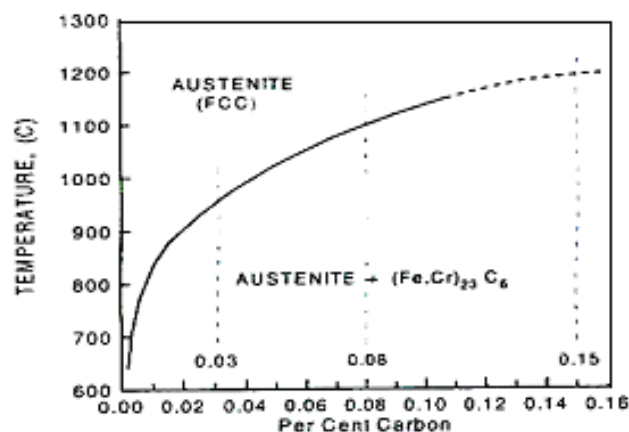
مهمترین فاکتور ترکیب شیمیایی که بر حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای تأثیر می‌گذارد، مقدار عنصر کربن است. علت اهمیت کربن به این خاطر است که این عنصر تعیین می‌کند که چقدر کروم در تشکیل کاربید شرکت کند و مقدار وسعت تهی شدن اطراف مرز دانه‌ها از کروم چقدر می‌باشد. با کاهش درصد کربن فولاد تا زیر سطح حلالیت در محلول جامد در محدوده حرارتی حساس شدن، می‌توان از حساسیت نمونه جلوگیری کرد. البته این امر همیشه عملی نیست زیرا برای رسیدن به این شرایط باید درصد کربن را تا زیر ۰/۰۱ درصد کاهش داد. ذکر این نکته ضروری است که با پیشرفت‌های اخیر در روش‌های فولادسازی، می‌توان فولاد با درصد کربن ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۲۰ تولید کرد. باید به این نکته نیز توجه کرد که کاهش درصد کربن، باعث افت خواص مکانیکی می‌شود. برای اهداف عملی، Grade های ELC با درصد کربن حداکثر ۰/۰۳ درصد رضایت‌بخش به نظر می‌رسد. و در این فولادها، هیچ نمونه‌ای از خوردگی بین دانه‌ای نشده است. نرخ حساس شدن به خوردگی بین دانه‌ای قویاً به درصد کربن بستگی دارد. و فولاد با مقدار کربن ۰/۰۸ درصد، نرخ حساس شدنی حدود ۳ تا ۵ بار سریع‌تر از فولاد با مقدار کربن ۰/۰۶ درصد دارد [۵].

در شکل ۱-۱۰، دو منحنی نمایش داده شده است که بازه دمایی تشکیل کاربید در فولادهای حاوی ۰/۰۵٪ کربن و ۰/۰۱۵٪ کربن را نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود زمان حرارت دادن لازم برای حساس شدن در فولاد با درصد کربن کمتر، بسیار بیشتر است (زمان B در مقایسه با زمان A) و در نتیجه، احتمال وقوع خوردگی بین دانه‌ای، بسیار کمتر می‌باشد [۵].



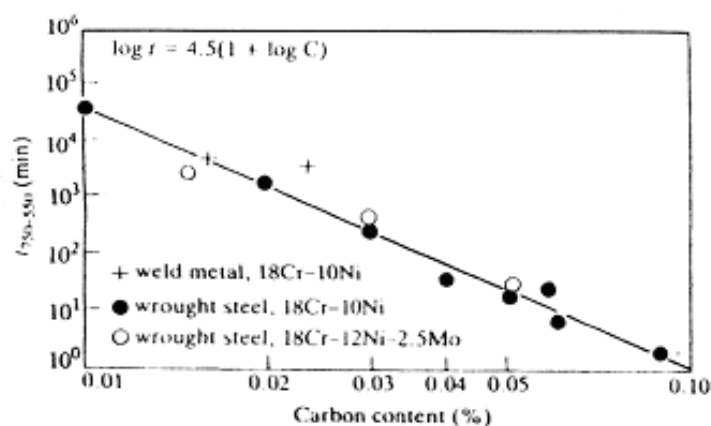
شکل ۱-۱- شرایط عملیات حرارتی که باعث رسوب کاربید و حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای در فولادهایی با درصد کربن ۰/۱۵ (منحنی مماس با خط A) و ۰/۰۵ (منحنی مماس با خط B) درصد می‌شود [۵].

حلالیت کربن در فولاد زنگ نزن ۸ Ni - ۱۸ Cr در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است. منطقه بالای منحنی، تک فاز و شامل فاز اوستنیت است. منطقه زیر منحنی، کاربید کروم حاوی مقدار کمی آهن $(Cr, Fe)_{23}C_6$ در تعادل با اوستنیت است. خط چین‌های عمودی به ترتیب با ماکزیمم درصد کربن فولادهای زنگ نزن ۳۰۴L، ۳۰۴ و ۳۰۲ منطبق است. منطقه اوستنیتی با حرارت دادن فولاد ۳۰۴L تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، فولاد ۳۰۴ تا ۱۰۷۵ درجه سانتی‌گراد و فولاد ۳۰۲ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قابل حصول است. پیشنهاد برای عملیات حرارتی این فولادها، حرارت دادن تا دمای ۱۱۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و سپس سرد کردن با نرخ مناسب است تا از رسوب کاربید کروم غنی از کروم جلوگیری شود. در اغلب حالات، کوئنچ در آب استفاده می‌شود [۲].

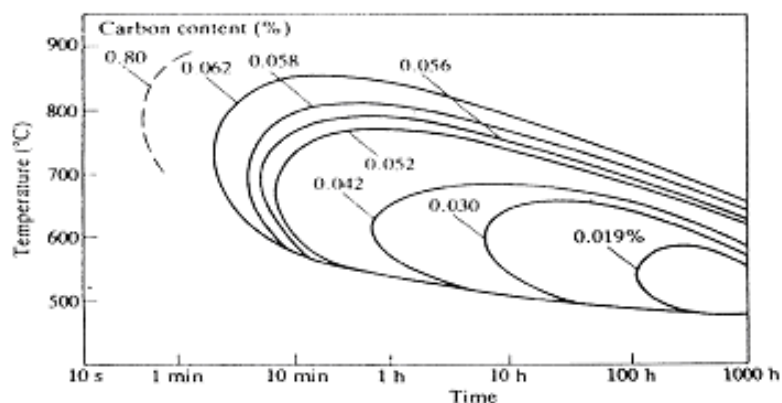


شکل ۲-۰- حلالیت کربن در فولاد ۳۱۸ ۸wt%Cr-۸wt%Ni

شکل ۱-۱- رابطه دما - زمان برای رسوب بین دانه‌ای کاربیدها در فولادهای اوستنیتی و فلز جوش را به عنوان تابعی از درصد کربن نشان می‌دهد. شکل ۱-۱۳ نیز اثر کربن بر رسوب کاربیدها را نشان می‌دهد [۶].



شکل ۱-۳- زمان حساسیت برای فولادهای اوستنیتی کروم - نیکل به عنوان تابعی از درصد کربن. t : زمان (بر حسب دقیقه) لازم برای سرد شدن از ۷۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی گراد می باشد. [۶].

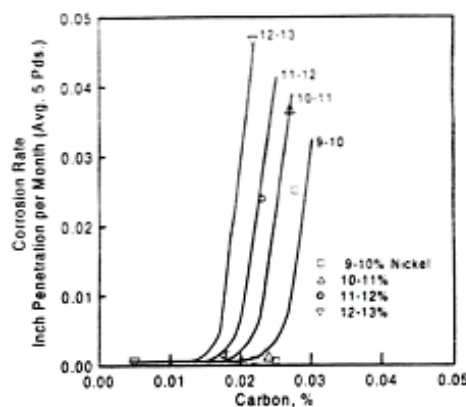


شکل ۱۰-۴- اثر عنصر کربن بر رسوب کاربیدها. شکل زمان لازم برای حساسیت را بر حسب درصد کربن نشان می دهد [۶].

کروم و نیکل

افزایش درصد کروم زمینه فولاد، در کاهش حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای بسیار مفید است زیرا کروم عامل تشکیل لایه پسیو در فولاد و باعث ایجاد مقاومت به خوردگی می‌باشد. اما افزایش درصد نیکل، تمایل به افزایش سرعت حساسیت دارد (به حساسیت شتاب می‌دهد). در آلیاژهای با ۱۸ درصد کروم، مقدار حلالیت کربن در اوستنیت با افزایش غلظت نیکل کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند یک عامل در افزایش حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای فولادهای با محتوای نیکل بیشتر از ۱۰ درصد باشد [۵].

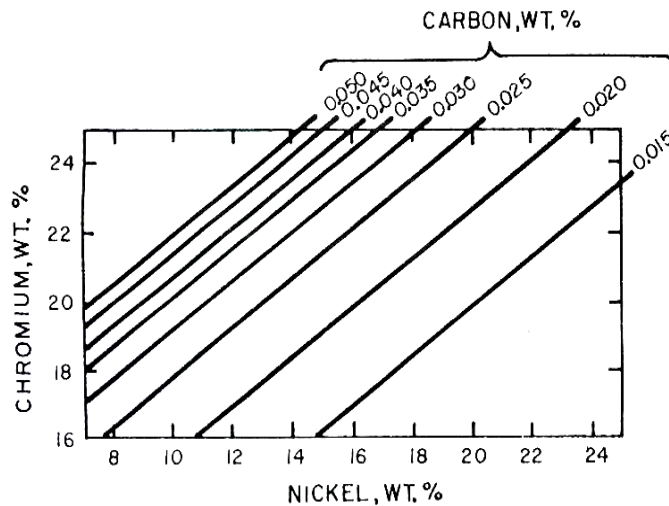
یک مثال از رابطه بین محتوای کربن و نیکل در حساسیت به IGC فولاد ۳۰۴ در شکل ۱-۱۴ آمده است. سرعت خوردگی در اسید نیتریک ۶۵٪ جوشان، به عنوان تابعی از درصد کربن برای فولاد زنگ نزن ۱۸٪Cr برای ۴ محدوده درصد نیکل رسم شده است. زمان عملیات حرارتی ۱۰۰ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه می‌باشد. با توجه به شکل، سرعت خوردگی در اطراف ۰.۰۲٪ کربن خیلی سریع افزایش می‌یابد و این نکته را مشخص می‌سازد که حداکثر درصد کربن ۰.۰۳٪ برای فولاد ۳۰۴ به منظور نگه داشتن سرعت خوردگی در یک حد معقول آنچنان مطمئن کننده نیست [۲].



شکل ۱-۱ اثر درصد کربن و نیکل سرعت خوردگی بین دانه‌ای برای فولاد ۱۸wt%Cr. آلیاژها به مدت ۱۰۰ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد حساس شده‌اند و بعد در اسید نیتریک ۶۵٪ جوشان غوطه‌ور شده‌اند [۲].

همچنین منحنی‌ها نشان می‌دهند که (بخصوص در محدوده ۰.۰۱٪ و ۰.۰۲٪ کربن) افزایش غلظت نیکل در غلظت کربن مشخص، سرعت خوردگی را افزایش می‌دهد. این اثر بواسطه کاهش حلالیت کربن در اوستنیت در نتیجه افزایش غلظت نیکل می‌باشد [۲].

شکل ۱-۱۵ مقدار عناصر کربن، کروم و نیکل لازم به منظور جلوگیری از خوردگی بین دانه‌ای در تست Strauss، در یک نمونه که به مدت ۱ ساعت در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد، حساس شده است را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۱-۲ اثر عناصر کروم و نیکل بر روی درصد کربن لازم به منظور اجتناب از IGC در یک فولاد زنگ‌نزن در تست Strauss پس از ۱ ساعت حساس کردن در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد [۳].

این نکته قابل ذکر است که تغییر در محتوای کروم و نیکل برای فولادهای با درصد Typical با Cr ۱۸ و Ni ۱۰ اهمیت چندانی ندارد، اما اثر مخرب افزایش نیکل هنگامی است که درصد نیکل تا حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد افزایش یابد [۵].

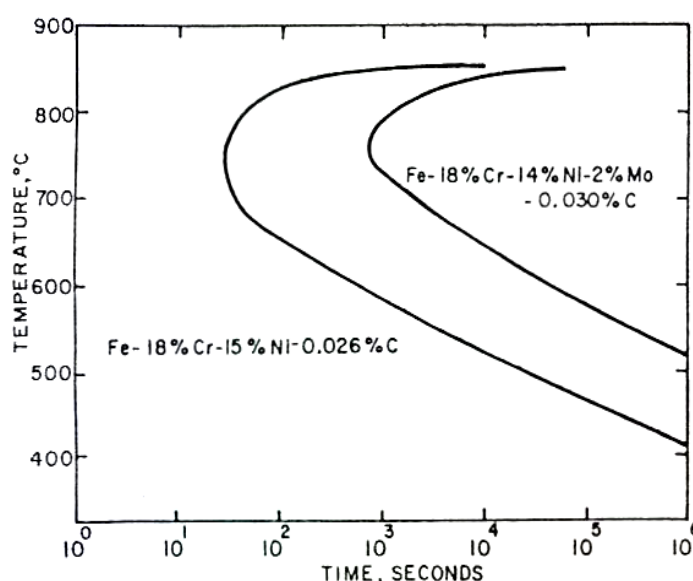
تیتانیوم و نیوبیوم

مقدار عناصر تثبیت کننده تیتانیوم و نیوبیوم که برای تثبیت کردن لازم است به مقدار کربنی که به صورت $Ti(C و N)$ یا $Nb (C و N)$ حبس می شود بستگی دارد. از نظر درصد وزنی، Ti به اندازه حداقل $C \times 4$ به فولاد اضافه می شود اما Nb به اندازه $C \times 10$ اضافه می شود. در اغلب اهداف عملی، اختلافی بین بازدهی دو عنصر، وجود ندارد و انتخاب یکی از این دو توسط فولادساز، به مسائل اقتصادی بازمی گردد. در واقع Nb اندکی مؤثرتر از Ti است. در نواحی HAZ جوش که در دماهای بالاتر قرار می گیرد، هر دوی $Ti(C و N)$ و $Nb(C و N)$ تا حدی تمایل به حل شدن دارند، اما نرخ بالاتر تشکیل $Nb(C و N)$ ، Nb را قادر می کند که اثر تثبیت کنندگی بیشتری هنگام سرد کردن داشته باشد [۵].

این اختلاف، فقط هنگامی اهمیت دارد که محیط، اکسید کنندگی بالایی داشته باشد نظیر Plant های اسید نیتریک که در آنها آلیاژهای تثبیت شده توسط Ti ، معمولاً "رضایت بخش نیست و محدودیت هایی در مورد درصد هر دو عنصر Ti و C به منظور اجتناب از IGC در HAZ، ضرورت می یابد [۵].

مولیدن

مولیدن غیر از بهبود مقاومت به خوردگی عمومی (General) در یک محدوده وسیعی از محیط‌ها، از حساسیت به IGC نیز جلوگیری می‌کند. دلیل این امر، اثر تأخیری است که مولیدن بر روی سینتیک تشکیل کاربید کروم در منطقه وسیعی از محدوده دمایی حساس شدن دارد [۵]. شکل ۱-۱۶، اثر مولیدن بر روی رفتار حساسیت فولادهای زنگ‌زن اوستنیتی در تست Strauss را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۱-۱- اثر درصد مولیدن بر روی رفتار حساسیت فولادهای زنگ‌زن اوستنیتی در تست Strauss [۳].

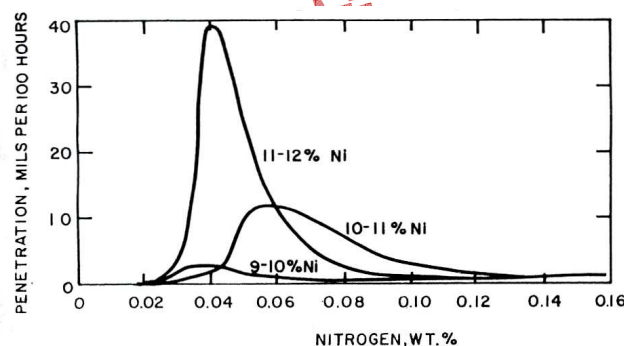
منگنز و سیلیسیم

اغلب Grade های فولادهای زنگ‌نزن اوستییتی، محتوی حداکثر ۲ درصد از هر کدام از عناصر منگنز و سیلیسیم هستند. تا این مقدار، این عناصر اثر مهمی روی خوردگی بین دانه‌ای ندارند [۵]. منگنز به حساسیت شتاب می‌دهد و این شتاب دهی، در فلز جوشهای با درصد منگنز بالا (حدود ۶٪) و تماماً "اوستییتی اتفاق می‌افتد که در این صورت لازم است درصد کربن، کاهش یابد تا همان مقاومت به حساسیت حاصل شود [۵].

