

نقش عملیات سطحی در بروز ترک SCC در فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶ L عملیات حرارتی شده در محلول کلرید منیزیم

پژوهش نفت

سال نوزدهم
شماره ۶۰
صفحه ۲۹-۱۸، ۱۳۸۸

سعیدرضا الهکرم^۱، محمدرضا بهنامیان^۲ و ناصر توحیدی^۱

۱- دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، دانشکده تحصیلات تکمیلی

akaram@ut.ac.ir

سطحی کاهش یافته و با افزایش غلظت یون کلر محلول مورد آزمایش، زمان وقوع ترک‌ها کاهش، تعداد ترک‌های ایجاد شده افزایش و عمق ترک‌ها نیز بیشتر شد. در پایان به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی مشاهده شد که ترک‌های خوردگی تنش آلیاژ AISI 316L حساس شده، ابتدا از سطح نمونه جوانه‌زنی کرده و به تدریج در مرز دانه‌های حساس شده گسترش پیدا کرده و با توجه به عمق کم حساس شدگی، مکانیزم شکست از خوردگی تنش مرز دانه‌ای به درون دانه‌ای تغییر می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ‌نزن AISI 316L، عملیات حرارتی، آماده‌سازی سطح، نمونه U-Bend، محلول کلرید منیزیم، SCC

مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن در صنایع شیمیایی نفت، گاز و پتروشیمی کاربرد وسیعی دارند. این فولادها با حداقل ۱۲ درصد کروم، مقاومت به خوردگی بسیار خوبی در محیط‌های

چکیده

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در برابر خوردگی تنش در محیط‌های حاوی یون کلر به صورت ترک‌های مرز دانه‌ای یا درون دانه‌ای یا مخلوطی از این دو به ترک خوردن مستعد هستند. نوع ترک خوردگی به غلظت محلول خورنده، تنش اعمالی بر نمونه، درجه حرارت آزمایش، نوع محلول خورنده، ترکیب شیمیایی و حالت متالورژیکی آلیاژ بستگی دارد. در این تحقیق پدیده خوردگی تنش در فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ L حساس شده در محلول کلرید منیزیم خالص با غلظت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی و در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد با نقش آماده‌سازی سطحی در به تأخیر انداختن زمان بروز ترک‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است.

با انجام عملیات سطحی نمونه‌ها از قبیل ماسه‌پاشی و ساجمه‌زنی، مشاهده شد که در اثر ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح نمونه‌ها، زمان شروع ترک نسبت به نمونه‌های بدون عملیات سطحی به طور قابل ملاحظه‌ای به تعویق می‌افتد. در نمونه‌هایی که تحت عملیات سطحی قرار گرفته بودند، تعداد ترک‌ها نسبت به نمونه‌های بدون عملیات

مختلف، مکان مناسبی برای تغلیظ عناصر گوناگون یا رسوب فازهای ثانویه از جمله کاربیدها و فاز سیگما هستند. مرز دانه‌ها در بعضی از محیط‌ها کاملاً مقاوم هستند. به عبارتی دیگر، خوردگی مرز دانه‌ای در اکثر آلیاژها در محیط‌های خاصی می‌تواند رخ دهد [۷و۶].

پدیده حساسیت در فولادهای زنگ‌زن سری ۳۰۰، به دلیل رسوب کاربید کروم در مرز دانه‌ها و محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۸۱۵ درجه سانتیگراد ایجاد می‌شود. برای جلوگیری از بروز خسارت‌های ناشی از خوردگی تنش، استفاده از فولادهای زنگ‌زن کم کربن مانند L ۳۰۴، L ۳۱۶ و L ۳۱۷ توصیه شده است [۹و۸].

پدیده SCC به صورت مختلف در مراکز تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته، اما اطلاعات اندک مربوط به اثر آماده‌سازی‌های سطحی مختلف در جلوگیری از بروز یا به تأخیر انداختن خوردگی تنش، موجب شد این موضوع مورد تحقیق و بررسی قرار بگیرد.

روش تحقیق

ورق فولاد زنگ‌زن AISI 316L به ضخامت ۳ mm تهیه و توسط دستگاه Quantometer PMI Master مورد آزمایش قرار گرفت و صحت ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده، تأیید شد. نتایج آنالیز شیمیایی آلیاژ مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

طبق استاندارد ASTM G30، ورق تهیه شده، به وسیله دستگاه برش به ابعاد ۳×۹×۱۰۰ mm و در جهت نورد ورق بریده شد. سپس نمونه‌های بریده شده، تحت عملیات

خورنده از خود نشان می‌دهند. فولادهای زنگ‌زن آستنیتی به دلیل مقاومت به خوردگی بالا به ویژه در برابر خوردگی تنشی ناشی از هیدروژن، همچنین انعطاف‌پذیری و فرم‌پذیری، بیشترین کاربرد را در صنایع دارند. اما قابلیت جوشکاری و مقاومت به خوردگی تنش این فولادها در محیط‌های حاوی کلر بسیار ضعیف است [۱].

ترک خوردگی تنش، به علت فرایندهای همزمان خوردگی و کرنش فلز به دلیل تنش‌های اعمالی یا باقی‌مانده، ایجاد می‌شود. این تعریف بر اساس استاندارد ایزو^۱ است که تا حدودی گمراه کننده است، زیرا کلمه کرنش ممکن است دلالت بر کرنش پلاستیک نیز باشد، درحالی‌که ترک خوردگی تنش، حداقل از دید ماکروسکوپی، تنها در اثر کرنش‌های الاستیک ایجاد می‌شود [۲].

وقوع SCC^۲ نیازمند سه عامل به صورت همزمان است:
- مستعد بودن ماده،

- محیطی که موجب SCC در ماده شود

- تنش کششی کافی برای وقوع SCC [۳و۴].

آلیاژهای مستعد به بروز خوردگی تنش در محیط حاوی یون کلرید در دماهای بالا حساس می‌شوند. حساس شدن^۳ در تعریف به معنی حساسیت فولاد زنگ‌زن به خوردگی مرز دانه‌ای بعد از عملیات حرارتی است. اگر فولادهای زنگ‌زن در دمای بالا قرار گیرند، رسوب‌های غنی از کروم تشکیل می‌شود، این رسوب‌های مرز دانه‌ای که سبب ایجاد نواحی فقیر از کروم در اطراف مرز دانه‌ها می‌شوند، عامل اصلی حساس شدن هستند [۵].