پایان
علمی و پژوهشی آسمان

نیتروژن

اگرچه کروم با نیتروژن ترکیب می‌شود و مانند کاربیدها، تشکیل نیتريد می‌دهد که باعث تهی شدن کروم می‌شود، ولی وجود نیتروژن در فولادهای زنگ‌نزن اوستنیتی اثر مهمی روی خطر حمله بین دانه‌ای ندارد [۵]. اثر نیتروژن بر روی حساسیت، پیچیده است و به مقدار آن در آلیاژ و نیز به مقدار کروم بستگی دارد (شکل ۱-۱۷). تحقیقاتی که بر روی فولادهای ۳۰۴ L و ۳۰۴ LN به عمل آمده است، نشان داده که اضافه کردن نیتروژن تا ۰/۱۴ درصد، اثر مخربی بر IGC ندارد به شرط اینکه درصد کربن کمتر از ۰/۰۲ درصد باشد. مطالعات دیگری نشان داده است که در فولاد ۳۰۴ که حاوی ۰/۰۵ درصد کربن است، اضافه کردن نیتروژن تا ۰/۱۶ درصد، حساسیت را به تأخیر می‌اندازد. در حالیکه، نیتروژن بیشتر از ۰/۱۶ درصد، آن را تشویق می‌کند. تأخیر در حساسیت با افزایش نیتروژن در فولادهای اوستنیتی حاوی ۴/۵ درصد مولیبدن نیز مشاهده شده است. مطالعات دیگری نشان داده که اضافه کردن مولیبدن به فولادهای حاوی نیتروژن، مقاومت در برابر حساسیت را با ایجاد تأخیر در رسوب گذاری کاربید کروم، بهبود می‌دهد. مولیبدن به همراه نیتروژن، مقاومت در برابر شکستن فیلم پسیو را نیز افزایش می‌دهد [۳].

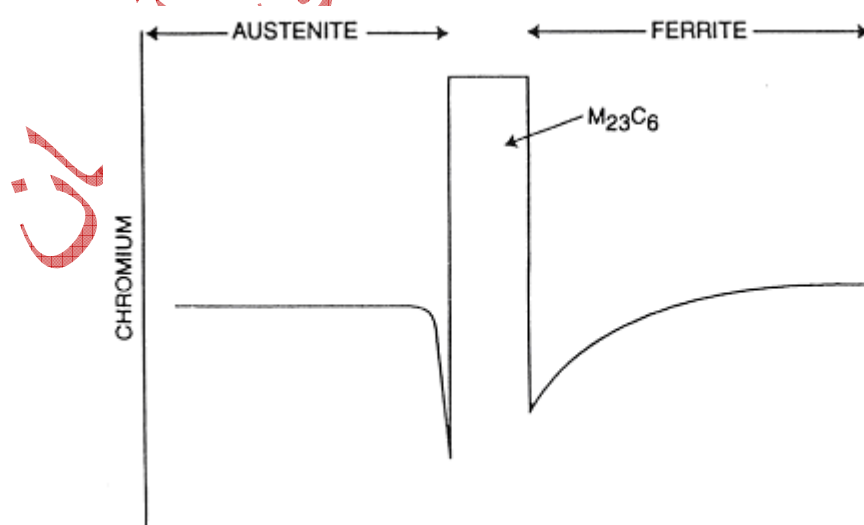


شکل ۱-۱ اثر مقدار نیتروژن بر عمق نفوذ خوردگی بین دانه‌ای در فولادهای زنگ‌نزن حاوی ۱۸ درصد کروم در تست Strauss. درصد کربن در محدوده ۰/۰۲-۰/۰۳ می‌باشد. فولاد در دمای ۱۰۷۵ درجه سانتی‌گراد آنیل و سپس در هوا سرد شده است و بعد در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۱۰۰ ساعت، حساس شده است [۳].

فریت

حضور فریت دلتا در فولادهای زنگ‌نزن اوستنیتی، حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای را کاهش می‌دهد. اگر فولاد، حاوی فریت باشد، رسوب کاربید می‌تواند در طول فصل مشترک فریت-اوستنیت اتفاق بیفتد، همانطوریکه در مرزهای اوستنیت تشکیل می‌شود. اگر تعداد مکانهای رسوب گذاری افزایش یابد، دانسیته رسوب کاربیدها کاهش می‌یابد و تهی شدن کروم با شدت کمتری اتفاق می‌افتد. به علاوه، فریت یک فاز غنی از کروم است و معمولاً به صورت جزایر ایزوله حضور دارد. پس رسوب کاربیدها ترجیحاً در فصل مشترک فریت - اوستنیت اتفاق می‌افتد تا در مکانهای دیگر که در این حالت، تهی شدن کروم باعث بوجود آمدن مسیر پیوسته رسوبات در ماده نمی‌شود [۵].

اثر مثبت فریت در فولادهای زنگ‌نزن اوستنیتی با توجه به شکل ۱-۱۸ قابل تفسیر است. این شکل رشد رسوب کاربید را در فصل مشترک فریت - اوستنیت و پروفیل غلظت کروم در دو فاز را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه نفوذ کروم در فریت حدود ۱۰۰ برابر، سریعتر از نفوذ کروم در اوستنیت است، رشد کاربید در فاز فریت، بسیار سریعتر از اوستنیت است. در نتیجه، یک منطقه تهی از کروم عریض در فاز فریت تشکیل می‌شود با این خصوصیت که تهی شدن کروم در این منطقه، جزئی می‌باشد و به حدی نمی‌رسد که باعث حساس شدن به IGC بشود. از طرف دیگر، یک منطقه تهی شده از کروم بسیار نازک در اوستنیت تشکیل می‌شود و به این علت که منطقه تهی شده در اوستنیت، بسیار نازک است، این منطقه با نفوذ دوباره مقدار کمی کروم، حذف می‌شود. نتیجه اینکه هیچکدام از دو فاز به IGC حساس نمی‌شود [۳].



شکل ۱-۱- نمایش شماتیک پروفیل غلظت کروم در فصل مشترک فریت - اوستنیت حاوی کاربید [۳].

سیارک علمی و پژوهشی آسمان

اندازه دانه

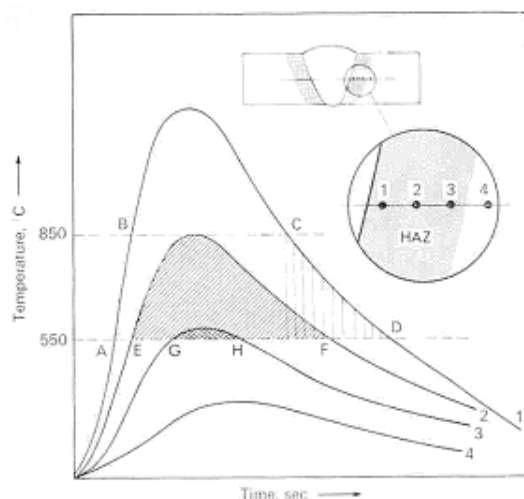
اندازه دانه نیز اثر مهمی بر حساسیت دارد. بزرگ شدن اندازه دانه باعث کاهش مرز دانه می‌شود و این امر اثر معکوس بر رسوب کاربیدها دارد. بدین معنی که رسوبات در مرز دانه‌ها بطور مؤثری افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، وقتی اندازه دانه بزرگ باشد، با روشهای معمولی تست خوردگی بین دانه‌ای که در استانداردها آمده است، نمی‌توان حساسیت به IGC را تشخیص داد. زیرا زمانی را که طبق استاندارد، نمونه را در معرض حمله خوردگی قرار می‌دهیم تا حمله خوردگی بطور کامل دور تا دور دانه اتفاق بیفتد، برای فولاد با دانه‌های بزرگ کافی نخواهد بود [۵].

علمی و پژوهشی آسمان

تاریخچه حرارتی (Thermal History)

هنگام جوشکاری، در هر ناحیه از منطقه HAZ، یک حداکثر زمانی وجود دارد که این ناحیه در محدوده حرارتی ۵۵۰-۸۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است (شکل ۱-۱۹). هر چه این زمان بیشتر باشد، حساسیت به حمله خوردگی بیشتر است، زیرا در این محدوده حرارتی است که تغییرات متالورژیکی مربوط به حساسیت اتفاق می‌افتد. در دماهای بالاتر از حدود ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد، رسوب کاربید چندان رخ نمی‌دهد و با افزایش دما، کاربیدهای موجود در فولاد حل خواهند شد. در دماهای زیر ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد هم کاربیدها آنقدر آهسته تشکیل می‌شوند که چندان مساله نگران کننده‌ای را بوجود نمی‌آورند [۵].

علمی و پژوهشی
آسمان

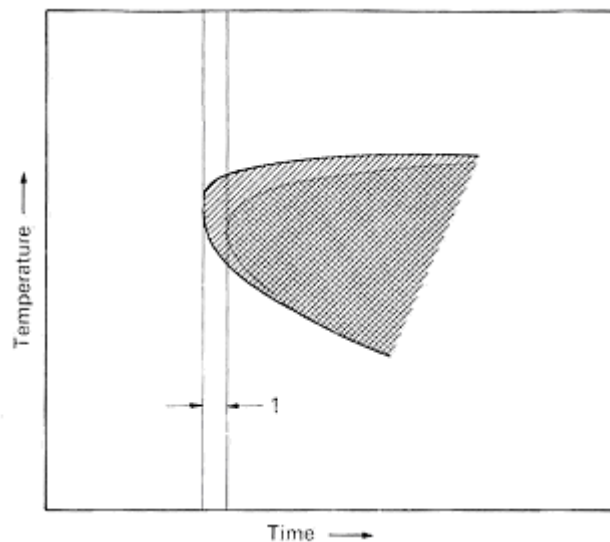


شکل ۱-۱- نمایش شماتیک اثر جوشکاری در وقوع حساسیت به IGC در مناطق مختلف HAZ ۱-
 سیکل حرارتی در HAZ و نزدیک به خط ذوب. اگرچه مقداری حساسیت هنگام حرارت دادن بین نقاط A و B اتفاق می افتد، این حساسیت با عملیات انحلالی که در دمای ماکزیمم اتفاق می افتد (چون دما به بیشتر از ۸۵۰ درجه سانتی گراد می رسد)، حذف می شود. این منطقه از HAZ فقط هنگام سرد شدن بین نقاط C و D حساس می شود. ۲- سیکل حرارتی که در منطقه ای از HAZ اتفاق می افتد که دمای آن حداکثر به ۸۵۰ درجه سانتی گراد می رسد. حساسیت در این منطقه هم هنگام گرم شدن و هم هنگام سرد شدن (بین نقاط E و F) اتفاق می افتد. ۳- سیکل حرارتی در منطقه ای از HAZ که تا زیر دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد ولی تا بالای ۵۵۰ درجه سانتی گراد گرم می شود. حساسیت بین نقاط G و H اتفاق می افتد. ۴- سیکل حرارتی در منطقه ای که تا زیر ۵۵۰ درجه سانتی گراد گرم می شود. هیچ حساسیتی در این منطقه اتفاق نمی افتد [۵].

درجه حرارتی که فولاد در آن قبل از عملیات حساس شدن، آنیل انحلالی (Solution Annealing) شده است نیز در رفتار فولاد در محدوده حرارتی حساس شدن تأثیر گذار است؛ به این ترتیب که افزایش دمای عملیات انحلال (Solution Treatment)، تمایل به افزایش دمایی دارد که در آن حساس شدن بیشترین مقدار است و همچنین تمایل به کاهش زمان حساسیت دارد (شکل ۱-۲۰) [۵].

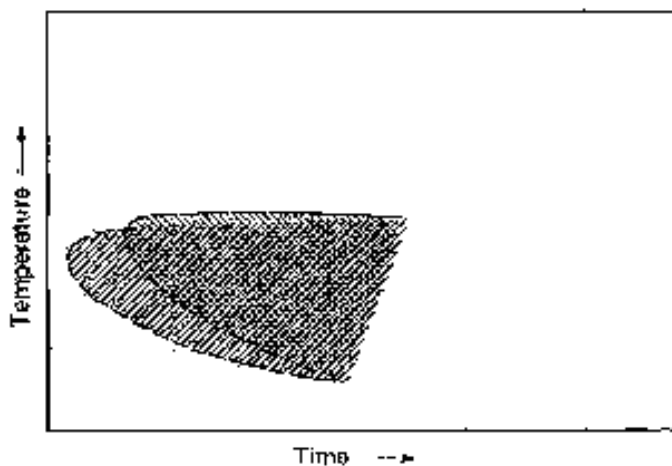
اصولاً "حساسیت در نواحی از جوش برجسته و محسوس است که در آن نواحی، در مدت رسوب یک پاس جوش، عملیات انحلال در دمای بالا اتفاق بیفتد و سپس با پاسهای بعدی جوش، داخل محدوده دمایی حساس شدن قرار بگیرد. اگر چه در عمل، این تقسیم بندی های مناطق مختلف HAZ ضروری

نیست و فقط حداکثر زمان صرف شده در محدوده دمایی حساس شدن است که لازم است در نظر گرفته شود [۵].



شکل ۱-۲- دیاگرام شماتیک که اثر عملیات انحلالی بر روی رفتار حساسیت بعدی را نشان می‌دهد. عملیات انحلالی در دو دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (منحنی بیرونی) و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد (منحنی درونی) انجام شده است [۵].

این نکته قابل ذکر است که فولاد فقط هنگامی به خوردگی بین دانه‌ای حساس می‌شود که یک مسیر پیوسته تهی شده از کروم در نتیجه رسوب کاربیدها تشکیل شود و لازمه این امر، تشکیل یک شبکه نیمه پیوسته از رسوبات کاربیدی است. (شکل ۱-۲۱) [۵].



شکل ۱-۳- دیاگرام شماتیک که نشان می‌دهد حساسیت به IGC فقط هنگامی رخ می‌دهد که به اندازه کافی رسوب کاربیدها اتفاق بیفتد. منحنی پایینی: شروع تشکیل کاربید در مرز دانه‌ها و منحنی بالایی: وقوع حساسیت هنگامی که یک مسیر پیوسته تهی شده از کروم در نتیجه تشکیل رسوبات کاربیدی ایجاد شده است [۵].

حرارت دادن بسیار طولانی مدت در داخل محدوده حرارتی بحرانی باعث می‌شود که کروم به نواحی تهی شده نفوذ کند و نتیجه این امر، حفظ مقاومت به خوردگی فولاد می‌باشد. اگرچه این عملیات حرارتی در حفظ مقاومت به خوردگی مؤثر است ولی در عمل به ندرت بکار گرفته می‌شود [۵].

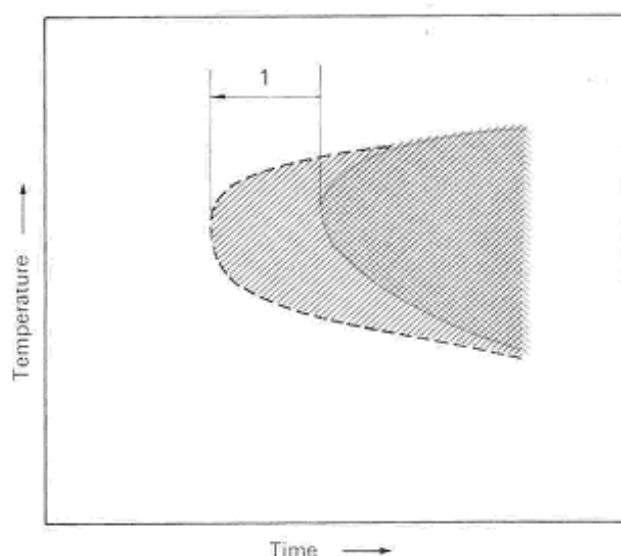
علمی و پژوهشی آسمان

تنش و تغییر شکل پلاستیک

خطر خوردگی بین دانه‌ای به مقدار زیادی از وجود تنش در نتیجه در ۲ مورد زیر تأثیر می‌پذیرد [۵]:

۱- تنش کششی، نرخ نفوذ به مرز دانه توسط محیط خورنده را مخصوصاً در محیط‌های اکسید کننده قوی زیاد می‌کند.

۲- تنش و تغییر شکل پلاستیک اولیه، سرعت رسوب کاربید کروم در مرز دانه را افزایش می‌دهد (شکل ۱-۲۲).



شکل ۱-۱ اثر کار سرد بر عملیات حرارتی که باعث حساسیت می‌شود. روی منحنی سمت چپ، کار سرد انجام شده است. ۱- زمان برای حساسیت کاهش می‌یابد [۵].

به علت این اثرها، حساسیت در طول جوشکاری ممکن است تا ۱۰ برابر از حساسیت با تست‌های خوردگی که در آنها، عملیات حرارتی فلز پایه در شرایط ایزوترمال است، بیشتر باشد. تحقیقات نشان داده است که اثر مخرب کار سرد اولیه در طول ساخت، در درجه دوم اهمیت قرار دارد و عملیات جوشکاری که در آن تنش و سیکل حرارتی توأمان هستند، در درجه اول اهمیت قرار دارد، زیرا تنشهای ناشی از جوشکاری که از انبساط و انقباض در محدوده وسیع حرارتی اتفاق می‌افتد بطور کامل هرگونه تغییر شکل پلاستیک قبل فولاد را از میان می‌برد (تنشهای ناشی از جوشکاری بر هر گونه تغییر شکل پلاستیک قبلی غلبه می‌کند). بنابراین اثر شتاب دهنده سیکل جوشکاری بر روی حساسیت باید شناخته شود و تستهای ارزیابی حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای باید در شرایط واقعی اتصال جوش، انجام شود [۵].