مرز دانه‌ها و جداکننده دانه‌ها با جهت‌های کریستالوگرافی

جدول ۱- آنالیز کوانتومتری فولاد زنگ‌زن مورد آزمایش در مقایسه با آنالیز استاندارد

آلیاژ	C	Cr	Ni	Mo	Mn	S	P	Si	N	Fe	PREN**
آلیاژ مورد استفاده	۰/۰۳۱۲	۱۷/۶	۱۱/۱	۱/۸۳	۱/۳۴	۰/۲۹۱	۰/۰۶۱۸	۰/۳۶۹	۰/۱۰	Base	۲۵/۲۳۹
AISI 316L*	۰/۰۳۰	۱۶-۱۸	۱۰-۱۴	۲-۳	۲	۰/۰۳۰	۰/۰۴۵	۱ (max)	۰/۱۰ (max)	Base	۲۴/۲-۲۹/۵

* آنالیز استاندارد

** PREN عدد معادل مقاومت به خوردگی حفره‌ای است که از فرمول $PREN = Cr + 3.3(Mo) + 16(N)$ محاسبه می‌شود.

1. ISO
2. Stress Corrosion Cracking
3. Sensitization

سازی‌های مختلف سطح (پولیش، سند بلاست و شات بلاست)، در محلول کلرید منیزیم انجام شد (محلول کلرید منیزیم مطابق با استاندارد ASTM G36 ساخته شد) [۱۲]. نمونه‌های آماده شده پس از عملیات چربی‌زدایی در سل شیشه‌ای در معرض محلول کلرید منیزیم خالص با غلظت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. pH محلول‌های فوق حدود ۵/۵ تا ۵/۸ بود که برای تسریع آزمایش، pH محلول تهیه شده به وسیله محلول ۱ نرمال HCl به ۴/۵ رسانده شد.

نتایج و بحث

متالوگرافی سطح نمونه‌های سند بلاست و شات بلاست شده، نشان می‌دهد که سطح نمونه سند بلاست در اثر برخورد ذرات ماسه سیلیسی، دچار ناهمواری‌های ریز و متخلخل شده است ولی در سطح نمونه شات بلاست شده، سطح نمونه در اثر برخورد ساچمه‌های فولادی دچار فرورفتگی‌های نسبتاً عمیقی شده و فشردگی‌های خطوط لغزش به وضوح قابل رویت می‌باشد. تصویر سطح نمونه‌های سند بلاست و شات بلاست شده در شکل ۱ آورده شده است.

نتایج آزمایش ریزسختی سنجی که با وزنه ۵۰ گرمی و به روش ویکرز انجام شد (جدول ۲)، نشان داد که متوسط سختی نمونه‌های مورد آزمایش از مقدار ۱۸۳/۵ ویکرز برای نمونه پولیش شده به مقدار ۲۷۶/۵ ویکرز برای نمونه سند بلاست شده و مقدار ۳۶۹/۵ ویکرز برای نمونه شات بلاست شده تغییر یافته است که این امر نمایانگر افزایش سختی در اثر افزایش کار سرد سطحی می‌باشد. با انجام آزمایش ریزسختی سنجی در فاصله معینی دورتر از سطح نمونه‌ها در سه حالت، مشاهده شد که سختی تغییری

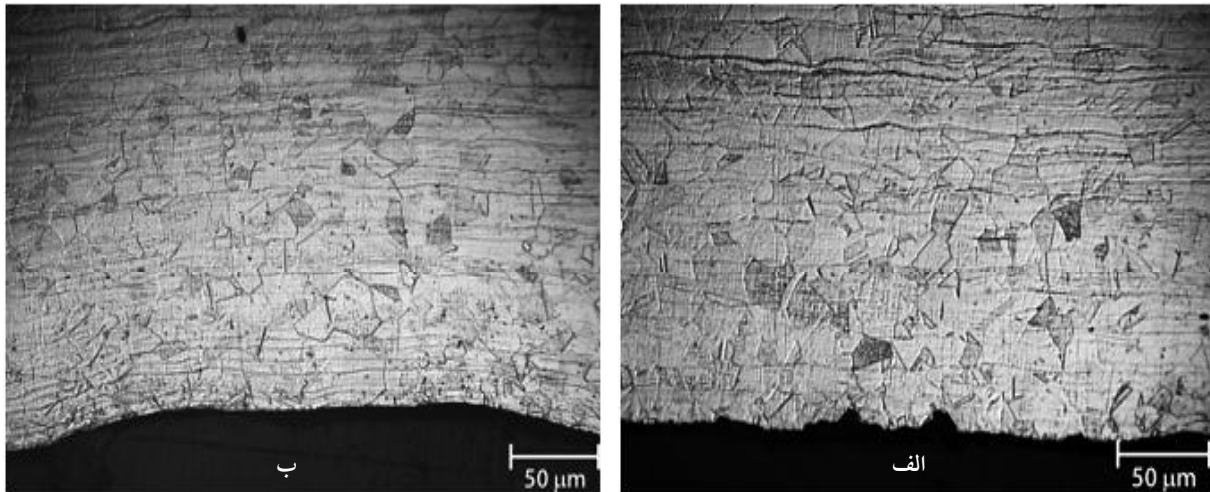
حرارتی قرار گرفتند. عملیات حرارتی به منظور حساس کردن نمونه‌ها، در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت در کوره‌ای با اتمسفر کنترل شده توسط گاز آرگون با میزان دمش ۵ لیتر بر دقیقه صورت گرفت. تعداد ۲۷ عدد نمونه با ترکیب شیمیایی جدول ۱ با ابعاد ذکر شده، تهیه شد (برای آزمایش تکرارپذیری فرایند از هر نمونه ۳ عدد در هر یک از محلول‌های مورد آزمایش قرار داده شد). پس از انجام عملیات حرارتی و صیقل نمونه‌ها، ۹ نمونه در دستگاه سندبلاست با مشخصات (قطر ذرات ۱ mm و فشار کمپرسور ۶ bar و قطر نازل ۳ mm) و ۹ نمونه دیگر در دستگاه شات بلاست با میز گردان با مشخصات (قطر ذرات ۴ mm و قطر فلکه (نازل) ۳۰ cm و سرعت چرخش میز ۸۰ دور در دقیقه و سرعت برخورد ذرات ۳۰۰۰ دور در دقیقه) تحت عملیات سطحی قرار گرفتند. سپس نمونه‌های آماده شده با اعمال نیرو در ۲ مرحله، مطابق استاندارد ASTM G30 به صورت U شکل در آمدند [۱۰]. سپس نمونه‌هایی با شرایط مختلف آماده‌سازی سطح به منظور بررسی سختی، تهیه و مانت گرم شد. بعد از تهیه مانت و عملیات پولیش کاری و الکترواچ، سختی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ریز سختی سنجی با وزنه ۵۰ گرمی به روش ویکرز، اندازه‌گیری شدند که نتایج آن‌ها در جدول ۲ مندرج است.