اثر محیط

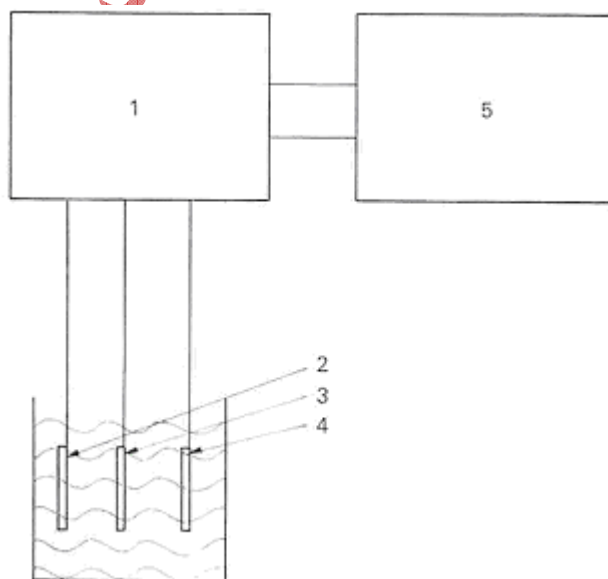
فولادهای زنگ نزن اوستنیتی هنگامی که در محیطهای خورنده مختلف قرار می‌گیرند، رفتارهای مختلفی را نشان می‌دهند. این رفتارها به خوبی توسط خصوصیات پلاریزاسیون این مواد قابل توجیه است بطوریکه اثر محیط در وقوع خوردگی بین دانه‌ای به آسانی شناخته می‌شود. خوردگی یک پدیده الکتروشیمیایی است و هنگامیکه فولاد زنگ نزن در محیط سرویس قرار می‌گیرد، یک پتانسیل در فصل مشترک فولاد و محیط بوجود می‌آید. این پتانسیل به بالانس بین واکنش‌های آندی و کاتدی بستگی دارد. یعنی به بالانس بین سرعتی که الکترون‌ها توسط واکنش آندی خورده شدن یک فلز، آزاد می‌شوند نظیر:



و سرعتی که الکترون‌ها توسط واکنش کاتدی نظیر واکنش زیر، مصرف می‌شوند:



پس پتانسیل بوجود آمده توسط یک فولاد زنگ نزن داده شده در یک محیط مشخص، توسط واکنشهای کاتدی و آندی در آن محیط، تعیین می‌شود [۵]. در آزمایشگاه، این امکان وجود دارد که پتانسیلی که در آن فولاد، خورده می‌شود را کنترل کرد و با تغییر پتانسیل، شرایط محیطی مختلف را شبیه‌سازی نمود. این کار با استفاده از یک پتانسیواستات انجام می‌شود. نمونه در یک محلول مناسب غوطه‌ور می‌شود و پتانسیل خارجی به آن اعمال می‌شود (شکل ۱-۲۳) [۵].

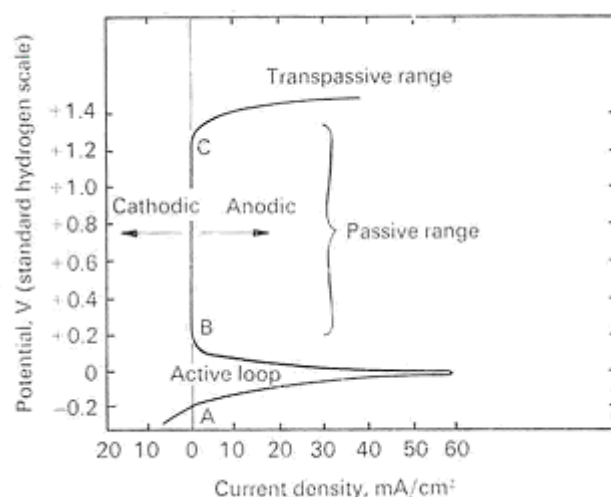


شکل ۱-۱- دستگاه پتانسیواستات. ۱- پتانسیل نمونه را نسبت به الکترو د مرجع ثابت نگه می‌دارد. ۲- جریانی که از نمونه عبور می‌کند. ۳- الکترو د خنثی. ۴- مقیاسی از نرخ خوردگی در پتانسیل مورد نظر [۵].

پتانسیواستات، این پتانسیل را نسبت به یک الکترو د استاندارد، ثابت نگه می‌دارد. فشار جریان نتیجه شده می‌تواند به عنوان مقیاسی از سرعت خوردگی آن پتانسیل در نظر گرفته شود. با تغییر اندازه یا علامت پتانسیل اعمالی، شرایط اکسیدکننده یا احیاکننده دیگر بطور آزمایشی می‌تواند تولید شود [۵].

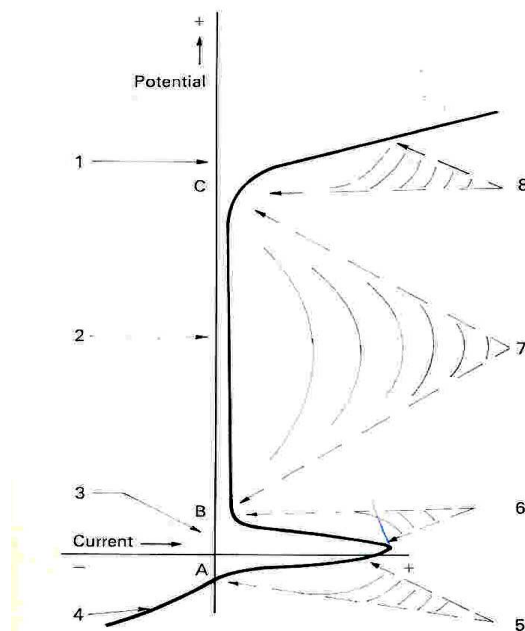
با رسم پتانسیل اعمالی نسبت به جریان خوردگی، یک "منحنی پلاریزاسیون" حاصل می‌شود. این منحنی‌ها به ما نشان می‌دهد که فولاد، هنگامی که در محیط‌های مختلف قرار گرفت، چه رفتاری از خود نشان می‌دهد و نیز برای ما امکان مقایسه مواد مختلف برای استفاده در یک شرایط محیطی خاص را فراهم می‌کند [۵].

نمونه‌هایی از این منحنی‌ها در شکل‌های ۱-۲۴ و ۱-۲۵ در مورد فولادهای زنگ‌زن اوستنیتی نشان داده شده است. در پتانسیل‌های پایین، فولاد بصورت کاتدی است و خورده نمی‌شود. با افزایش پتانسیل که در محیط سرویس با محیط‌های اکسیدکننده حاشیه‌ای (Marginally) مطابقت دارد، فولاد آندی می‌شود و حمله خوردگی اتفاق می‌افتد (بالای نقطه A). بالاتر از یک نقطه مشخص یعنی نقطه B که با محیط اکسیدکننده متوسط (Moderately) مطابقت است، یک فیلم پسیو ثابت، روی سطح فولاد تشکیل می‌شود که در مقابل خوردگی از فولاد محافظت می‌کند (Passive range). در پتانسیل‌های بالاتر که در شرایط محیط‌های اکسیدکننده قوی (Extremely) اتفاق می‌افتد، فیلم پسیو، حل شده و فولاد دوباره خورده می‌شود که با ناحیه Transpassive در شکل ۱-۲۴ مطابقت دارد (نقطه C) [۵].



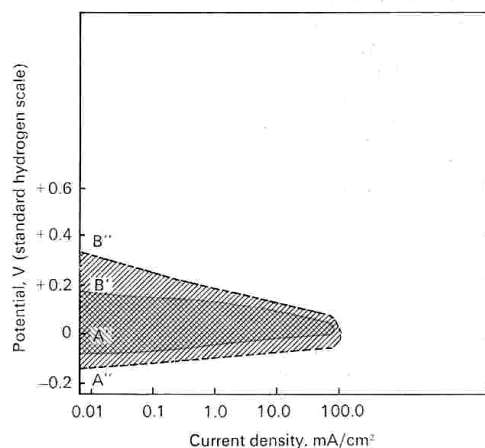
شکل ۱-۲- منحنی Typical پلاریزاسیون برای فولادهای عملیات انحلالی شده ۱۸/۱۰ [۵].

تحت شرایط سرویس دهی نرمال، فولادهای زنگ‌زن در حالت پسیو یعنی بین نقطه B و C در شکل ۱-۲۴ و ۱-۲۵ استفاده می‌شوند اما بنا به دلایلی نظیر تغییر ناگهانی و رندوم در شرایط سرویس و تغییرات در طول Shut down یا Warm up، پتانسیل، ممکن است از محدوده پسیو بودن فولاد فراتر رود و به مناطقی برسد که باعث خورده‌گی فولاد می‌شود. خوردگی بین دانه‌ای مربوط به تشکیل کاربید کروم، فقط در سه رژیم محیطی مجزا اتفاق می‌افتد. معمول‌ترین آن تحت شرایط اکسیدکننده متوسط (Moderately) در اطراف نقطه B است (شکل‌های ۱-۲۴ و ۱-۲۵)، زیرا در نتیجه تشکیل کاربید، مرز دانه‌ها محتوای کروم کمی دارند و نسبت به اطرافشان در پتانسیلهای بالاتری، پسیو می‌شوند. این شرایط در شکل ۱-۲۶ نشان داده شده است و حمله به مرز دانه‌ها را می‌توان در پتانسیلهای بین B' و B'' انتظار داشت [۵].



شکل ۱-۳- منحنی پلاریزاسیون برای فولاد زنگ‌زن که رفتار ماده را در پتانسیل‌های مختلف و شرایط محیطی متناظر با آن را نشان می‌دهد [۵].

- ۱- پتانسیل آنقدر بالاست که فیلم پسیو حل می‌شود.
- ۲- پتانسیل آنقدر بالاست که فیلم پسیو تشکیل می‌شود.
- ۳- پتانسیل آنقدر بالاست که باعث خوردگی شود.
- ۴- پتانسیل پایین است. فولاد کاتدی است و خورده نمی‌شود.
- ۵- شرایط اکسیدکننده ضعیف (Marginally). حمله اتفاق می‌افتد زیرا فیلم پسیو تشکیل نشده است.
- ۶- شرایط اکسیدکننده متوسط (Moderately). اگر پتانسیل تغییر کند ممکن است حمله اتفاق بیفتد.
- ۷- شرایط سرویس نرمال. فیلم پسیو پایدار تشکیل می‌شود و حمله اتفاق نمی‌افتد.
- ۸- شرایط اکسیدکننده قوی حمله، سریع اتفاق می‌افتد.



شکل ۴-۱- وسعت یافتن حلقه پسیو شکل ۲۵ که اثر تهی شدن کروم را نشان می‌دهد. منحنی درونی، ناحیه فعال برای فولاد ۱۸/۱۰ عملیات انحلالی شده. منحنی بیرونی، ناحیه فعال برای فولاد ۱۴/۱۰ فرضی معادل با مرز دانه‌های تهی شده از کروم [۵].

بیشترین گزارشهای خوردگی بین دانه‌ای در پتانسیلهای اکسیدکننده متوسط و در محیط انتقال (Transition) بین ناحیه Active/Passive گزارش شده است (شکل ۱-۲۴ ملاحظه شود). همچنین ممکن است خوردگی بین دانه‌ای به این علت که درصد کروم کم مرز دانه‌ها، پتانسیلی که ماده در آن آندی می‌شود را کاهش می‌دهد (نقاط A'' و A')، اتفاق بیفتد [۵].

اگر چه، حساسیت در این شرایط که شرایط اکسیدکننده ضعیف است، نسبت به حالت قبل از اهمیت کمتری برخوردار است و روشهای جوشکاری که برای اجتناب از خوردگی بین دانه‌ای در نقطه B پیشنهاد خواهد شد، برای این حالت نیز صادق خواهد بود [۵].

خوردگی بین دانه‌ای همچنین ممکن است نزدیک نقطه C در شکل ۱-۲۵ اتفاق بیفتد که منطبق با شرایط اکسیدکننده شدید مانند اسید نیتریک است. محیطهای کمی اینچنین، اکسیدکننده قوی هستند و این حالت عمومی نیست. در این محدوده پتانسیل، خوردگی با مکانیزمی کاملاً متفاوت از آنچه که قبلاً ذکر شد، اتفاق می‌افتد زیرا در شرایط اکسیدکننده قوی، خوردگی نه تنها در تواحی تهی شده از کروم بلکه روی خود کاربیدها هم اتفاق می‌افتد. این تفاوت در طبیعت خوردگی باعث می‌شود که روشهایی که برای اجتناب از خوردگی بین دانه‌ای در محیطهای اکسیدکننده متوسط پیشنهاد می‌شود، برای آنها صادق نباشد [۵].

این نکته قابل ذکر است که در شرایط اکسیدکننده قوی، حتی تثبیت کردن فولاد با تیتانیوم هم برای جلوگیری از IGC ممکن است کافی نباشد. شرایطی که باعث IGC در این محیطها می‌شود، کاملاً به وقوع کاربیدها بستگی ندارد بلکه فیلم پسیو شکسته می‌شود و حمله، آهسته (Sluggish) می‌شود، بطوریکه تعیین تجربی حساسیت مشکل می‌شود و در پتانسیلهای بالاتر، IGC حتی در

فولادهای عملیات انحلالی شده (Solution Treated)، بدون رسوب مرز دانه‌ای رخ می‌دهد. پس تحت شرایط اکسیدکننده قوی، رسوب مقداری کاربید اتفاق می‌افتد و حضور این کاربیدها فقط موقعیت بد را بدتر می‌کند. در شرایط اکسیدکننده قوی، استفاده از مواد ELC پیشنهاد می‌شود [۵].

همانطوریکه از بحث می‌توان نتیجه گرفت، تمام شرایط محیطی باعث خوردگی بین دانه‌ای نمی‌شوند بلکه فقط آنهایی که در آنها خطر شکستگی فیلم پسیو روی فولاد وجود دارد باعث وقوع خوردگی بین دانه‌ای می‌شود. وجود کاربیدهای مرز دانه‌ای به عنوان عاملی برای افزایش محدوده محیط‌هایی که خوردگی در آنها اتفاق می‌افتد، در نظر گرفته می‌شود. در شرایطی که رسوبات زیاد هستند مثل شرایطی که ما عملیات حرارتی ایزوترمال به مدت طولانی در محدوده حرارتی حساس شدن را روی فولاد اعمال کنیم، وقوع حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای در تمام محدوده پسیو ماده امکان پذیر است. این نکته قابل ذکر است که با افزایش درجه حساسیت، پتانسیل‌های بالاتر یعنی بالای نقطه B در شکل ۱-۲۶ یعنی شرایط اکسیدکننده قوی‌تر، در داخل محدوده پسیو لازم است که از پایداری فیلم پسیو روی مرز دانه‌ها اطمینان حاصل کنیم [۵].

IGC در دماهای کاری زیر محدوده حرارتی حساسیت نیز دیده می‌شود که به LTS مشهور است (Low Temperature Sensitization). معمولاً "بعد از سالها سرویس‌دهی در دمای زیر ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. مکانیزم آن به این صورت است که هسته‌های کاربید در طول مرزدانه‌ها در HAZ تشکیل می‌شوند و سپس در طول سرویس‌دهی رشد می‌کنند. برای مقابله با LTS باید یا آلیاژهای تثبیت شده و یا آلیاژهای حاوی مقدار نیتروژن بالاتر (۳۱۶LN) به جای فولادهای L-grade استفاده شوند [۷].

دامنه کاربرد روشهای جوشکاری پیشنهادی

با توجه به اثر جوشکاری در ایجاد حساسیت، روشهای پیشنهادی ذیل در محیطهایی با شرایط اکسیدکننده متوسط و حاشیه‌ای قابل کاربرد است. زیرا این شرایط معمول‌ترین کاربردهای عملی را دارا می‌باشند. در این موقعیتها، استفاده از فولاد با درصد کربن حداکثر ۰/۰۶ درصد معمولاً برای اجتناب از خوردگی بین دانه‌ای کافی می‌باشند. در صورتیکه در شرایط اکسیدکننده قوی، فولاد ELC ترجیح داده می‌شود. روشهای پیشنهادی برای جوشکاری که در ذیل آمده است مربوط به فولادهای با درصد کروم ۱۸ درصد و نیکل ۱۰ درصد ساده می‌باشد و اگر درصد عناصر Si, Mn, Ni, Cr در فولادی متفاوت باشد ولی جزو فولادهای با درصد کروم ۱۸ درصد و نیکل ۱۰ درصد محسوب شود، روشهای پیشنهادی برای این فولادها نیز قابل کاربرد است. همچنین این روشها برای آلیاژهای با ۱۸ درصد کروم، ۱۰ درصد نیکل و ۳ درصد مولیبدن نیز قابل کاربرد است ولی در این باره مطالعات جامع به عمل نیامده و استفاده از این روشها برای این فولادها احتیاج به یک سری ملاحظات و احتیاطهای ایمنی دارد [۵].

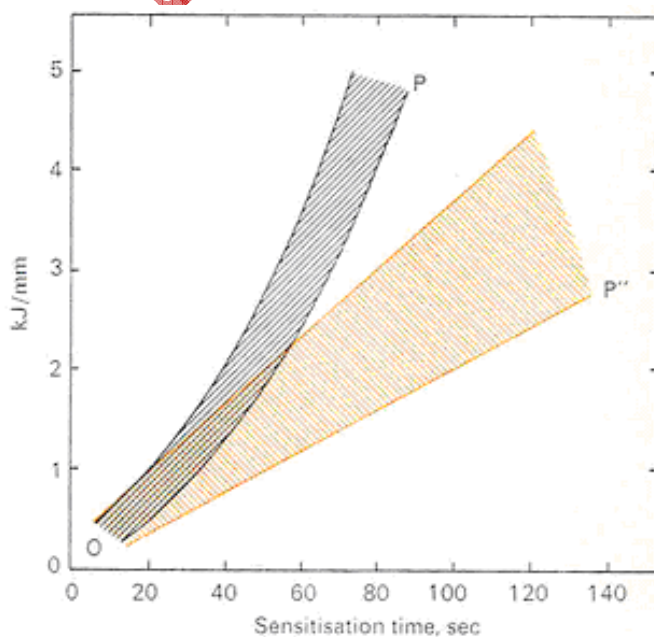
برای تعیین روش جوشکاری مناسبی که باعث خوردگی بین دانه‌ای نشود، دانستن سه نکته زیر ضروری است [۵]:

- ۱- اثر سیکل جوشکاری بر رسوب کاربیدها و ایجاد حساسیت، باید ارزیابی شود.
- ۲- محدوده پتانسیلی که در آن IGC در نتیجه حساسیت رخ می‌دهد، باید معلوم شود.
- ۳- داده‌های پتانسیواستاتیک، باید به رفتار سرویس فلز جوش ارتباط داده شود.

اثر فرایند جوشکاری و شرایط جوشکاری در وقوع حساسیت

اثر برجسته عملیات جوشکاری، بالا بردن دمای منطقه HAZ به داخل محدوده حرارتی حساسیت می‌باشد و به عنوان یک قاعده کلی، دما و زمان حساسیت تا اندازه ممکن باید کاهش یابد. در نتیجه، کاهش انرژی جوش می‌تواند مفید باشد. رابطه بین انرژی جوش و حداکثر زمانی که هر قسمت از HAZ در محدوده حرارتی حساسیت یعنی ۵۵۰-۸۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد برای تعدادی از فرایندها ارزیابی شده است و مطابق شکل ۱-۲، این نتیجه حاصل شده است که یک وابستگی مستقیم بین انرژی جوش و حداکثر زمان حساسیت وجود دارد. حتی اگر این پارامتر زمانی تا حدی دلخواه باشد شکل ۱-۲ به این معنی است که یک معیار به نام انرژی جوش می‌تواند برای ارزیابی احتمال حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای در اتصالات جوش در فولادهای زنگ‌نزن اوستنیتی به کار برود. به علاوه احتیاج به داخل کردن فاکتور بازدهی هیچ فرایندی به این معیار نیست. شکل ۱-۲ برای فرایندهای MMA، TIG، Pulsed MIG، SAW، EBW کاربرد دارد [۵].

در اصل، Heat Sink نزدیک جوش، بر خطر خوردگی بین دانه‌ای تأثیر می‌گذارد. داده‌های شکل ۲-۱ برای یک نمونه اتصال لب‌به‌لب بدست آمده است. بنابراین برای اتصالات دیگر نظیر اتصال Fillet هم می‌تواند بکار برود و محافظه‌کارانه است؛ زیرا این اتصالات Heat Sink بیشتر و در نتیجه سرعت سرد شدن بیشتر و زمان حساسیت کمتری نسبت به اتصال لب‌به‌لب دارند [۵].



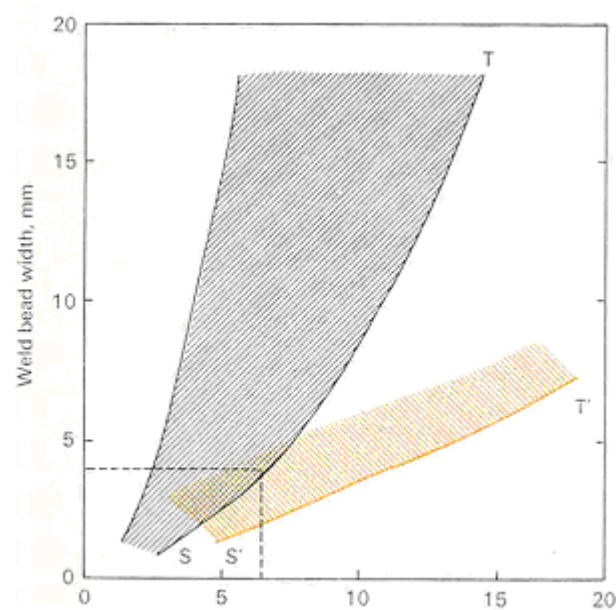
شکل ۱-۱۰- رابطه بین انرژی جوش و ماکزیمم زمانی که HAZ بین دماهای ۵۵۰ و ۸۵۰ درجه سانتی گراد قرار می گیرد. محدوده پایینی برای دمای بین پاسی ۱۰۰ درجه سانتی گراد و محدوده بالایی برای دمای اتاق [۵].

بطور مشابه، یک پاس جوش با یک انرژی جوش مشخص، حساسیت کمتری در یک ورق ضخیم نسبت به یک ورق نازک ایجاد می کند. این مسأله در شکل ۲-۱ در نظر گرفته شده و برای فولاد با ضخامت ۳ تا ۱۶ میلی متر می باشد. اگر ضخامت فولاد نازکتر باشد، ناحیه، به سمت راست حرکت می کند [۵].

با استفاده از شرایط مرزی نشان داده شده توسط خطوط OP و OP'' ، مقداری که اتصال به خوردگی بین دانه های حساس می شود، می تواند با در نظر گرفتن یک حد محافظه کارانه فقط به انرژی جوش ربط داده شود و دیگر احتیاجی نیست که Heat Sink اتصال را هم در نظر بگیریم [۵].

بسیاری از سازه ها از جوشهای چند پاسه بوجود آمده اند و در این حالت، در حساسیت به خوردگی بین دانه ای، بیش از یک پاس سهیم اند که همه آنها باید در نظر گرفته شوند. چون حداکثر زمان قرار گرفتن HAZ بین ۸۵۰ - ۵۵۰ درجه سانتی گراد مستقیماً به انرژی جوش بستگی دارد، حداکثر زمانی که در آن حساسیت اتفاق می افتد، می تواند بر حسب یک انرژی جوش جمعی (Accumulative) پاسهای جوش، توصیف شود. حال این نکته مطرح است که چند تا از این پاسها بر حساسیت یک ناحیه مورد نظر در HAZ به خوردگی بین دانه ای اثر می گذارند. شکل ۲-۲ ما را در بررسی اثر پاسهای دیگر راهنمایی می کند. در این شکل، فاصله ایزوترم ۵۵۰ درجه سانتی گراد از خط ذوب (یعنی حداکثر فاصله ای از جوش که در آن خوردگی بین دانه ای می تواند اتفاق بیفتد) در مقابل عرض بستر جوش، به عنوان پارامتری که به آسانی می تواند دیده شود، رسم شده است. این شکل، برای همان محدوده ضخامت و فرایندهای مربوط به شکل ۲-۱ رسم شده است. همانطوریکه ملاحظه می شود، حداکثر عرضی از فولاد که می تواند حساس شود، در هر طرف جوش حدوداً "مساوی عرض بستر جوش می باشد (یعنی همان خط ST).

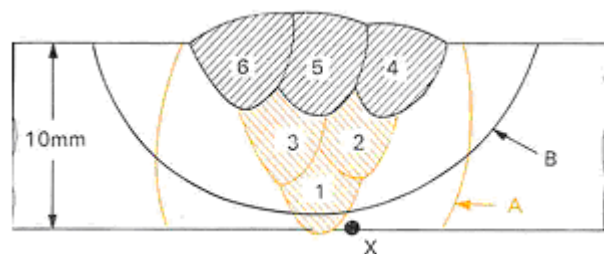
برای نشان دادن این روش برای ارزیابی اثر حساس کنندگی جوشهای چند پاسه، شکل ۲-۳، یک جوش لب به لب در مخزنی از جنس فولاد زنگ نزن با ضخامت دیواره ۱۰ میلی متر را نشان می دهد. ابتدا باید تعیین کرد که چند پاس، در حساسیت دیواره بیرونی که در تماس با محیط سرویس است، یعنی نقطه X، اثر دارند. عرض بستر جوش تقریباً ۴ میلی متر است. با دنبال کردن خط چین در شکل ۲-۲ مشاهده می شود که خط ایزوترم ۵۵۰ درجه سانتی گراد، در ۶ میلیمتری خط ذوب قرار می گیرد. پس نتیجه می گیریم که فقط پاسهای ۱، ۲ و ۳ باعث می شوند که نقطه مورد نظر، در محدوده دمایی حساسیت قرار بگیرد. انرژی جوش برای هر پاس محاسبه می شود و Total Sensivity Heat Input این پاسها بدست می آید [۵].



سیلین

Distance of ۵۵۰ °C isotherm from fusion boundary, mm

شکل ۲-۰- رابطه بین عرض بستر جوش و ماکزیمم فاصله‌ای از جوش که خوردگی بین دانه‌ای می‌تواند اتفاق بیفتد. محدوده بالایی برای شرایط جوشکاری معمولی با دمای بین پاسی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و محدوده پایینی برای پاسهای Cosmetic با استفاده از فرایند TIG در ورق‌های نازک [۵].



شکل ۳-۰- نمونه‌ای از یک اتصال لب‌به‌لب که پاسهای جوشی که باعث حساسیت در نقطه X می‌شود را نشان می‌دهد [۵]. A: ایزوترم ۵۵۰C برای پاسهای ۱، ۲ و B.۳: ایزوترم ۵۵۰C برای پاسهای ۴، ۵ و ۶.

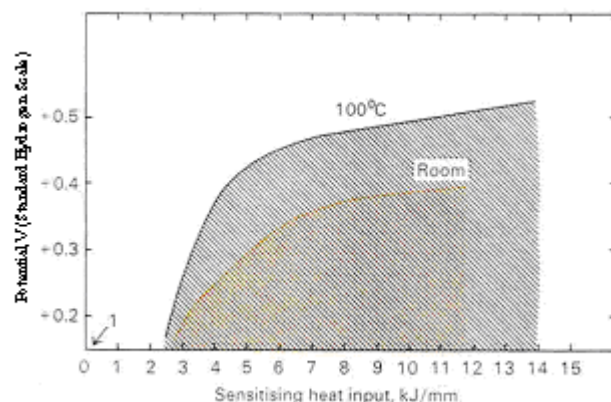
هرچند این Approach بسیار ساده است، حساسیت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، بسیار آهسته اتفاق می‌افتد و بنا براین روش، محافظه‌کارانه است [۵]. یک اصلاح کوچک باید در شکل ۲-۲ انجام شود. پاسهای Cosmetic معمولاً با استفاده از فرایند TIG بدون استفاده از فیلر یا با استفاده از فیلر به مقدار کم، انجام می‌شود. در این حالت، سرعت جوشکاری خیلی کم و انرژی جوش از مقدار پیش‌بینی شده بالاتر است، مخصوصاً در ورقهای نازک. در این موقعیتها، ایزوترم ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند ۲ یا ۳ برابر عرض بستر جوش باشد و پیشنهاد می‌شود که خط $S'T'$ به جای خط ST استفاده شود. اگرچه این اثر، اهمیت عملی چندانی ندارد؛ زیرا انرژی جوش در این شرایط هنوز هم در مقایسه با مثلاً "روش SAW نسبتاً" کمتر است و احتمال کمی برای وقوع خوردگی بین دانه‌ای در سرویس وجود دارد [۵].

دو نکته دیگر باید برای تعیین مقدار حساسیت با عملیات جوشکاری در نظر گرفته شود. اول اینکه همانطوریکه نشان داده شد، تغییر شکل پلاستیک اولیه فولاد نظیر آنچه در عملیات شکل دهی سرد انجام می‌شود، اثر مهمی بر روی حساسیت در طول جوشکاری ندارد و دوم اینکه در جوشکاری چند پاسه ممکن است در شرایطی، حرارت دادن بین پاسها در دمایی بالاتر از دمای اتاق انجام شود. با توجه به شکل ۱-۲، جایی که زمان حساسیت با دمای بین پاسی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، اندازه‌گیری می‌شود، مجازیم که زمان حساسیت را به انرژی جوش ربط بدهیم. این نکته قابل ذکر است که در انرژی جوشهای کم، در جوشکاری فولادها تا ضخامت حداکثر ۶ میلی‌متر، دمای بین پاسی تأثیر چندانی در زمان حساسیت ندارد. ولی در انرژی جوشهای بالاتر، دمای بین پاسی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر زمان حساسیت داشته باشد. اگرچه دمای بین پاسی اثر چندانی در حداکثر عرض منطقه HAZ که تا بالای دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، حرارت داده می‌شود، ندارد [۵].

رابطه بین انرژی جوش حساس کننده و حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای

با افزایش انرژی جوش (Heat Input) و زمان حساس شدن مربوط به آن، تهی شدن کروم افزایش خواهد یافت و در فولاد های عملیات انحلالی شده، خوردگی بین دانه‌ای می‌تواند در محدوده عریض‌تری از پتانسیل بالای پتانسیل ناحیه انتقال Active/Passive رخ دهد. رابطه بین محدوده پتانسیلی که خوردگی بین دانه‌ای می‌تواند اتفاق بیفتد و انرژی جوش حساس کننده در جوشکاری در شکل ۲-۴ نشان داده شده است [۵].

ناحیه بدست آمده از داده‌های تجربی برای دماهای بین پاسی معمولی (دمای اتاق) و دمای بین پاسی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، داده شده است. برای هر دو دمای بین پاسی، تا انرژی جوش حداکثر Kj/mm ۲/۵، هیچ حساسیت قابل تشخیصی وجود ندارد و رفتار خوردگی HAZ، با رفتار خوردگی فلز پایه عملیات انحلالی شده برابر است. بنابراین فولاد با ضخامت حداکثر ۶ میلی‌متر، می‌تواند بدون خطر خوردگی بین دانه‌ای جوشکاری شود.



شکل ۱۰-۱- رابطه بین انرژی جوش حساس کننده و پتانسیلی که در زیر آن ممکن است خوردگی بین دانه‌ای رخ دهد برای دمای اتاق و دمای بین پاسی ۱۰۰ C. نقطه ۱- حلقه فعال (Active Loop) و خوردگی عمومی در زیر این پتانسیل اتفاق می‌افتد. شکل ۲۴ ملاحظه شود [۵].

بالای این انرژی جوش Total، ممکن است مقداری حساسیت اتفاق بیفتد. بعید است که آلیاژهای ساده ۱۸/۱۰ در پتانسیلی کمتر از 0.5 V بالای پتانسیل انتقالی Active/Passive بکار بروند. اگر محیط سرویس‌دهی در این بازه باشد، تغییراتی که مثلاً "Warm Up یا Shut Down

اتفاق می‌افتد، باعث می‌شود که پتانسیل در قسمت Active قرار بگیرد که در این حالت، نرخ خوردگی بطور غیر قابل قبولی بالا خواهد بود. در این محیط‌ها، فولاد با ترکیب Typical محتوی $18\text{Cr}, 10\text{Ni}, 3\text{Mo}$ باید به جای فولاد با ترکیب حاوی $18\text{Cr}, 10\text{Ni}$ بکار برود. با این تغییر، هر گونه حساسیت مشاهده شده در پتانسیل حدود 0.05 V ، اهمیتی نخواهد داشت. بر این اساس، جوشها می‌توانند با دمای بین پاسی برابر با دمای اتاق حداکثر تا انرژی جوش $3/2\text{ KJ/mm}$ و با دمای بین پاسی 100 درجه سانتی‌گراد حداکثر تا انرژی جوش $2/7\text{ KJ/mm}$ انجام شوند. بالاتر از این انرژی جوش‌های ذکر شده، مقداری حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای باید پیشبینی شود و با افزایش انرژی جوش، حساسیت بیشتر خواهد شد و خطر وقوع خوردگی بین دانه‌ای HAZ باید در نظر گرفته شود. محدوده پتانسیلی که در آن خوردگی می‌تواند اتفاق بیفتد، با دمای بین پاسی 100 درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای بین پاسی با دمای اتاق، عریض‌تر است و نیز احتمال وقوع خوردگی بین دانه‌ای در سرویس، بیشتر است [۵].