پس از آماده‌سازی و شکل دادن نمونه‌ها، چربی‌زدایی توسط تری‌کلرو اتیلن طبق استاندارد IPS-C-TP-101 انجام شد [۱۱]. پس از چربی‌زدایی، نمونه‌ها با استن شستشو و خشک شدند.

در این تحقیق آزمون خوردگی تنشی با کرنش ثابت به منظور بررسی بروز و نحوه پیشروی ترک‌ها بر روی نمونه U شکل آلیاژ حساس شده AISI 316L با آماده

جدول ۲- نتایج آزمایش ریز سختی سنجی در سطح نمونه آلیاژ ۳۱۶L

متوسط سختی ویکرز (HV)	دامنه تغییرات	نقطه پنجم	نقطه چهارم	نقطه سوم	نقطه دوم	نقطه اول	سختی ویکرز
							نحوه آماده‌سازی سطح
۱۸۳/۵	۱۷۵-۱۹۲	۱۸۲	۱۹۲	۱۸۸	۱۷۵	۱۸۵	نمونه پولیش شده
۲۷۶/۵	۲۶۷-۲۸۶	۲۶۷	۲۷۱	۲۶۷	۲۷۷	۲۸۶	نمونه سندبلاست شده
۳۶۹/۵	۳۵۳-۳۸۶	۳۶۲	۳۸۱	۳۸۶	۳۵۳	۳۶۷	نمونه شات بلاست شده



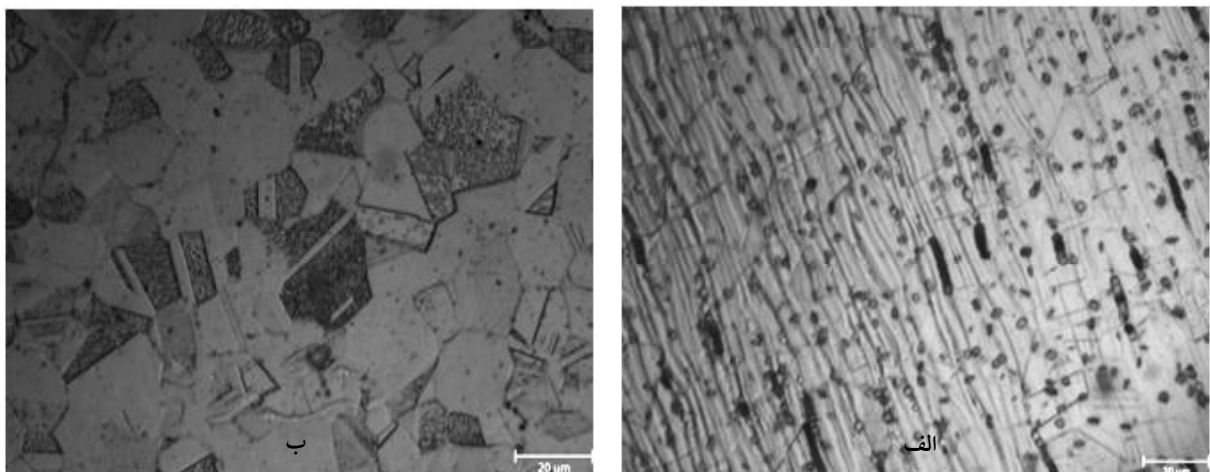
شکل ۱- ساختار میکروسکوپی سطح نمونه‌های عملیات سطحی شده، الکترواچانت: اسید اگزالیک ۱۰ درصد
الف: سند بلاست شده ب: شات بلاست شده

دانه‌ها حدود چند دانه سطحی بیشتر نبوده و مقدار کمی کاربید کروم به صورت دانه تسبیح در مرز دانه‌ها رسوب کرده است که دلیل ناچیز بودن کاربید کروم، پایین بودن مقدار کربن آلیاژ (۰/۰۳ درصد) و مقاومت آلیاژ به پدیده حساس شدگی است.

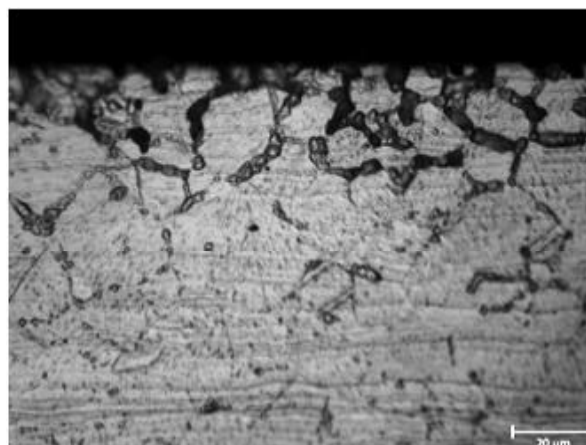
با انجام آزمایش خوردگی تنش‌ی به منظور بررسی بروز و نحوه پیشروی ترک‌ها بر روی نمونه‌های تحت آزمایش در محلول کلرید منیزیم خالص با غلظت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد، پس از بررسی‌های روزانه نمونه‌ها با استفاده از استریو میکروسکوپ نوری، زمان شروع ترک‌ها در نمونه‌ها به دست آمد (جدول ۳).

نمی‌کند (دامنه تغییرات عدد سختی در فاصله معینی از سطح نمونه در حدود ۲۰۸-۱۹۵ ویکرز اندازه‌گیری شد).