خوردگی KLA در فولادهای زنگ‌زن تثبیت شده

تجربه استفاده از فولادهای تثبیت شده به مدت بیشتر از ۳۰ سال نشان داده است که با استفاده از این فولادها، می‌توان از وقوع خوردگی بین دانه‌ای در نزدیکی یک اتصال جوشکاری شده جلوگیری کرد. اما تحقیقات نشان داده است که فولادهای تثبیت شده نیز می‌توانند با حمله خوردگی بسیار موضعی در مرز بین فلز جوش و فلز پایه، تخریب شوند. مخصوصاً "تحت شرایطی که یک عملیات حرارتی دو مرحله‌ای روی فولاد انجام شود. این عملیات شامل حرارت دادن (Superheating) در محدوده حرارتی Solidus و به دنبال آن، حرارت دادن در محدوده حرارتی بحرانی ($500-900^{\circ}\text{C}$) می‌باشد. این نوع عملیات حرارتی معمولاً "هنگام جوشکاری و عملیات تنش‌زدایی بعد از آن می‌تواند اتفاق بیفتد. خوردگی ناشی از این نوع عملیات حرارتی به Knife Line Attack (KLA) مشهور است. این نوع خوردگی با Weld Decay که در فولادهای تثبیت نشده اتفاق می‌افتد، فرق دارد. KLA در فولادهای Fe-Cr-Ni تثبیت شده با تیتانیوم یا نیوبیوم و عمدتاً "در محیط‌های حاوی اسید نیتریک یا محیط‌های اکسید کننده دیگر اتفاق می‌افتد نمونه‌هایی از خوردگی بین دانه‌ای و KLA در شکل ۱-۳ و ۲-۳ آمده است [۸].

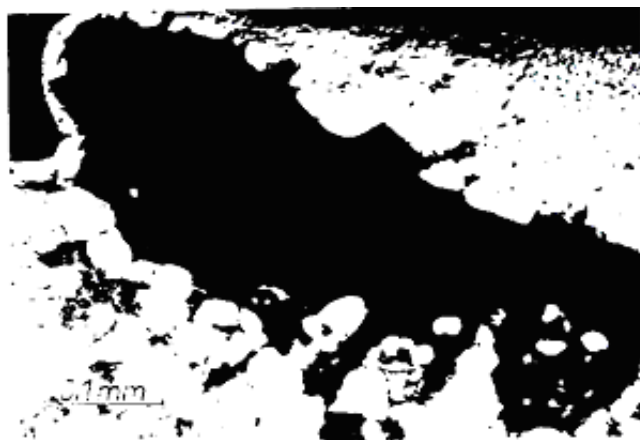
همانطوریکه گفته شد KLA با خوردگی بین دانه‌ای کلاسیک که در فولادهای تثبیت نشده اتفاق می‌افتد، متفاوت است و می‌تواند در فولادهایی که به خوردگی بین دانه‌ای حساس نیستند اتفاق بیفتد. حتی در جائیکه حمله خوردگی به رسوب کاربید کروم در محدوده حرارتی بحرانی مربوط نمی‌شود. دلایل دیگر این حساسیت که در مرز دانه اتفاق می‌افتد، می‌تواند تولید فازهای بسیار فعال نظیر کاربید تیتانیوم و یا محصولات تجزیه فریت (که شامل فاز سیکما است) باشد. بنابراین KLA نسبت به خوردگی بین دانه‌ای به محدوده وسیع‌تری از تغییرات ترکیبی موضعی در مرز دانه‌ها مربوط می‌شود [۸].

خصوصیات KLA

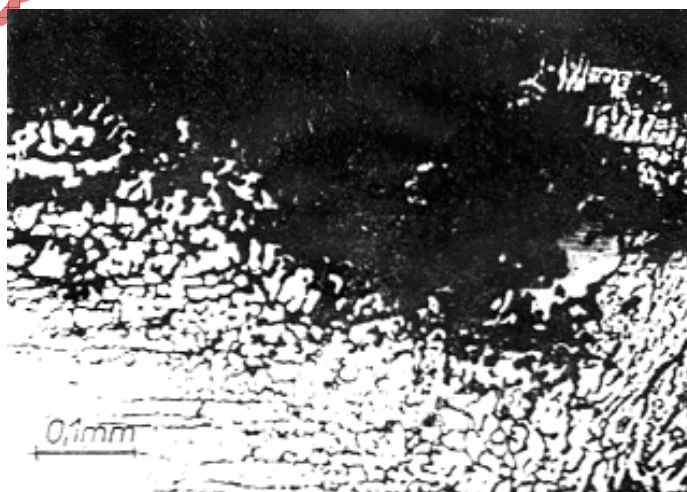
واضحترین خصوصیت مربوط به KLA عملیات حرارتی دوگانه‌ای است که روی فولاد مورد نظر انجام می‌شود. این عملیات به شرح زیر است [۸]:

۱- حرارت دادن اولیه تا محدوده حرارتی Solidus

۲- حرارت دادن ثانویه در محدوده حرارتی بحرانی $500-900^{\circ}\text{C}$



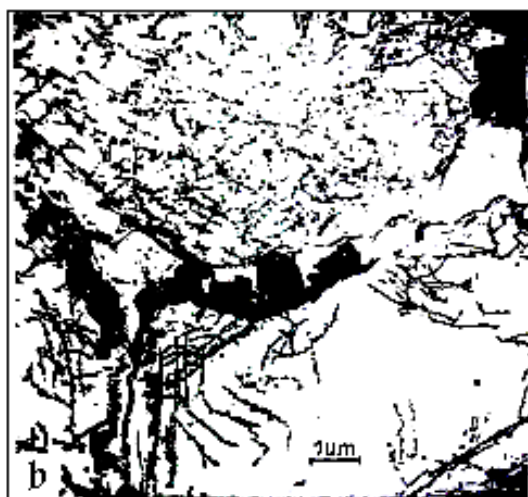
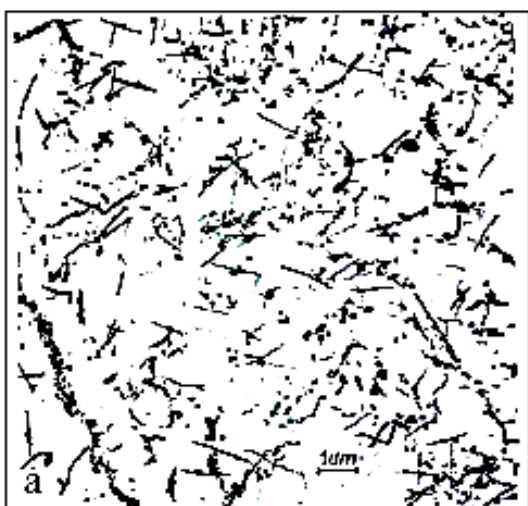
شکل ۱-۰- خوردگی بین دانه‌ای یک اتصال جوشکاری شده از جنس Fe-۱۸ Cr-۱۰Ni-Ti در ناحیه چسبیده به فلز جوش پس از انجام تست استاندارد و انجام تست خمش به اندازه ۱۰ درجه. اچ الکترولیتی در اسید اگزالیک ۱۰٪ [۸].



شکل ۲-۰ KLA در فولاد Fe-۱۸Cr-۹Ni-Ti در یک اتصال جوشکاری شده. تست در محلول اسید نیتریک ۶۵٪ به مدت ۴۸ × ۳. نمونه اچ نشده است [۸].

عملیات قسمت ۱ باعث حل شدن کاربیدهای عناصر تثبیت کننده می شود. سپس تحت شرایط معینی از نرخ سرد کردن، کاربیدهای عناصر تثبیت کننده نمی توانند دوباره تشکیل شوند. در عملیات قسمت ۲، کاربید کروم رسوب کرده و در مناطقی، درصد کروم به کمتر از مقدار لازم برای محافظت از حمله خوردگی می رسد [۸].

در حالتی که حساسی کردن فولادهای تثبیت شده در بازه زمانی بیشتر و دماهای بالاتر انجام شود، کاربیدهای عناصر تثبیت کننده ممکن است حتی در خود دانه ها هم رسوب کنند. این حالت در شکل ۳-۳ نشان داده شده است [۸].



شکل ۳-۰ Collodium Extraction Replica. a: فولاد تثبیت شده Fe-۱۸Cr-۹Ni-Ti که تا دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت Superheat شده و بعد در آب کوئنچ شده است. سپس، به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد آنیل شده است. b: فولاد Fe-۱۸Cr-۹Ni-۲Nb که تا دمای ۱۳۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ دقیقه Superheat شده و بعد در آب کوئنچ شده است. سپس به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد آنیل شده است [۸].

پدیده KLA فرایند پیچیده‌تری نسبت به رسوب کردن ترجیحی کاربیدهای کروم می‌باشد. در حقیقت، نکته مهم در KLA به یک فرایند Dehomogenization مربوط می‌شود که در دماهای بالا اتفاق می‌افتد. این فرایند منجر به تشکیل فازهایی در طول مرز دانه‌ها می‌شود که حل شدن دوباره آنها به کندی صورت می‌گیرد. در اثبات این گفته مشخص شده است که می‌توان از خوردگی بین دانه‌ای ناشی از رسوب کاربید کروم، به آسانی با عملیات حرارتی Stabilizing در محدوده حرارتی $850-900^{\circ}\text{C}$ جلوگیری کرد، ولی حساسیت به KLA در اسید نیتریک با این عملیات از بین نمی‌رود و عملیات حرارتی کوتاه مدت در محدوده حرارتی $950-1100^{\circ}\text{C}$ برای مدت ۲ ساعت و به دنبال آن کوئنچ کردن در آب لازم است. این عملیات برای حالت‌هایی انجام می‌شود که درصد فریت در فولاد کم باشد [۸].

بطور خلاصه، شرایطی که از حساسیت معمولی (خوردگی بین دانه‌ای) جلوگیری می‌کند، از KLA جلوگیری نمی‌کند. ۲ فاکتور اضافی زیر باعث می‌شود که وقوع KLA تشویق شود [۸]:

۱- حل شدن کاربیدهای Ti و Nb در نزدیکی مرز دانه‌ها، غلظت نسبتاً زیاد کربن با یک فاصله نفوذ کم را فراهم می‌کند. این امر، رسوب کاربید کروم و در نتیجه، حساسیت را تسهیل می‌کند [۸].

۲- وجود چند فاز، مخصوصاً "فریت و اوستنیت که قابلیت انحلال مختلفی از عناصر را دارند، باعث می‌شود کربن در اوستنیت و تیتانیوم در فریت تجمع کنند. این امر باعث می‌شود که اثر تثبیت کنندگی تیتانیوم کاهش یابد و تیتانیوم کمتری برای تشکیل کاربید در دسترس باشد [۸].

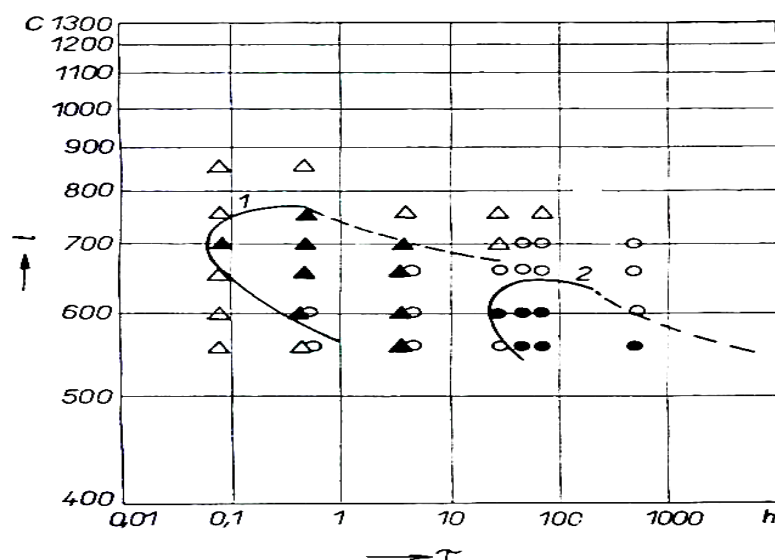
همچنین مشخص شده است که KLA ممکن است تا حدی با Stress Corrosion مربوط باشد که در این حالت، KLA در شرایطی که تنش وجود دارد، اتفاق می‌افتد. این مطلب به این معنی است که KLA نتیجه ترکیب نواحی مستعد (که در آنها ترکیب شیمیایی بطور عمده تغییر کرده است) با تنش ناشی از جوشکاری می‌باشد. حال این نکته که آیا در نبود تنش، KLA اتفاق می‌افتد یا نه، هنوز به درستی مشخص نشده است [۸].

با توجه به نقش بحرانی کربن در وقوع KLA این پدیده می‌تواند با تغییر ترکیب شیمیایی مواد جوشکاری، کاهش یافته یا جلوگیری شود. بنابراین، یک الکتروود کم کربن می‌تواند استفاده شود و یا عناصر فریت‌زا در جوش نظیر Si و V می‌تواند افزایش یابد [۸].

آنالیز دلایل KLA

واضح‌ترین تعریف از مسأله KLA و اهمیت مرحله اول حرارت دادن (Initial Superheating) در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است. برای مرحله اول حرارت دادن، ۲ دمای مختلف در نظر گرفته شده است. یک دما نسبتاً بالا می‌باشد (حدود 1320°C) و نمونه‌ها پس از قرار گرفتن در این دما به مدت ۳۰ دقیقه، در آب کوئنچ شده‌اند. دمای دوم استفاده شده، 1050°C می‌باشد و نمونه‌ها مانند نمونه‌های سری اول، پس از حرارت دیدن به مدت ۳۰ دقیقه، در آب کوئنچ شده‌اند [۸].

در حالت اول (یعنی هنگامی که دمای حرارت دیدن اولیه 1320°C بود) هنگامی که نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی ثانویه در دمای حساس کردن قرار می‌گیرند، حمله خوردگی بین دانه‌ای به راحتی در آنها اتفاق می‌افتد. اما برای حالت دوم (دمای عملیات حرارتی اولیه 1050°C)، هنگامی که نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی ثانویه قرار می‌گیرند، حساسیت چندانی در آنها رخ نمی‌دهد [۸].



شکل ۱-۰- اثر Superheating اولیه بر وقوع حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای. منحنی ۱- دمای عملیات حرارتی اولیه، 1320°C درجه سانتی‌گراد و منحنی ۲- دمای عملیات حرارتی اولیه، 1050°C درجه سانتی‌گراد [۸].

حال، این سؤال به ذهن خطور می‌کند که علت این اتفاق چیست و سؤال دیگر اینکه چرا در همه اتصالات جوشکاری شده از جنس فولادهای تثبیت شده، هنگامی که تحت عملیات حرارتی دو

مرحله‌ای قرار می‌گیرند، KLA رخ نمی‌دهد.

برای تشریح این مطلب، احتیاج به در نظر گرفتن فرایندهای پیچیده‌ای نظیر تجزیه فریت، تشکیل فاز سیگما به همراه رسوب کربن، حضور تنش و نوع محیط خورنده، می‌باشد. برای بررسی KLA، می‌توان دو حالت زیر را در نظر گرفت [۸]:

۱- هنگامی که درصد کربن نسبتاً پایین است.

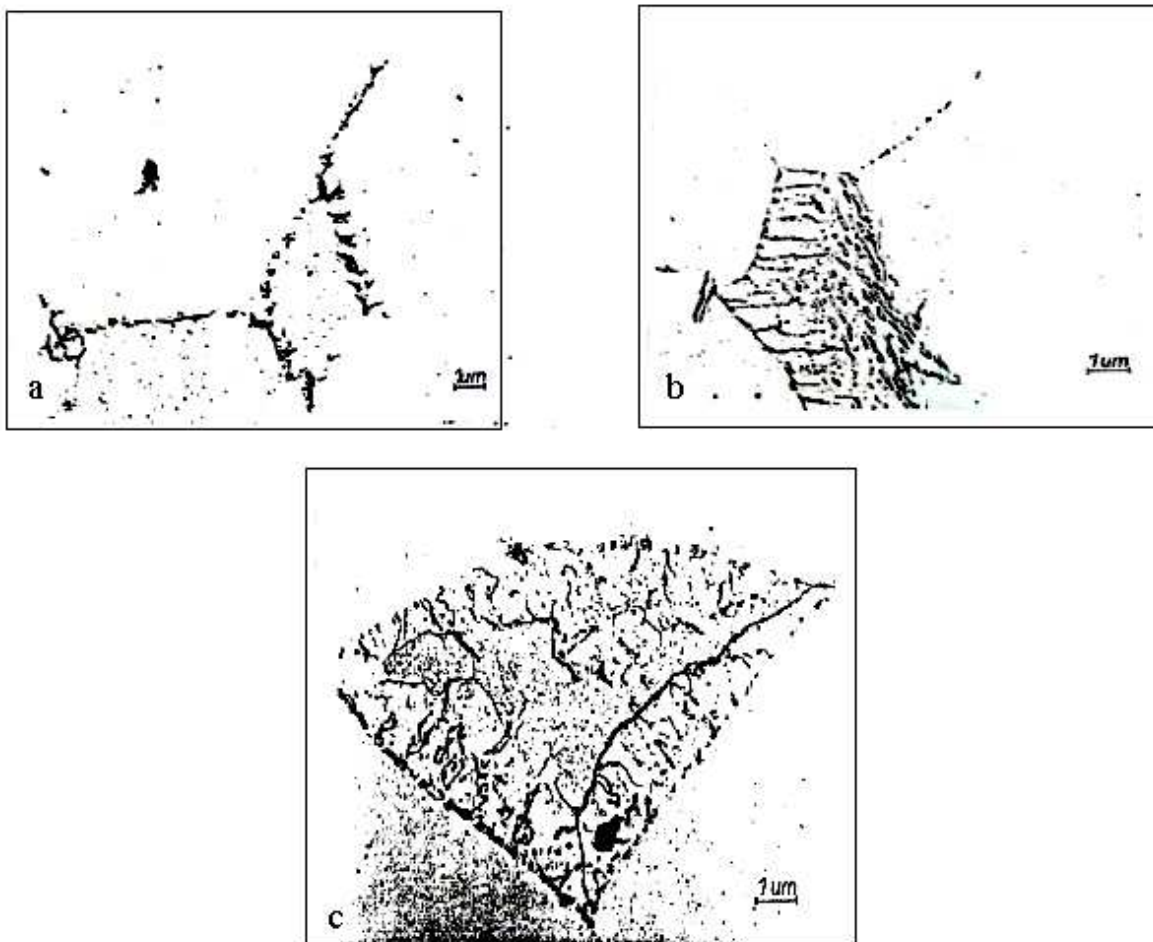
۲- هنگامی که درصد کربن حداکثر ۰/۰۶ درصد می‌باشد.