بررسی ساختار میکروسکوپی مقاطع طولی و عرضی آلیاژ AISI 316L عملیات حرارتی شده در ۸۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت نشان داد که تغییرات ساختاری قابل توجهی در اثر عملیات حرارتی به وجود نیامده است. شکل ۲ رسوب‌های کاربید کروم که به صورت پراکنده و همچنین ناخالصی از جمله سولفید منگنز که در مرز دانه‌ها و داخل دانه رسوب کرده‌اند را نشان می‌دهد. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که با انجام عملیات حرارتی، عمق حساس شدگی آلیاژ در اثر رسوب کاربیدهای کروم در مرز



شکل ۲- ساختار میکروسکوپی آلیاژ ۳۱۶L عملیات حرارتی شده در ۸۰۰ °C به مدت ۳ ساعت، الکترواچانت: اسید اگزالیک ۱۰ درصد
الف: مقطع طولی ب: مقطع عرضی



شکل ۳- ساختار میکروسکوپی عمق حساس شدگی آلیاژ ۳۱۶L عملیات حرارتی شده در ۸۰۰ °C به مدت ۳ ساعت، الکترو اچانت: اسید اگزالیک ۱۰ درصد

جدول ۳- نتایج آزمایش SCC نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L عملیات حرارتی شده در محلول کلرید منیزیم

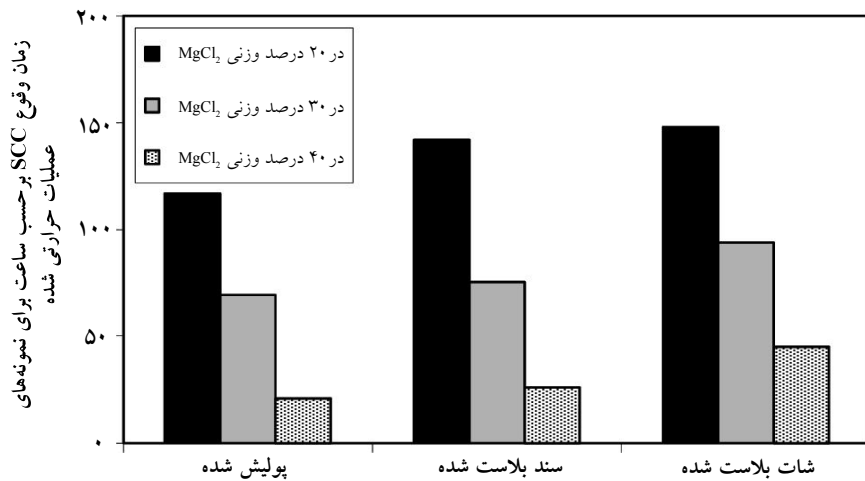
مدت زمان وقوع پدیده SCC پس از شروع آزمایش (ساعت)	نحوه آماده‌سازی سطح نمونه	غلظت محلول $MgCl_2$ (درصد وزنی)
۱۱۷	پولیش شده	۲۰
۱۴۲	سند بلاست شده	
۱۴۸	شات بلاست شده	
۶۹	پولیش شده	۳۰
۷۵	سند بلاست شده	
۹۴	شات بلاست شده	
۲۱	پولیش شده	۴۰
۲۶	سند بلاست شده	
۴۵	شات بلاست شده	

نمونه‌های شات بلاست شده تقریباً یکسان است، اما شیب نمونه‌هایی که به وسیله عملیات سند بلاست دچار فشردگی سطحی شده‌اند بیشتر است. این مطلب را می‌توان ناشی از این مسئله دانست که در اثر برخورد ذرات ماسه و وجود نقاط تیز در سطح نمونه در اثر برخورد ذرات ماسه نقاطی که مستعد به شروع پدیده ترک خوردگی بوده‌اند نیز بیشتر شده است. اگرچه در اثر انجام عملیات سند بلاست، زمان بروز ترک به تأخیر افتاده، لیکن گستردگی نقاط و تغلیظ موضعی محلول، باعث افزایش مراکز جوانه‌زنی ترک و در نتیجه افزایش تعداد ترک‌ها شده است.

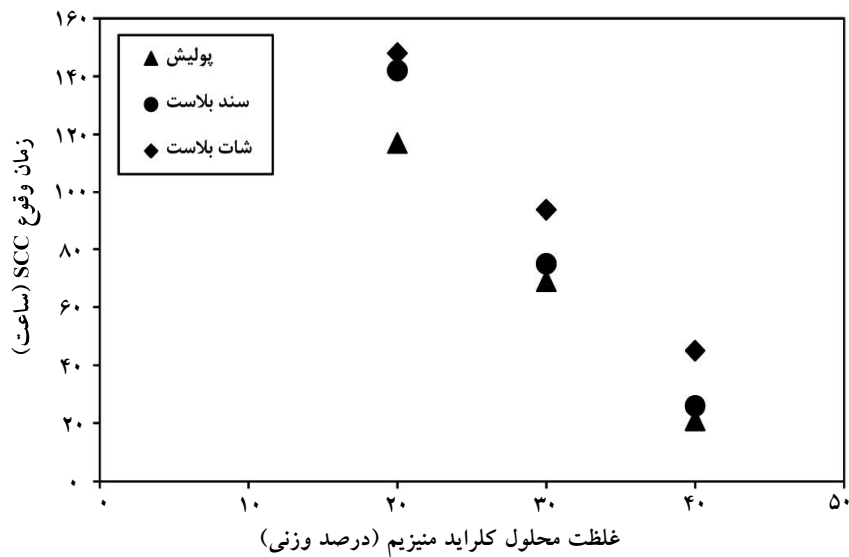
در شکل ۶ تصویر استریو میکروسکوپ سطح نمونه سند بلاست حساس شده و میزان پیشروی ترک‌ها در زمان‌های

شکل ۴، مقایسه‌ای بین عملیات سطحی مختلف در زمان بروز ترک در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که تحت غلظت‌های مختلف کلرید منیزیم، انجام عملیات سطحی فشاری تأثیر زیادی در زمان بروز پدیده SCC در آلیاژ مورد بررسی دارد و هر چه این عملیات بیشتر و ناحیه فشرده شده عمیق‌تر باشد در زمان شروع ترک خوردگی تأخیر بیشتری ایجاد می‌شود. علاوه بر این نمودار مذکور نشان می‌دهد که در نمونه‌های حساس شده، هر چه غلظت محلول بیشتر شود، زمان وقوع ترک نیز کاهش می‌یابد.