اگر درصد کربن فولاد پایین باشد، KLA، بطور پراکنده اتفاق می‌افتد. در حالتی که درصد کربن کم باشد و در فولاد عناصر تثبیت کننده اضافی وجود داشته باشد، علی‌رغم اندرکنش عناصر تثبیت کننده با کربید، به مقدار کافی عنصر تثبیت کننده باقی می‌ماند تا با کربن موجود ترکیب شود و از رسوب کربید کروم جلوگیری کند. پس در این حالت کروم در نواحی مرز دانه‌ها، بطور جدی و خطرناک، تهی نمی‌شود [۸]. در حالتی که عناصر تثبیت کننده، ترکیبات دیگری تشکیل می‌دهند، مثلاً با گوگرد، اکسیژن و نیتروژن ترکیب می‌شوند، ضروری است که مقدار بیشتری عنصر تثبیت کننده به فولاد اضافه کنیم. در فولادهای کم کربن، نسبت تیتانیوم به کربن باید در حدود ۶ به ۱ باشد. و برای فولاد با ۰/۰۶ درصد کربن، نسبت تیتانیوم به کربن باید در رنج ۶ تا ۸ به ۱ باشد. نسبت‌های بیشتر از ۸ به ۱ برای تیتانیوم به کربن و ۱۲ به ۱ برای نیوبیوم به کربن مفید نیست؛ زیرا این عناصر، تثبیت کننده فریت‌اند. در نتیجه افزایش آنها باعث افزایش درصد فریت در فولاد می‌شود و با افزایش درصد فریت، فاز سیگمای بیشتری می‌تواند بوجود بیاید که فاز مضر می‌باشد و می‌تواند باعث وقوع خوردگی بین دانه‌ای بشود [۸].

هنگامی که درصد عناصر تثبیت کننده تیتانیوم و نیوبیوم نسبت به کربن بالاست، حمله خوردگی KLA می‌تواند اتفاق بیفتد که مربوط به تشکیل فاز سیگما می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که پس از آنیل در دمای حدود 750°C و در محیطی که باعث خوردگی در حالت ترانس پسیو (شکل ۱-۲۴ ملاحظه شود) می‌شود، KLA به مقدار زیادی مشاهده شده است. فاز سیگما بطور مخصوص در ناحیه ترانس پسیو ظاهر می‌شود. وجود فریت اضافی که در نتیجه غلظت زیاد عناصر تثبیت کننده می‌باشد، باعث تشکیل سریع فاز سیگما در محدوده حرارتی حساس کردن می‌شود. هسته‌گذاری تجزیه اولیه فریت به فاز سیگما، روی فصل مشترک فریت - اوستنیت اتفاق می‌افتد. بعد از آن، ادامه واکنش در داخل فاز فریت اتفاق می‌افتد تا اینکه تمام دانه فریت مصرف می‌شود. ساختاری که در نهایت بوجود می‌آید، شامل فاز سیگمای لایه‌ای (Lamellar sigma phase) و اوستنیت ثانویه می‌باشد [۸].

تمام فرایند فوق به نفوذ کربن از فریت به سمت فاز سیگمای در حال رشد مربوط می‌شود. بنابراین، با این تغییر ساختار، یک تغییر در ترکیب شیمیایی موضعی اتفاق می‌افتد که در شکل ۳-۵ نشان داده

شده است. شکل ۳۵ اندرکنش بین عملیات حرارتی و محیط را نشان می‌دهد [۸].



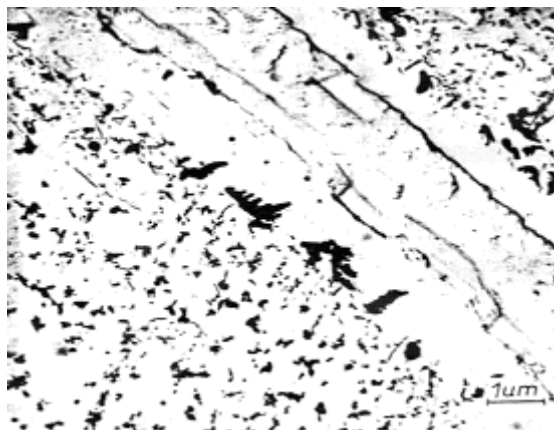
شکل ۲-۰- اثر محلول جوشان استاندارد (سولفات مس+ اسید سولفوریک) و محلول (اسید نیتریک+ کرومات) بر روی فولاد Fe-۱۸Cr-۹Ni-۱Ti که در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت Superheat شده و سپس در آب کونچ شده است. Extraction Replica: a: مرحله بعد به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد آنیل شده و در محلول استاندارد اچ شده است و b: مرحله بعد به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد آنیل شده و در محلول (اسید نیتریک+ کرومات) اچ شده است و c: به مدت ۳۲ ساعت در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد آنیل شده و سپس در محلول (اسید نیتریک+ کرومات) اچ شده است [۸].

در حالتی که محلول اسید سولفوریک - سولفات مس استفاده شده است، پتانسیل خوردگی نسبتاً پایین است و در ناحیه پسیو می‌باشد. در حالت دیگر، استفاده از محلول اسید نیتریک - کرومات، یک پتانسیل بالاتر در ناحیه ترانس پسیو بدست می‌دهد. مورد a در شکل ۳-۵ نشان می‌دهد که مرز دانه‌ها در محلول سولفات مس - اسید سولفوریک مورد حمله واقع شده است. در حالیکه موارد b و c در شکل ۳-۵ نشان می‌دهند که فاز سیگمای زیادی (Extensive sigma phase) در داخل دانه و در پتانسیل‌های بالاتر، مورد حمله قرار گرفته شده است [۸].

با دنبال کردن نرخ تجزیه فریت در ۲ نوع فولاد، مشخص شده است که فاز سیگما، در زمان‌های کمتر از ۲ دقیقه در دمای 850°C بوجود نمی‌آید. از طرف دیگر، در نزدیکی فلز جوش، وجود ساختار غیر تعادلی، تشکیل فاز سیگما را تسریع می‌کند و باعث بوجود آمدن ناحیه حساس شده‌ای در فصل مشترک فریت - اوستنیت می‌شود [۸].

قابل ذکر است که فولاد باید تا دمای بالاتر از 1150°C گرم شود تا تغییرات مهم در ساختار فریت قابل مشاهده شود. در دماهای پایین‌تر، در نمونه‌هایی که در دمای 700°C تا 800°C آنیل شده‌اند، فقط درشت شدن مرز دانه‌ها (Grain Boundary Coarsening) از طریق تشکیل رسوب‌ها روی مرز فریت - اوستنیت، اتفاق می‌افتد. اگر حرارت دادن اولیه (Superheating) تا دمای 1300°C و بالاتر باشد، عملیات حرارتی ثانویه در دمایی حدود 600°C نیز می‌تواند تغییرات ساختاری عمده، ایجاد کند [۸].

هنگامی که در ساختار، مقدار زیادی فریت وجود دارد، رسوب گذاری، سریع اتفاق می‌افتد و به کاهش نواحی فریت مربوط می‌شود که می‌تواند به عنوان مهاجرت مرز دانه‌ها در نظر گرفته شود. شکل ۳-۶ شواهدی از مهاجرت مرز دانه‌ها که بصورت نواحی بدون رسوب است را نشان می‌دهد [۸].

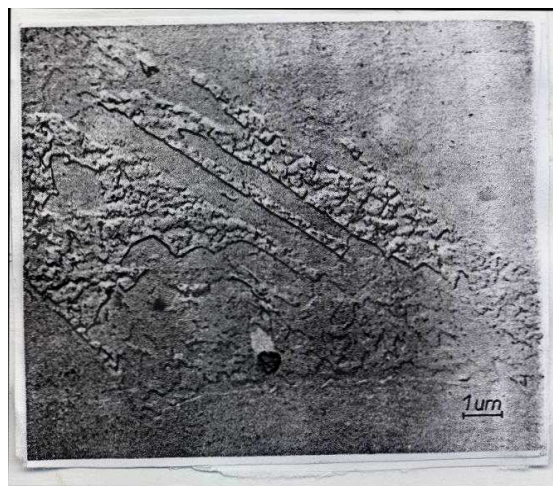


شکل ۳-۰ Extraction Replica که انقباض (contraction) فریت در فولاد Fe-۱۸Cr-۹Ni با رسوبات کاربید نیوبیوم در اوستنیت و کاربیدهای نیوبیوم دندریتی را روی مرزهای فریت اصلی پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۳۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ دقیقه و سپس کوئنچ در آب + ۳۲ ساعت عملیات حرارتی در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد [۸].

موضوع تشکیل فاز سیگما به انقباض (Contraction) فریت و تشکیل اوستنیت ثانویه مربوط می‌شود. شکل ۷-۳ نواحی اوستنیت ثانویه که در فریت فولادی که با تیتانیوم تثبیت شده است را نشان می‌دهد.

یک نکته مهم، تشکیل کاربیدهای دندریتی عناصر تثبیت کننده است. این کاربیدها، اضافه بر کاربیدهای $M_{23}C_6$ و فاز سیگما تشکیل می‌شوند. علاوه بر کاربید $M_{23}C_6$ در بعضی حالات کاربید M_6C (شاید M_7C) نیز ممکن است تشکیل شود. کاربیدهایی که بصورت کلی M_6C معرفی شده‌اند حاوی آهن، کروم و نیوبیوم می‌باشند. در اوستنیت، علاوه بر کاربیدها و نیتريد های ریز عناصر تثبیت کننده، فاز لاهه (Laves phase) با فرمول $[(Fe,Cr)_2Nb]$ نیز تشکیل می‌شود. این فاز در دمای $750^\circ C$ در فولادهای با درصد نیوبیوم بالاتر و در دمای $850^\circ C$ در فولادهای حاوی نیوبیوم کمتر، بوجود می‌آید [۸].

از فازهای ذکر شده در بالا که شامل فاز سیگما، کاربیدهای مختلف و فاز لاهه می‌باشد، ضروری است آن فازهایی که بطور فراوان در طول مرز دانه‌ها تشکیل می‌شوند را مد نظر قرار دهیم. بنابراین رسوب بصورت رندوم و ناکافی، اهمیتی ندارد. توجه مخصوص باید به حضور کروم در تغییرات دمای پایین $M_6C-(Fe,Cr)_2Nb_2C$ (Low Temperature Modification) بشود. این کاربید کمپلکس نیز می‌تواند تشکیل کاربید نواحی تهی شده را ترغیب نماید. این کاربید در دماهای بالا پایدار است و



اوستنیت ثانویه

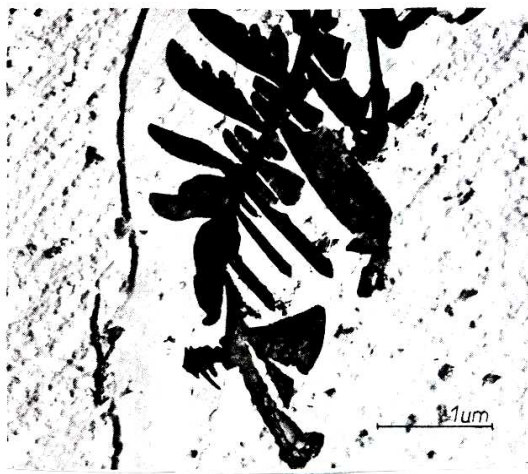
مشاهده شده در فریت فولاد Fe-18Cr-9Ni-1Ti

شکل ۴-۰- نواحی

باعث هتروژن شدن ساختار می شود که این هتروژن شدن ساختار باعث تسريع خوردگی در اسيد نيتريك می شود [۸].

یکی از نکات مهم در پدیده KLA، تشکیل کاربیدهای دندريتی است که کسر بزرگی از نواحی مرز دانه را می پوشاند. بنابراین، یک کاربید عنصر تثبیت کننده که بسیار فعال است، می تواند در این خصوص یک نوع کاربید مضر به حساب بیاید. همانطوریکه در شکل های ۳-۸ و ۳-۹ نشان داده شده است، کاربید تیتانیوم دندريتی در مرز دانه ها تشکیل می شود. این کاربید می تواند تا پتانسیل هایی که با پتانسیل خوردگی در اسيد نيتريك مطابقت دارد، حتی بدون اضافات اکسید کننده (Oxidizing additives)، اکسید شود. این امر با این حقیقت که افزایش درصد تیتانیوم در فولاد، پسیو بودن فولاد را کاهش می دهد، موافقت دارد [۸].

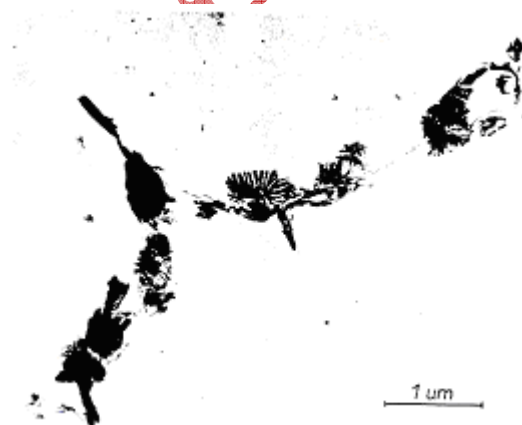
این فرضیه که کاربیدهای دندريتی پیوسته، ممکن است بطور اضافی همراه با تهی شدن کروم، علت وقوع KLA باشد، در یک مقایسه نتایج خوردگی در جدول ۳-۱ بررسی شده است. این جدول جرئیات مطالعات رفتار خوردگی و آنالیز ساختاری را نشان می دهد. ترکیب شیمیایی الیازهای استفاده شده در تست نیز در جدول ۳-۲ آمده است. تست خوردگی در دو محلول استاندارد (سولفات مس - اسيد سولفوریک همراه با عنصر مس) و اسيد نيتريك انجام شده است. از آنالیز جدول ۳-۲ احتمالات زیر وجود دارد [۸]:



شکل ۵-۰ TiC دندریتی در فولاد Fe-۱۸Cr-۹Ni-۱Ti [۸].

۱- بعضی از نواحی در نتیجه تهی شدن کروم به واسطه تشکیل کاربید کروم مورد حمله واقع شده‌اند.

۲- تغییرات ساختاری اضافی مربوط به Dehomogenization درآلیاژ نیز مهم است و بدون شک به تشکیل کاربید تیتانیوم دندریتی ارتباط دارد.



شکل ۶-۰ کاربیدهای تیتانیوم دندریتی در نواحی Superheat شده اتصال جوشکاری شده به روش under flux در فولاد Fe-۱۸Cr-۹Ni-۱Ti [۸].

ذکر این نکته جالب است که در فولاد با ترکیب Fe-۱۸ Cr-۹ Ni- ۱ Ti که در محدوده بحرانی، کاربید کروم رسوب کرده بود، حساسیت اندکی به خوردگی بین دانه‌ای در محلول اسید نیتریک مشاهده شد. اگرچه، هنگامی که کاربید تیتانیوم زیادی در ساختار وجود داشت (شکل ۳-۸)، حمله قابل ملاحظه‌ای اتفاق افتاده بود [۸].

جدول ۱-۰: تست خوردگی بین دانه‌ای در محلول استاندارد و محلول اسید نیتریک ۶۵٪ و نتایج آنالیز ساختاری پس از انجام عملیات حرارتی مختلف بر روی نمونه‌ها [۸].