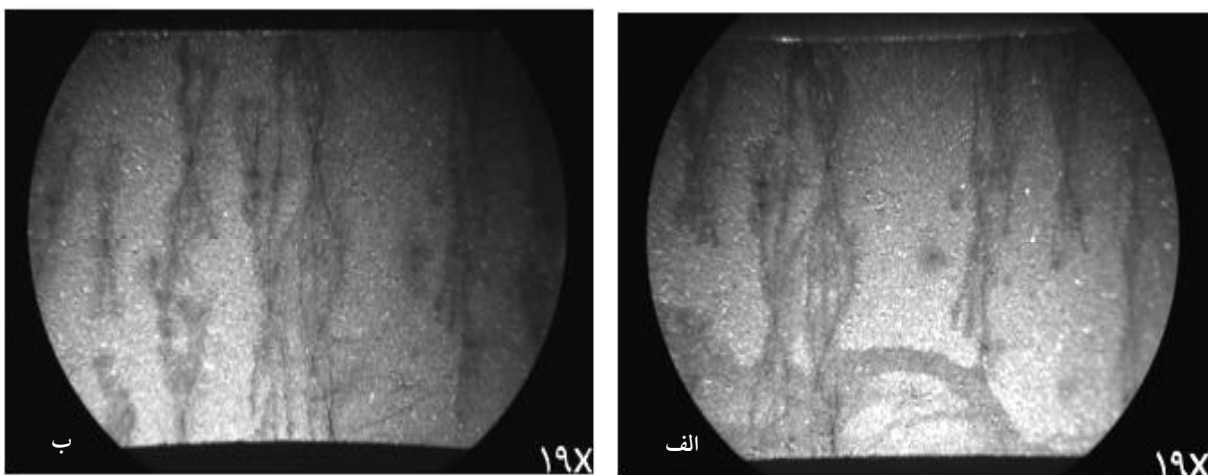
مطابق شکل ۵، شیب وابستگی زمان وقوع ترک به غلظت محلول کلرید منیزیم در نمونه‌های پولیش شده و



شکل ۴- مقایسه بین انواع آماده‌سازی سطح در زمان بروز ترک SCC در محلول کلرید منیزیم با غلظت‌های متفاوت



شکل ۵- وابستگی زمان وقوع SCC نمونه‌های با عملیات سطحی مختلف حرارتی شده



شکل ۶- تصویر پیشروی ترک در سطح نمونه سند بلاست شده حساس شده در دمای ۸۰۰ °C در فواصل زمانی متفاوت در محلول کلرید منیزیم ۲۰ درصد وزنی
الف: ۱۴۲ ساعت
ب: ۱۴۸ ساعت

شکل‌های ۷ و ۸، تعداد و عمق ترک‌های خوردگی تنشی را در نمونه‌هایی که با عملیات سطحی مختلف عملیات حرارتی شده‌اند در مدت زمان یک هفته نشان می‌دهد. این شکل‌ها مبین این موضوع هستند که با افزایش غلظت محلول، تعداد و عمق ترک‌ها افزایش یافته است.

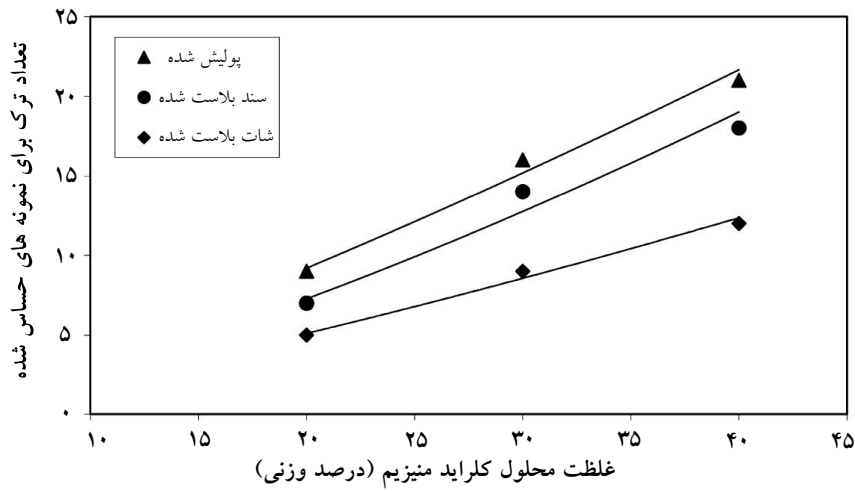
در شکل ۹ تصویر ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در محلول کلرید منیزیم ۴۰ درصد وزنی در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. در این تصاویر مشاهده می‌شود که میزان حساس‌شدگی و رسوب کاربید کروم در مرز دانه‌ها کم و در حد چند دانه سطحی بوده است.

در نمونه‌های حساس شده، تنش باعث شکستن فیلم رویی و به وجود آمدن سطح لخت و برهنه در مرز دانه‌ها می‌شود، به طوری که یون کلر می‌تواند به سهولت باعث

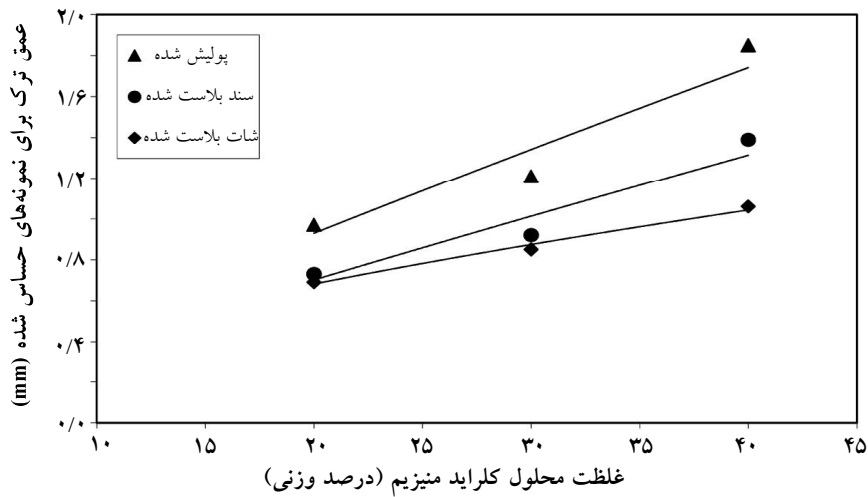
مختلف، نشان داده شده است. در این تصویر مشاهده می‌شود که با افزایش زمان، تعداد و عمق ترک‌ها در نمونه افزایش یافته است. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که ترک‌ها از لبه نمونه که دارای بیشترین تنش کششی است، شروع و با گذشت زمان بر تعداد ترک‌ها افزوده شده و نیز ترک‌ها رشد کرده و با افزایش طول در سطح نمونه پیشروی کرده و نسبتاً تمامی عرض نمونه را در بر گرفته‌اند. پس از قرارگیری نمونه‌های عملیات حرارتی شده با شرایط آماده‌سازی سطحی مختلف، در معرض محلول کلرید منیزیم با غلظت‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی و در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد، در فواصل زمانی متفاوت پس از ایجاد ترک‌ها از مرحله جوانه‌زنی تا رشد، تعداد و عمق ترک‌ها توسط میکروسکوپ استریو اندازه‌گیری و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در محلول کلرید منیزیم با غلظت‌های متفاوت