Precipitation Annealing, C/hr (air-cooled)	Fe-18Cr-9Ni			Fe-18Cr-9Ni-4Ti		
	Temperature	Time	Solution	Temperature	Time	Solution
—	—	—	—	—	10-7	TiC
550 C/30 mins	/	/	/	/	/	/
550 C/4 hrs	/	/	/	/	/	/
550 C/32 hrs	/	/	/	/	/	/
550 C/72 hrs	+++	31-1	/	++++	56-0	TiC + (M ₂₃ C ₆) ^{xx/}
650 C/5 mins	—	0-32	/	+	39-5	/
650 C/30 mins	+	0-37	/	++	46-7	/
650 C/4 hrs	++	10-2	/	++	53-0	TiC + (M ₂₃ C ₆) ^{xx/}
650 C/32 hrs	+++	15-1	/	+++	44-2	TiC + (M ₂₃ C ₆)
650 C/72 hrs	++	13-4	/	++++	26-0	/
750 C/72 hrs	—	1-41	/	—	16-6	TiC + M ₂₃ C ₆
750 C/500 hrs	/	/	/	/	/	/
850 C/4 hrs	—	0-64	/	++	8-9	TiC + M ₂₃ C ₆
850 C/48 hrs	—	0-66	/	—	7-2	TiC + M ₂₃ C ₆
Fe-18Cr-9Ni-1Nb						
	1250 C (1 hr) water quenched +			1350 C (1 hr) water quenched +		
550 C/30 mins	—	0-53	NbC	—	1-0	NbC
550 C/4 hrs	—	/	/	/	/	/
550 C/32 hrs	—	0-33	/	+	0-91	/
550 C/72 hrs	+	10-0	/	++	20-5	/
550 C/72 hrs	+x/	2-35	NbC + M ₂₃ C ₆	++	/	NbC + sl. M ₂₃ C ₆
650 C/5 mins	/	/	/	/	/	/
650 C/30 mins	++	11-02	/	+	3-25	/
650 C/4 hrs	+	8-83	NbC + M ₂₃ C ₆	++	5-89	NbC + M ₂₃ C ₆
650 C/32 hrs	+	3-12	/	+	2-77	/
650 C/72 hrs	++x/	4-08	NbC + sl. M ₂₃ C ₆	+x/	1-45	NbC + M ₂₃ C ₆
750 C/72 hrs	—	0-88	NbC	K	1-08	NbC + σ + vsL M ₂₃ C ₆
750 C/500 hrs	—	/	NbC +	K	1-27	NbC + σ
850 C/4 hrs	—	0-43	/	+x/	0-71	/
850 C/48 hrs	—	/	/	—	1-06	NbC + L
Fe-18Cr-9Ni-1Ti						
	1250 C (1 hr) water quenched +					
550 C/30 mins	—	4-7	TiC	/	not tested	
550 C/4 hrs	/	/	/	—	free of intercrystalline corrosion	
550 C/32 hrs	/	/	/	+ sp +++++	denotes the intercrystalline corrosion rate in the standard solution; the numerical data mean the corrosion rate in g/m ² hr in 66% boiling HNO ₃ after 3 x 48 cycles	
550 C/72 hrs	/	/	/	K	brittle fracture free of intercrystalline corrosion	
550 C/72 hrs	+	43-6	TiC + M ₂₃ C ₆	sl	slight diffraction lines	
650 C/5 mins	—	30-0	/	++	stages of the mentioned phase	
650 C/30 mins	+x/	33-2	/	vsL	very slight diffraction lines	
650 C/4 hrs	+	34-5	TiC + M ₂₃ C ₆ ^{xx/}	opch	overgrained phase	
650 C/32 hrs	—	/	/	opch	fine-grained phase	
650 C/72 hrs	—	39-0	TiC + M ₂₃ C ₆ + σ	+	traces of intercrystalline corrosion	
750 C/72 hrs	—	20-7	TiC + σ	L	leaves phase	
850 C/4 hrs	—	6-83	TiC	M ₆ C	type (Fe,Mb) ₆ C carbide	
850 C/48 hrs	—	5-31	TiC	M ₂₃ C ₆	type (Fe,Cr) ₂₃ M ₂₃ C carbide	
				M ₂₃ C ₆	carbide (Cr,Fe) ₂₃ C ₆	
				σ	sigma phase	
				TiC	titanium carbide	
				NbC	niobium carbide	
				xx/	lines fading in the very black background	

ادامه جدول ۱-۳: تست خوردگی بین دانه‌ای در محلول استاندارد و محلول اسید نیتریک ۶۵٪ و نتایج آنالیز ساختاری پس از انجام عملیات حرارتی مختلف بر روی نمونه‌ها [۸].

Precipitation Annealing, Fe-18Cr-9Ni-2Nb						
C/hr (air-cooled)	1250 C (1 hr) water quenched +			1350 C (1 hr) water quenched +		
	Temperature	Time	Solution	Temperature	Time	Solution
—	—	0-68	NbC	—	0-79	NbC+sl, L
550 C/30 mins	—	/	/	/	/	/
550 C/4 hrs	—	0-39	/	—	1-18	/
550 C/32 hrs	-x/	1-27	/	+x/	1-72	/
550 C/72 hrs	+	1-22	NbC+M ₂₃ C ₆ + + vsl. M ₆ C'	+	1-94	NbC+sl, L
650 C/5 mins	/	/	/	/	/	/
650 C/30 mins	—	0-33	/	+	0-77	/
650 C/4 hrs	+x/	2-93	NbC+sl, M ₆ C'	—	1-20	NbC+M ₆ C'
650 C/32 hrs	K	2-5	NbC+sl, M ₆ C' + σ	—	4-10	NbC + L + + M ₆ C' + fgph. σ
650 C/72 hrs	K	2-5	NbC+sl, M ₆ C' sl. σ + vsl. L	K	5-10	NbC + fgph. M ₆ C' + egph. σ
750 C/72 hrs	K	1-93	NbC+L+M ₆ C	K	3-64	NbC+L+M ₆ C'+ + σ
750 C/500 hrs	K	/	NbC+L+M ₆ C	K	/	NbC+L+ +M ₆ C + σ
850 C/4 hrs	—	1-29	/	—	/	NbC+L+M ₆ C
850 C/48 hrs	—	0-79	NbC+L+M ₆ C	—	3-14	NbC+L+M ₆ C

نرخ خوردگی مشاهده شده در فولادهای تثبیت شده با نیوبیوم، کمتر از فولادهای تثبیت شده با تیتانیوم می‌باشد. این امر با این حقیقت که فولادهای نیوبیوم دار، مقاومت بیشتری نسبت به فولادهای حاوی تیتانیوم دارند، توافق دارد [۸].

جدول ۲-۰: ترکیب شیمیایی نمونه‌های فولادهای انتخاب شده برای تست خوردگی [۸].

Designation of Steel	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	N
Fe-18Cr-9Ni	0.050	1.50	0.62	18.48	9.34	—	—	—	—
Fe-18Cr-9Ni-4Ti	0.090	0.93	0.83	18.24	9.50	0.11	0.35	—	0.003
Fe-18Cr-9Ni-6Ti	0.070	0.46	0.24	17.74	9.28	0.10	0.45	—	0.020
Fe-18Cr-10Ni-1Ti (1)	0.070	1.14	0.25	18.29	9.85	0.10	0.74	—	0.035
Fe-18Cr-9Ni-1Ti	0.080	1.18	0.88	18.24	9.25	0.21	0.80	—	0.003
Fe-18Cr-9Ni-1Nb	0.090	0.94	0.75	18.06	9.28	0.14	—	1.02	0.012
Fe-18Cr-9Ni-2Nb	0.095	1.00	0.73	18.30	9.32	0.19	—	1.92	0.014

(1) Steel on the under flux welded joint.

در نهایت، قابل ذکر است که ترکیب ساختارهای مختلف ذکر شده در بالا، ممکن است با تنش اندرکنش کرده و خوردگی را تسریع کنند. تا کنون مشخص نشده است که اندرکنش تنش با این فازها تا چه اندازه است ولی بطور قطع وجود تنش، عامل مهمی در تسریع خوردگی می‌باشد [۸].

KLA در اتصالات جوشکاری شده از جنس فولادهای زنگ‌نزن

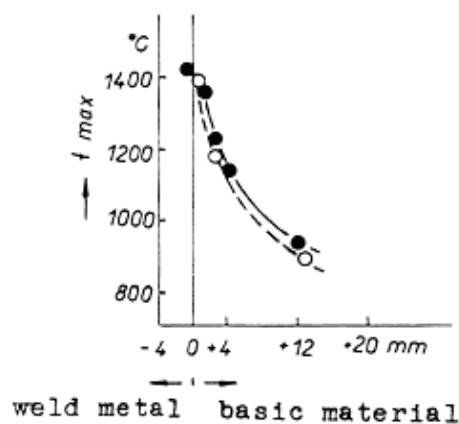
مطالعات بخش قبل در مورد KLA به فولاد در حالت Bulk و جوشکاری نشده مربوط می‌شد. حال این سؤال مطرح است که آیا نتایج حاصل از قسمت قبل، در مورد اتصالات جوشکاری شده نیز صادق است؟ بنابراین، بدست آوردن یک ارتباط (correlation) بین این دو ضروری به نظر می‌رسد. برای این منظور یک روش جوشکاری مخصوص، دنبال می‌شود که در آن در طول جوشکاری زیر سرباره (Under Flux Welding) یک ورق معین، منطقه Superheat بوجود می‌آید. نتایج حاصل از این روش، می‌تواند در مورد اتصالاتی که بطور اتوماتیک ایجاد شده‌اند، بکار برود. شکل ۳-۱۰ گرادیان حرارتی ایجاد شده در یک فولاد تثبیت شده با تیتانیوم که به روش Under Flux جوشکاری شده است را نشان می‌دهد. خط پر به گرادیان دما در مرکز Slab و خط چین، گرادیان دما در ۴/۵ میلی‌متر زیر سطح را نشان می‌دهد.

در منطقه چسبیده به فلز جوش، حمله انتخابی، اغلب به فرایندهایی که در دماهای بالا اتفاق می‌افتد، یعنی تشکیل کاربید تیتانیوم دندریتی در مرز دانه‌ها مربوط می‌باشد. کاربیدهای تیتانیوم معمولاً در پتانسیل‌های منطبق با پتانسیل خوردگی فولاد در اسید نیتریک، اکسید می‌شوند و می‌توانند در اسید نیتریک حل شوند [۸].

اثر حساس کنندگی در محدوده حرارتی بحرانی، باعث بوجود آمدن رسوب‌های کاربید کروم می‌شود (و اثر حساس کنندگی نیز با بوجود آمدن رسوب‌ها، تقویت می‌شود). خوردگی نواحی Superheat شده با تشکیل کاربیدهای کروم تشویق می‌شود [۸].

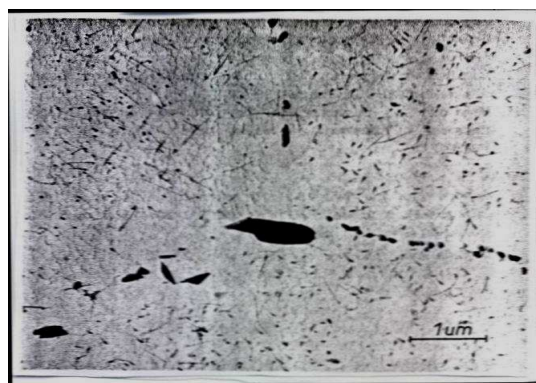
برای حذف حساسیت نواحی Superheat شده، یک عملیات حرارتی دو مرحله‌ای پیشنهاد می‌شود که شامل مراحل زیر می‌باشد [۸]:

- ۱- عملیات حرارتی در دمای 1060°C به مدت ۲ ساعت و سپس، کوئنچ در آب.
- ۲- عملیات حرارتی در دمای 860°C به مدت ۲ ساعت و به دنبال آن، کوئنچ در آب.



شکل ۱-۰- گرادیان دمایی ایجاد شده از فصل مشترک فلز پایه - فلز جوش در یک اتصال فولادی از جنس Fe-18Cr-9Ni-1Ti که به روش *under flux* جوشکاری شده است. خط پر به مرکز slab و خط چین به ۴/۵ میلی متری زیر سطح، مربوط می شود [۸].

این عملیات حرارتی دوگانه، اثر مطلوبی در کاهش خوردگی در نواحی *Superheat* شده دارد و به پراکندگی (*dispersion*) و لخته شدن (*coagulation*) رسوبات کاربید تیتانیوم در 1060°C و حذف اثر حساس کنندگی متعاقب آنها در 860°C مربوط می شود. بعد از این عملیات، کاربیدهای تیتانیوم کاملاً "متراکم (*agglomerate*) می شوند و دیگر شکل دندریتی به خود نمی گیرند (شکل ۱۱-۳). البته، آنها نیز می توانند در اسید نیتریک حل شوند [۸].



شکل ۲۰۰- کاربیدهای تیتانیوم در نواحی Sueprheat شده ناشی از عملیات جوشکاری به روش under flux یک نمونه فولادی از جنس Fe-18Cr-9Ni-1Ti و پس از انجام عملیات حرارتی دو مرحله‌ای پیشنهاد شده [۸].

سپانت علمی و پژوهشی آسمان

خوردگی توام با تنش ۱

ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش ۲ که نتیجه اعمال همزمان تنشهای کششی و محیط خورنده روی فلز می باشد . عده ای از محققین کلیه انهدامای ناشی از ترک خوردن در محیط های خورنده من جمله انهدامهای ناشی از تردی هیدروژنی را SCC نامیده اند لکن این دونوع ترک خوردن با تغییر پارامترهای محیطی ، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می دهند . مثلاً حفاظت کاتدی روش موثری برای جلوگیری از SCC است در حالیکه باعث تسریع تردی هیدروژنی می گردد . به این دلیل در اینجا این دونوع ترک خوردن را جداگانه بحث می کنیم .

در مرحله SCC ، فلز یا آلیاژ تقریباً اصلاً خورده نمی شود ، درحالی که ترکهای ریزی به داخل آن پیشرفت می کند . شکل ۱-۴ این حالت را نشان می دهد .



شکل ۱-۴- مقطع ترکهای SCC در فولاد زنگ نزن (۵۰۰×)

این نوع ترک خوردن نتایج جدی و خطرناکی دارد ، زیرا در تنشهایی که در محدوده تنش مجاز طراحی شده قرار دارند واقع می گردد . چنانچه این فولاد در معرض کلرور منیزیم ($MgCl_2$) جوشان قرار بگیرد (در $310^{\circ}F$ یا $154^{\circ}C$) ، قابلیت تحمل تنش (تنش مجاز) آهن به مقداری که در $1200^{\circ}F$ مجاز است می دهد .

۱- R.B.Water house, "Fretting Corrosion" pergamon press New York > ۱۹۷۲

۲- J.Cohen.J.Bone Jointsurg. ۴۴A:۳۰۷(۱۹۶۲)

دو مورد کلاسیک SCC، ترک خوردن فصلی^۱ برنج و تردی بازی فولاد^۲ است. هردوی این نامگذاریها بازگو کننده 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، ترکهایی در محل اتصال محفظه برنجی به گلوله مشاهده می شد. بعداً معلوم شد که عامل محیطی در ترک خوردن فصلی، آمونیاک حاصل از تجزیه مواد آلی بوده است.

در لوکوموتیوهای بخار اولیه، تعداد زیادی از دیگهای بخار که به روش پرچکاری ساخته شده بودند منفجر شدند. مطالعه انهدامها نشان دادند که ترکها یاشکست ترد، از سوراخ پرچمها شروع شده بودند. این نواحی در مرحله پرچکاری کار سرد شده بودند، آنالیز رسوبات سفید رنگی که در این نواحی وجود داشت، نشان داد که مواد قلیایی هیدروکسید سدیم جزا اصلی است. به این ترتیب شکست ترد در حضور مواد قلیایی اصطلاح تردی بازی را بوجود آورد.

تمام سیستمهای فلز و محیط خورنده باعث SCC نمی شوند، مثال خوبی در این مورد مقایسه بین برنجهای فولاد های زنگ نزن استینیتی می باشد. فولادهای زنگ نزن در محیط های کلرور دار ترک می خورند لکن در محیطهای آمونیاک دار ترک نخواهند خورد درحالیکه برنجهای آمونیاک دار ترک می خورند و در محیطهای کلروردار ترک نمی خورند. بعلاوه تعداد محیطهای مختلفی که در آنها یک آلیاژ ترک خواهد خورد، معمولاً کم می باشد. مثلاً فولادهای زنگ نزن در اسید سولفوریک، اسید نیتریک، اسید استیک، یا آب خالص ترک نخواهند خورد. لکن در محیطهای کلرور دار بازی ترک خواهند خورد.

فاکتورهای مهم در SCC درجه حرارت، ترکیب شیمیایی محلول، ترکیب شیمیایی فلز، تنش و ساختمان فلز می باشد. در قسمتهای بعدی این فاکتورها به همراه مطالبی درباره شکل ترکها، مکانیزم تشکیل و روشهای جلوگیری از آنها بحث خواهد گردید.

شکل ترکها

ترکهای SCC شبیه ترکهایی که در شکست ترد ایجاد می شوند می باشند درحالی که حقیقتاً ناشی از پروسه های خوردگی موضعی هستند . لکن ، اگرچه این ترکها واقعا ترکهای مکانیکی نیستند . با وجود این ، مناسب است مراحل و اشکال عمومی شکل ۴-۱ را به عنوان ترک قلمداد کرد .