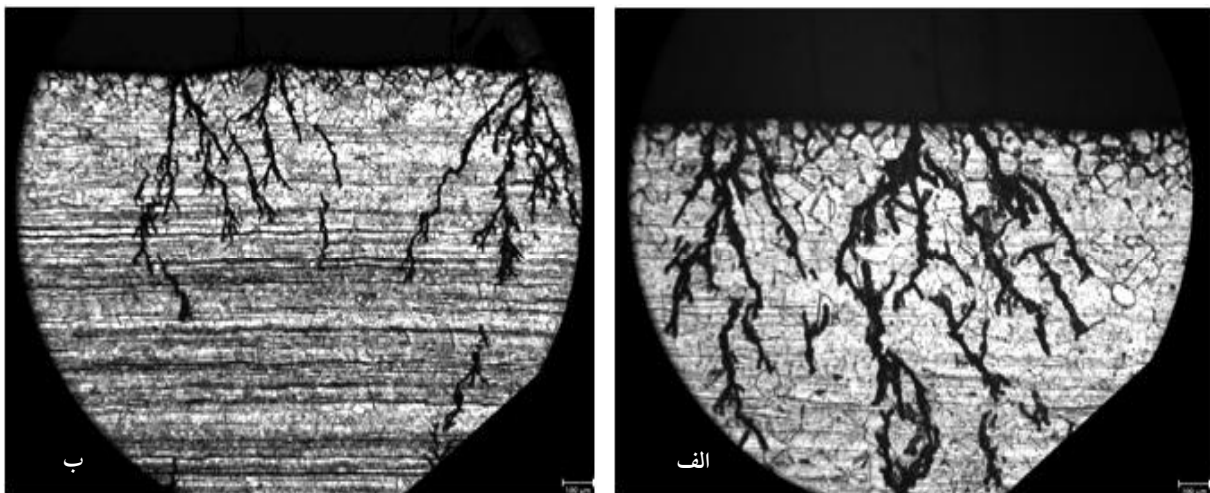
غلظت کلرید منیزیم (درصد وزنی)	نحوه آماده‌سازی نمونه	مشخصات ترک	مدت زمان آزمایش (۱ هفته)
۲۰	پولیش شده	تعداد ترک	۹
		عمق ترک (mm)	۰/۹۷
	سند بلاست شده	تعداد ترک	۷
		عمق ترک (mm)	۰/۷۳
	شات بلاست شده	تعداد ترک	۵
		عمق ترک (mm)	۰/۶۹
۳۰	پولیش شده	تعداد ترک	۱۶
		عمق ترک (mm)	۱/۲۱
	سند بلاست شده	تعداد ترک	۱۴
		عمق ترک (mm)	۰/۹۲
	شات بلاست شده	تعداد ترک	۹
		عمق ترک (mm)	۰/۸۵
۴۰	پولیش شده	تعداد ترک	۲۱
		عمق ترک (mm)	۱/۸۵
	سند بلاست شده	تعداد ترک	۱۸
		عمق ترک (mm)	۱/۳۹
	شات بلاست شده	تعداد ترک	۱۲
		عمق ترک (mm)	۱/۰۶



شکل ۷- تعداد ترک در نمونه‌های حساس شده با عملیات سطحی متفاوت در یک هفته ماندگاری در محلول کلرید منیزیم



شکل ۸- عمق ترک در نمونه‌های حساس شده با عملیات سطحی متفاوت در یک هفته ماندگاری در محلول کلرید منیزیم

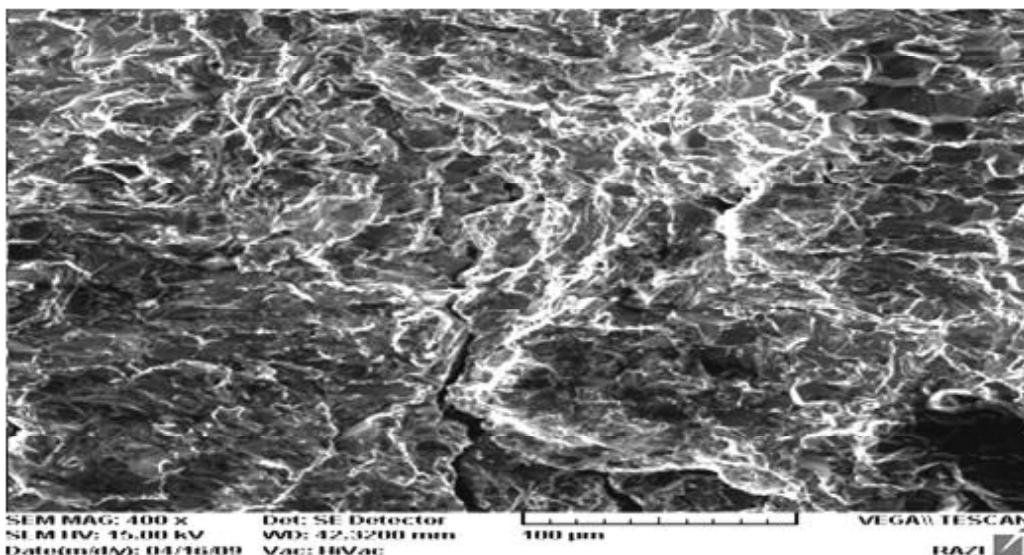


شکل ۹- تصویر ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های عملیات حرارتی شده در محلول کلرید منیزیم ۴۰ درصد وزنی در دمای ۹۰ °C، الکترو اچانت: اسید اگزالیک ۱۰ درصد
 الف: پولیش شده ب: سند بلاست شده

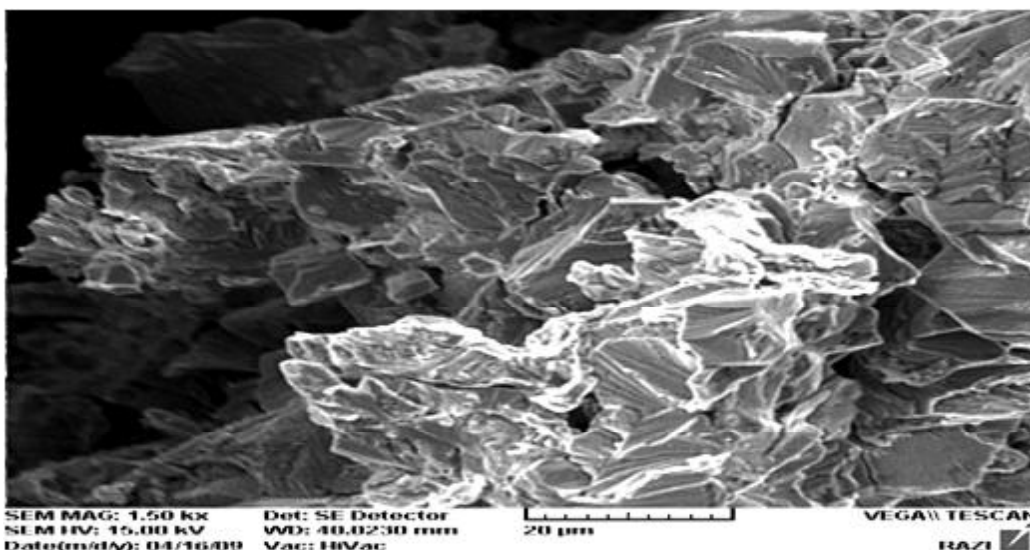
نشان داده شده به صورت مرز دانه‌ای و در بیشتر مناطق به صورت درون دانه‌ای می‌باشد. کم بودن پیشروی این نوع ترک به دلیل کم بودن تشکیل کاربیدها در مرز دانه‌ها است که مسیر مستعدی برای پیشروی ترک‌ها را فراهم می‌سازد و این نیز به دلیل آلیاژ کم کربن مورد استفاده می‌باشد. در شکل ۱۱ مخلوطی از اشاعه ترک به صورت مرز دانه‌ای و درون دانه‌ای مشاهده می‌شود که دلیل آن رسوب کاربید کروم در برخی از مرز دانه‌ها در اثر عملیات حرارتی است که در این نواحی ترک‌ها به صورت مرز دانه‌ای و در سایر نواحی به صورت درون دانه‌ای گسترش پیدا کرده‌اند.

انحلال نواحی فقیر از کروم در اطراف کاربید کروم در مرز دانه‌ها شود. بنابراین ترک‌های خوردگی تنش می‌تواند به سهولت در مرز دانه‌های حساس شده آلیاژ AISI 316L گسترش یابد و سپس به دلیل عدم حساس شدن دانه‌های زیرین از درون دانه‌ها عبور کرده و به مسیر خود ادامه داده و منشعب شده‌اند.

در شکل ۱۰ تصویر گسترش و پیشروی ترک‌ها در نمونه شات بلاست حساس شده در محلول کلرید منیزیم ۴۰ درصد وزنی مشاهده می‌شود. در نواحی مختلف، نوع مکانیزم پیشروی ترک متفاوت است و در ناحیه دایره‌ای



شکل ۱۰- اشاعه ترک SCC عمدتاً به صورت درون دانه‌ای و در برخی نواحی (محدوده درون دایره) به صورت مرز دانه‌ای در نمونه شات بلاست حساس شده در محلول کلرید منیزیم ۴۰ درصد وزنی



شکل ۱۱- تصویر سطح شکست نمونه سند بلاست حساس شده در محلول کلرید منیزیم ۴۰ درصد وزنی

استفاده در آن‌ها یکسان بوده و تنها تفاوت آزمایش‌ها عامل تنش می‌باشد، نشان می‌دهد که نقش تنش اعمال شده در آزمایش خوردگی تنشی با کرنش ثابت بسیار مهم است.

نتیجه‌گیری

در خوردگی تنشی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی L ۳۱۶ در محلول حاوی یون کلر، عامل ایجاد ترک، دمای محلول و یون کلر موجود در محلول است. هر چه غلظت یون کلر موجود در محلول بیشتر باشد، احتمال بروز خوردگی تنشی به‌طور وسیع‌تری افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها به‌صورت زیر بیان می‌شود:

تأثیر هماهنگ و توأم رفتار مکانیکی و الکتروشیمیایی برای بررسی خوردگی تحت تنش چنین است که در لبه و سطح خارجی نمونه‌های تحت تنش در اثر تمرکز تنش، در این سطح پدیده خوردگی تنشی ایجاد شده و یا ابتدا خوردگی حفره‌ای رخ داده (در معیار میکروسکوپی) و سپس تنش کششی در انتهای حفره‌های ریز تمرکز پیدا می‌کند، آنگاه آن نقاط به آند تبدیل گشته، شعاع رأس خوردگی کمتر می‌شود و در نتیجه به تمرکز بیشتر تنش کمک خواهد کرد. با تمرکز تنش، نوک ترک از هم باز شده، سطح جدیدی در اختیار محیط خورنده قرار می‌گیرد و باعث گسترش خوردگی و یا رشد ترک می‌شود.

در حالت کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که:

۱. با انجام عملیات سطحی از قبیل سند بلاست و شات بلاست بر روی نمونه‌ها، مشخص شد که سختی در فاصله کمی از سطح نمونه تغییر یافته و در قسمت داخلی تغییری نمی‌کند.

۲. با بررسی ساختار میکروسکوپی آلیاژ AISI 316L عملیات حرارتی شده در ۸۰۰ درجه سانتیگراد به مدت سه ساعت، مشاهده شد که تغییرات ساختاری قابل توجهی در نمونه ایجاد نشده و تنها رسوب‌های کاربید کروم به‌صورت پراکنده در داخل و مرز دانه‌ها رسوب کرده است، دلیل پراکندگی این کاربیدها و عدم تشکیل یک لایه پیوسته در مرز دانه‌ها، مقدار کربن کم آلیاژ می‌باشد.

۳. با انجام این آزمایش در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد، مشاهده شد که ترک‌ها در نمونه‌های سند بلاست و شات بلاست

در توسعه خوردگی SCC، تشکیل مجدد یک پیل غلظتی (معمولاً پیل غلظتی اکسیژن) بین قسمت تحتانی ترک (به‌عنوان آند با سطح اندک) و سایر قسمت‌های فلز (به‌عنوان کاتد با سطح وسیع) اهمیت پیدا می‌کند. جریان الکتریسیته برقرار شده در اثر پیل خوردگی، سبب انتقال آنیون‌های تحریر کننده (غالباً یون کلر) به درون ترک می‌شود و بدین ترتیب یک پیل غلظتی تشکیل می‌شود که معمولاً بر اثر هیدرولیز، حالت اسیدی پیدا می‌کند و ترک پیشروی می‌کند.