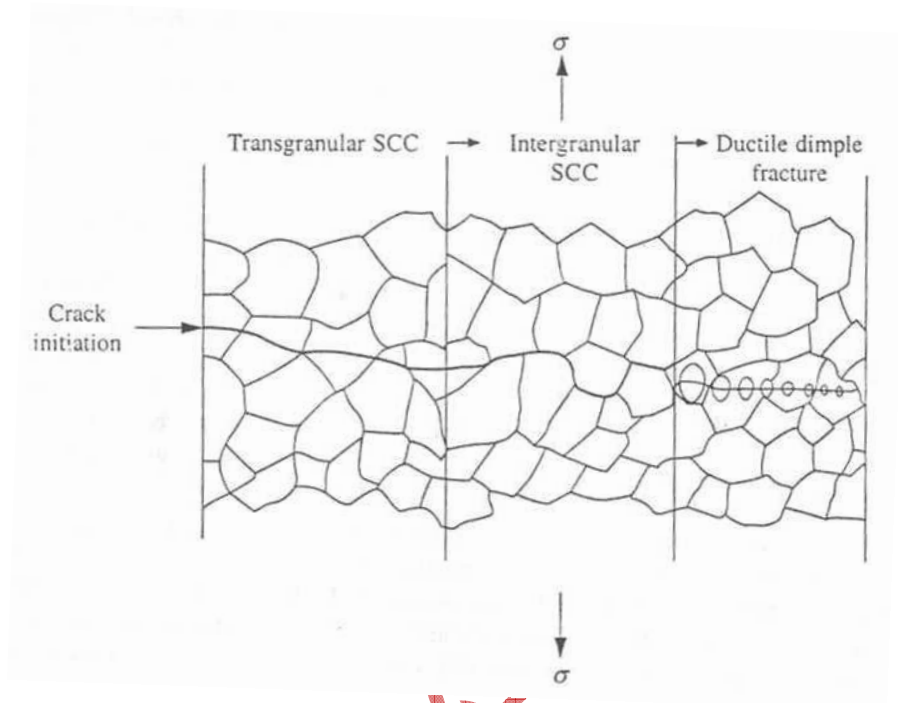


شکل ۴-۱- مقطع ترکهای SCC در فولاد زنگ نزن (۵۰۰x)

در SCC هر دو نوع بین دانه ای و میان دانه ای مشاهده می گردد. ترکهای بین دانه ای در طول مرزها حرکت می کند . درحالیکه ترکهای میان دانه ای از داخل دانه ها عبور می نمایند شکل ۴-۲- مثالی از ترکهای میان دانه ای و نوع ترک بین دانه ای می باشد . غالبا در یک آلیاژ هر دو نوع ترک ممکن است بوجود می آیند . نوع ترک بستگی به محیط خورنده و ساختمان فلز دارد . تغییر نوع شکل ترک در محیطهای مختلف در آلیاژهای پرنیکل ، آلیاژهای آهن - کرم و برنجها دیده شده است .

ترک خوردن معمولا در جهت عمود بر تنش اعمال شده اتفاق می افتد. در بعضی موارد ترکها شاخه شاخه نیستند و در بعضی دیگر چند شاخه ای هستند (مثل دلتای یک رودخانه در شکل ۴-۲)

بسته به ساختمان فلز و ترکیب شیمیایی محیط خورنده شکل ترک می تواند حالت‌های مختلف فوق
الذکر را داشته باشد .



شکل ۴-۲- مثالی از ترک‌های میان دانه ای و نوع ترک بین دانه ای

طبقه بندی مکانیزمها

همان طور که اشاره گردید ، پیچیدگی اندر کنش بین محیطهای مختلف ، ماهیت آلیاژ ساختار متالورژیکی و غیره نشان میدهد که امکان وجود یک مکانیزم واحد برای خوردگی تنشی تمام سیستمهای فلز - محیط وجود ندارد. استایکر^۱ بعضی از مکانیزمهای SCC را که در سیستمهای مختلف می توانند عمل نمایند بشرح زیر طبقه بندی کرده است .

علمی و پژوهشی آسمان

۱. M.A.Streicher

مکانیزمهای متالوژیکی

الف- هم صفحه بودن نابجایی ها .مقاومت در برابر ترک خوردن مربوط می شود به طرز قرار گرفتن نابجایی ها . در فولاد های 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 درهم پیچیده قرار می گیرند .

ب- پیر تنشی و جدایش میکرونی . در پیر تنشی فولادهای زنگ نزن آستنیتی ،سیلانهای پلاستیکی ناگهانی 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 دانه ای شود .سرعت ترک خوردن ، به وسیله دیفوزیون اتمهای حل شونده و همچنین پولاریزاسیون الکتروشیمیایی محدود می شود .

ج-جذب شدن . عوامل فعال سطحی به سطح جذب می شوند و با باندهای تحت کرنش درنوک ترک اندر کنش نموده و باعث کاهش استحکام باندشده و سبب اشاعه ترک می شوند .

مکانیزمهای حل شدن

الف- تشدید حل شدن در اثر تنش . ترک با انحلال آندی موضعی گسترش می یابد . نقش اصلی تغییر شکل پلاستیکی تشدید فرآیند حل شدن می باشد.

ب- تشکیل فیلم در دیواره ترکها بر اساس مکانیزم هم صفحه ای بودن نابجایی ها . ترکها در محلی که پله های لغزشی به سطح می رسند شروع می شوند . رشد ترکها در نتیجه انحلال فلزی است که در حال تسلیم است . با رشد ترک ، پوسته روی دیواره ترک مجددا تشکیل می شود و به عنان کاتد عمل می کند .

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 پله لغزشی آنقدر حل می شود تا مقدار نیکل به مقدار غنی شده سطح قبلی برسد .

د- ترک خوردن در اثر خوردگی توام با تنش ، باشکستن و پاره شدن مداوم فیلمهای غیرفعال پیشروی می کند در محل پارگی عمل انحلال صورت می گیرد تا مجددا حالت غیر فعال بوجود آید .

ه- 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 .

مکانیزمهای هیدروژن

الف- تشکیل هیدرید . هیدروژن وارد فولاد زنگ نزن ۳۰۴ می گردد و تشکیل مارتزیت می دهد و به داخل رشته های اعمود برجهت اعمال تنش نفوذ کرده 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 . یا با تشکیل حفره ها یا با کاهش استحکام باندها . ترکها با شکست مکانیکی منطقه ضعیف شده پیشروی می کنند .

سپار علمی و پژوهشی آسمان

۱. Stringers

مکانیزمهای مکانیکی

- الف- حفره‌ها، تونلی و پارگی. پیشروی ترک با تشکیل حفره‌های عمیق یا تونلهایی که در اثر انحلال بوجود می‌آیند و متعاقب آن به یکدیگر متصل می‌شوند و بصورت پارگی انجام می‌شود.
- ب- تاثیر گوه ناشی از محصولات خوردگی. محصولات خوردگی در ترکهای موجود جمع می‌شوند و در نتیجه با تاثیر شبیه گوه باعث باز شدن و پیشروی ترک می‌شوند.

علمی و پژوهشی آسمان

روشهای جلوگیری

همانطور که در بالا بدان اشاره رفت، مکانیزم SCC بطور کامل درک نشده است. در نتیجه

روشهای جلوگیری از این نوع خوردگی ماهیتا کلی و عمومی هستند و یا تجربی. SCC را می توان با

بکاربرد یک یا چند روش زیر تقلیل داد یا مرتفع نمود:

۱- کم کردن تنش تا زیر حد مجاز (در صورتی که تنش حد مجاز وجود داشته باشد)، مثلاً با

کم کردن با روی فلز یا ضخیم تر کردن قطعه. تنش گیری فولادهای کربنی ساده در ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰

درجه فارنهایت و فولادهای زنگ نزن آستینیتی معمولاً در ۱۵۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه فارنهایت انجام می

گیرد.

۲- حذف اجزا و ناخالصیهای مضر محیط، مثلاً دیگاز کردن، دمیتراله کردن یا تقطیر نمودن.

۳- اگر تغییر محیط و تقلیل هیچ کدام عملی نباشد بایستی آلیاژ را عوض نمود. مثلاً موقعی

که فولاد زنگ نزن ۳۰۴ تحت SCC قرار می گیرد، روش معمول این است که از اینکونل (دارای مقدار

نیکل بیشتر) استفاده می شود. اگرچه فولاد ساده کربنی در مقابل خوردگی عمومی مستعد تر است

، لکن در مقابل SCC از فولادهای زنگ نزن مقاومتر می باشد. مثلاً مبدلهای حرارتی که در تماس با آب

دریا یا آبهای نمکدار (شور) قرار دارند. معمولاً از فولاد کربنی معمولی ساخته میشوند.

۴- کاربرد حفاظت کاتدی، کاتدی تنها موقعی بایستی بکار برده 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 می شود.

۵- اضافه کردن ممانعت کننده ها به سیستم در صورت امکان . در محیطهای خورنده متوسط ، فسفاتها و ممانعت کننده ها آلی و معدنی دیگر بطور موفقیت آمیزی SCC را تقلیل داده اند . در تمام کاربردهایی که از ممانعت کننده استفاده می گردد ، بایستی مقدار ممانعت کننده ، کافی باشد تا از احتمال خوردگی موضعی و حفره دار شدن جلوگیری شود .

۶- گاهی اوقات از پوششها استفاده می شود ، نقش آنها آن است که مانع از تماس محیط با فلز می شوند ، لکن به طور کلی این روش برای فلزات بدون پوشش ممکن است خطرناک باشد .

۷- ساچمه زنی (همچنین تحت عنوان شات پلاست کردن) باعث ایجاد تنشهای پس ماند فشاری در سطح فلز میگردد . ول فول و مال ها نشان دادند که در نتیجه ساچمه زنی با ساچمه های شیشه ای مقاومت به خوردگی تنش به میزان خیلی زیاد افزایش یافت .

برای اینکه نتیجه خوبی عاید شود تمام سطح فلزی که در معرض محیط قرار می گیرد در دستگاه تمام شده بایستی شات بلاست شود . لایه سطحی که دارای تنش فشاری است خیلی نازک است - معمولاً چند هزارم اینچ . مثالی از یک کاربرد موفقیت آمیز شامل سانتریفیوژ از جنس فولاد زنگ نزن نوع ۳۱۶ برای کار با کلریدهای آلی در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد بود که پس از یکسال کار SCC گسترده ای نشان داد . موقعی که با سانتریفیوژ ۳۱۶ شات بلاست جایگزین گردید ، هیچ گونه ترکی تا ۴۲ ماه مشاهده نشد ساچمه زنی سطحی که ترک خورده توصیه نمی شود.

۱. M.Woelful and R,Mulhall, Glass Bead Impact Testing,Metal progress, ۵۷-۵۹

نتیجه گیری

از نتایج بالا، این مطلب روشن است که در مورد مسأله KLA جوشکاری می‌تواند یک بستگی (Correlation) با ماده جوشکاری نشده (Bulk) داشته باشد. روش جوشکاری، اثر قطعی روی عرض ناحیه‌ای که مورد حمله قرار می‌گیرد نیز دارد. در ارتباط با اثر حساس کنندگی ناحیه Superheat شده، KLA در طول رسوب پاس اول، بسیار بیشتر اتفاق می‌افتد. بنابراین، به منظور جلوگیری از KLA پیشنهاد می‌شود که طرفی از قطعه که در معرض محیط خوردنده است، در آخر، جوشکاری شود. همچنین، خوردگی می‌تواند با افزایش سرعت سرد کردن در طول فرایند جوشکاری، جلوگیری شود به شرط اینکه به قطعه، تنش‌های زیان آور القا نشود [۸].

مسأله KLA با استفاده از فولادهای زنگ‌زن کم کربن، کاهش می‌یابد. اهمیت دیگر این فولادها کاهش حساسیت به خوردگی بین دانه‌ای حتی در اتصالات ضخیم می‌باشد. با استفاده از آنها حتی KLA در فولادهای تثبیت شده نیز کاهش می‌یابد [۸].

اگرچه، KLA به علت احتمال تشکیل فازهای دیگر هنوز به عنوان یک نگرانی مطرح است، حذف کامل این فازها احتیاج به کاهش درصد کربن تا زیر ۰/۰۲ درصد دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که فولادهای کم کربن به طور کامل مسأله را حل نمی‌کند و فقط مقدار آن را کاهش می‌دهند [۸].

پدیده KLA، به یک ناحیه بسیار نازک چسبیده به فلز جوش محدود می‌شود. KLA اصولاً در جوشهای چند پاسه و همچنین در اتصالاتی که در معرض عملیات حرارتی تنش‌گیری قرار می‌گیرند، اتفاق می‌افتد. حمله KLA، به رسوب فازهای ثانویه مربوط می‌شود. ردیابی حمله KLA به علت انجام فرایندهایی که خود آنها شناخته نشده‌اند، مانند رسوب فازهای ثانویه، تشکیل فاز سیگما و تشکیل تعدادی فازهای کاربیدی واسطه، مشکل می‌باشد. مکان وقوع KLA، در مرز دانه‌ها می‌باشد. فازی که مورد حمله قرار می‌گیرد، فاز تهی شده از کروم و یا فازهای ثانویه فعال (شامل کاربید تیتانیوم یا کاربیدهای فعال دیگر) می‌باشد. معیار مهم برای واکنش، آرایش هندسی رسوب‌ها است. احتمال KLA، می‌تواند با آرایش رسوب‌ها بطوری که پیوسته نباشند، کاهش می‌یابد [۸].

همچنین برای کاهش سطح تخریب‌های ناشی از این دو خوردگی به طور کلی موارد زیر توصیه می‌شود:

۱. در ارتباط با هر دو پدیده خوردگی، حتی الامکان از روش جوشکاری برای مونتاز قطعات استفاده نشود.

۲. در صورت استفاده از روش جوشکاری، استفاده از روشهای جوشکاری با انرژی جوش متمرکز تر توصیه می‌شود.

۳. استفاده از روش جایگزینی منگنز به جای نیکل سبب کاهش مقاومت به خوردگی بین دانه ای فولادهای زنگ نزن آستنیتی می شود. [۱۶]
۴. در صورت اطمینان از اینکه عامل شکست SCC می باشد می توان از حفاظت کاتدی بهره برد. [۱۵]
۵. همچنین برای کاهش اثرات محیط خورنده استفاده از ممانعت کننده ها توصیه می شود.

سپین علمی و پژوهشی آسمان

مراجع:

- [١]: Tuysserkani, H., Principles of Material Sciene, second edition, (٢٠٠٠).
- [٢]: Stansbury, E.F. and Abuchanan, J., Fundamentals of Electrochemical Corrosion, ASM International, (٢٠٠٠).
- [٣]: Sedriks, A.J., Corrosion of Stainless Steels, John Wiley & Sons, New York, USA, (١٩٩٤).
- [٤]: ASM Metals Handbook, Vol ١٣, corrosion, (١٩٩٠).
- [٥]: Gooch, T.G. and Willingham, D.C., Weld Decay in Austenitic Stainless Steels, The Welding Institute, England, (١٩٧٥).
- [٦]: Lancaster, J.F., Metallurgy of Welding, Abington Publishing, Sixth edition, (١٩٩٩).
- [٧]: ASM Metals Handbook, Vol ٦, Welding, Brazing and Soldering, (١٩٩٠).
- [٨]: Cihal, V., Metallurgical Aspects of Knife-Line Attack on Stabitized Stainlees Steels, NACE, USA, (١٩٧٢), pp.٥٠٢-٥١٤.
- [٩]: GOST ٦٠٣٢-٨٩ Standard, Corrosion-resistant steels and alloys. Methods for testing the resistance to intercrystalline corrosion , (١٩٨٩).
- [١٠]: EN ISO ٢٤٥١-٢ Standard, determination of resistance to intergranular corrosion of stainless steel-part٢: Ferritic, Austenitic and Ferritic-Austenitic (Duplex) stainless steels- corrosion test in media containing sulfuric acid, (١٩٩٨).
- [١١]: ASTM A٢٦٢-٩٣a Standard, Standard for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steel, (١٩٩٣).
- [١٢]: BS ٥٩٠٣-٨٠ Standard, Methods for determination of resistance to intergranular corrosion of Austenitic Stainless steels: copper sulphate, sulphuric acid method (Moneypenny Strauss test), (١٩٨٠).
- [١٤]: GOST ١٤٠١٩-٨٠ Standard, Metals. Methods for bending tests , (١٩٨٠).

[۱۵]: Mars.G.Fontana, Corrosion Engineering, Third Edition ۱۹۸۶.

[۱۶]: Martin Matulaa, Ludmila Hyspeckaa, Milan Svoboda.(۲۰۰۱)
Intergranular corrosion of AISI ۳۱۶L steel

[۱۷]: Hiroyuki Kokawa, Masayuki Shimada, and Yutaka S. Sato (۲۰۰۰)
Grain-Boundary Structure and Precipitation in Sensitized Austenitic
Stainless Steel.

سپین علمی و پژوهشی آسمان