مرحله جوانه‌زنی ترک خوردگی تنشی از ناپیوستگی‌ها و حفره‌های اولیه در سطوح یا حفره‌های ایجاد شده در اثر خوردگی شروع می‌شود. در صورت عدم حضور حفره در سطح، جوانه‌زنی ترک‌های خوردگی تنشی در سطوح صاف به‌وسیله فرایند انحلال مرزدانه‌ها و خطوط لغزش صورت می‌گیرد.

در حین آزمایش با بررسی نمونه‌ها در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد مشاهده شد که ترک‌ها از لبه نمونه که بیشترین مقدار تنش کششی در آنجا وجود دارد، شروع شده است. در مواردی نیز رشد ترک‌ها از حفره‌هایی که در نمونه در ناحیه خم به‌وجود آمده، ایجاد و با ادامه یافتن ترک به حفره‌های دیگر متصل و ترک رشد کرده است، در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که شروع SCC از حفره‌ها به سبب انحلال موضعی ناشی از غلظت بالای کلریدها و pH پایین محیط و تمرکز تنش بالا در حفره، اتفاق می‌افتد. بررسی سطوح نمونه U شکل نشان داد که ترک خوردگی در قسمت‌هایی که خمیدگی رخ نداده، ایجاد نشده است. به‌عبارت دیگر عدم ایجاد ترک خوردگی تنشی به‌دلیل ناچیز بودن تنش و پایدار بودن فیلم رویی، در لبه‌های نمونه می‌باشد. در سطح داخلی نمونه U شکل نیز به‌دلیل تنش فشاری و عدم شکستن فیلم رویی، خوردگی تنشی ایجاد نمی‌شود.

در آزمایش دیگری، یک نمونه تخت از آلیاژ AISI 316L حساس شده، بدون اعمال تنش بر روی آن در داخل محلول قرار داده شد و پس از ۱۰ روز هیچ‌گونه آثار خوردگی در روی نمونه مزبور مشاهده نشد. مقایسه نتایج دو آزمایش مذکور که محلول کلرید منیزیم و آلیاژ مورد

۷. در آزمایشی که بر روی یک نمونه از آلیاژ حساس شده با شرایط کاملاً مشابه بدون اعمال تنش بر روی نمونه انجام گرفت، پس از ۱۰ روز مشاهده شد که هیچ ترکی در روی نمونه ایجاد نشده است، لذا برای خوردگی حضور هر سه عامل تنش، دما و عامل خوردنده در کنار هم الزامی است.

۸. با متالوگرافی به عمل آمده از نمونه‌های حساس شده، مشخص شد که خوردگی تنشی آلیاژ AISI 316L حساس شده ابتدا از سطح نمونه جوانه‌زنی کرده و به تدریج در مرز دانه‌های حساس شده گسترش می‌یابد و به‌علت عدم حساس‌شدگی دانه‌های زیرین، مکانیزم شکست از خوردگی تنشی مرز دانه‌ای به درون دانه‌ای تغییر کرده است.

تقدیر و تشکر

این طرح با حمایت مالی و پشتیبانی شرکت ملی گاز ایران انجام گرفته است که بدین وسیله از آن سازمان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

شده به ترتیب در زمان‌های طولانی‌تری نسبت به نمونه پولیش شده ایجاد شده است. این موضوع نشانگر تأثیر قابل ملاحظه عملیات سطحی روی نمونه‌ها در به تأخیر افتادن جوانه‌زنی و رشد ترک‌ها می‌باشد.

۴. با افزایش غلظت یون کلر موجود در محلول کلرید منیزیم، تعداد و طول ترک‌های ایجاد شده افزایش و زمان بروز ترک در نمونه‌ها کاهش یافته است.

۵. با مشاهده ترک‌ها در مرحله جوانه‌زنی در سطح نمونه‌ها، مشخص شد که شروع ترک‌های خوردگی تنشی از ناحیه‌ای که تنش کششی ماکزیمم است، آغاز شده و ترک‌ها از لبه نمونه یا حفره‌هایی که بر اثر خوردگی بر روی سطح ایجاد شده شروع و با اتصال به حفره‌های دیگر رشد یافته‌اند.

۶. با بررسی نمونه‌های آماده‌سازی شده با شرایط مختلف سطحی مشخص شد که تعداد ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های سند بلاست و شات بلاست شده به ترتیب نسبت به تعداد ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های پولیش شده کاهش یافته که دلالت بر تأثیر تنش پسماند فشاری در اثر عملیات سطحی بر روی نمونه‌ها دارد.

منابع

- [1] Davis J.R., *Handbook of Stainless Steels*, ASM International, 1994.
- [2] *Stress Corrosion Cracking*, Report No. 2295, National Physical Laboratory, London, January 2000.
- [3] ASM Handbook, Corrosion, Fundamental, Testing and Protection, ASM International, 10th Ed., Vol. 13, pp. 197-200, 2003.
- [4] Daniel S. & Kowski J., *Selecting tubing materials for power generation heat exchangers*, The Proceeding of Power-Gen International Conference, New Orleans, pp. 1-20, USA, December 2007.
- [5] Sedriks A.J., *Corrosion of stainless steel*, 2nd Ed., Wiley Inter. Science, New York, 1996.
- [6] Ravindranath K. & Malhotra S.N., "The influence of aging on intergranular corrosion of 22 Chromium - 5 Nickel duplex stainless steel", *Journal of Corrosion Science*, Vol. 137, pp. 121-132, 1995.
- [7] Bovard F.S., *Environmentally induced cracking of an Al-Zn-Mg-Cu alloy*, 1st Ed., University of Pittsburgh, Oakland, 2005.
- [8] *Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry*, API 571, American Petroleum Institute, Washington, DC, December 2003.
- [9] *Stainless Steels, Chromium- Nickel- Molybdenum*, Report No. 316L, ATI Allegheny Ludlum, NACE International, California, 2006.
- [10] ASTM G30, *Standard practice for making and using U-bend stress corrosion test specimens*, Philadelphia, 2003.
- [11] IPS C TP 101, *Surface preparation*, Iranian Petroleum Standard, 2004.
- [12] ASTM G36, *Standard practice for evaluating stress-corrosion-cracking resistance of metals and alloys in boiling Magnesium Chloride solution*, 2000.