



بررسی خوردگی فولادهای زنگ‌نزن با روش نشر فرا آوایی

رامین خامدی^{۱*}، اسماعیل پورسعیدی^۲، موسی جباری^۳

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

۳- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

* khamedi@Znu.ac.ir، ۴۵۳۷۱-۲۸۷۹۱، زنجان

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۶ خرداد ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

نشر فرا آوایی

آزمون‌های غیر مخرب

خوردگی تحت تنش

چکیده

نشر فرا آوایی یکی از روش‌های بررسی مکانیزم خوردگی می‌باشد که از این روش پیشرفته می‌توان برای تشخیص عیوب مختلف در سازه‌های تحت بار و اجزای آنها در زمینه آزمون‌های غیر مخرب استفاده کرد. در این مقاله خوردگی محلول‌های اسید سولفوریک و اسید کلریدریک بر روی فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴، ۳۱۶ و فولاد GTD-450 با استفاده از نشر فرا آوایی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این موضوع، اطلاعات نشر فرا آوایی مربوط به آزمایش‌های خوردگی جمع‌آوری و مورد تحلیل قرار گرفت. با توجه به نمودار آزمایش‌ها مجموع کانت در نمونه‌های دارای تنش بسیار بیشتر از نمونه‌های بدون تنش است که ناشی از حساسیت بالای فولادهای زنگ‌نزن در خوردگی تحت تنش می‌باشد. همچنین بازه فرکانسی نمونه‌های دارای تنش از بازه فرکانسی نمونه‌های بدون تنش کمتر می‌باشد. مجموع کانت فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در نمونه‌های دارای تنش و بدون تنش بیشتر از فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ می‌باشد. خوردگی ناگهانی و شدید در اسید کلریدریک برای مواد آزمایش شده به ویژه در نمونه‌های تحت تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ مشاهده شد که بسیار مخرب می‌باشد، زیرا این نوع از خوردگی باعث ایجاد حفره‌هایی با تمرکز تنش بالا و در نهایت شکست سازه می‌شود.

Research corrosion in stainless steel with acoustic emission

Ramin Khamedi*, Esmaeil. Poursaeidi, Moosa Jabbari

Mechanical Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

*P.O.B. 45371-38791 Zanjan, Iran. khamedi@znu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 11 May 2013
Accepted 27 May 2013
Available Online 11 May 2014

Keywords:

Acoustic Emission (AE)
Non Destructive Test (NDT)
Stress Corrosion Cracking (SCC)

ABSTRACT

Acoustic Emission (AE) technique is a non destructive method which can be used for detection of corrosion mechanism. In this paper the corrosion of sulfuric and hydrochloric acids solution on some kinds of stainless steel like 304, 316 and GTD-450 with and without residual stress was surveyed by acoustic emission technique. Considering tests diagrams, cumulative counts in the samples with residual stress is more than other ones due to high sensitivity of stainless steel samples to stress corrosion cracking. Also frequency in the samples with residual stress is lower than other ones. Cumulative count in the stainless steel 304 is more than stainless steel 316 for all of the samples. A sudden and intensive corrosion in the hydrochloric acid environment was observed specially in the samples with residual stress. For stainless steel 304, this event was very harmful, because, it wills the cause of some pitting corrosion, which concentrates stress in these locations and finally creates crack in structure.

۱- مقدمه

به اقتصاد کشورها می‌توان به هزینه‌های سرسام‌آور این پدیده پی برد. یک مطالعه دو ساله از ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۰ در آمریکا نشان داد که هزینه‌های مستقیم خوردگی ۲۷۶ میلیارد دلار در سال بوده است که این رقم تقریباً ۳/۱ درصد از تولید ناخالص داخلی آمریکا را تشکیل می‌دهد. از این رقم هزینه‌ای بالغ بر ۱۳۷/۹ میلیارد دلار به بخش صنعت که خود دارای زیرشاخه‌های مختلفی است، مربوط می‌شود [۳].

خوردگی تحت تنش یکی از خطرناک‌ترین نوع خوردگی‌ها می‌باشد که در اثر هم‌زمانی خوردگی و تنش مکانیکی رخ می‌دهد. از خصوصیت‌های ترک‌های ناشی از خوردگی تنش این است که عمود بر تنش اعمالی رشد می‌کنند. در این نوع خوردگی عامل تنش به عنوان شروع کننده است و در نهایت، شکست

پدیده خوردگی در تمامی دسته‌های اصلی مواد شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد. اما وقوع خوردگی در فلزات آنقدر شایع و فراگیر بوده و اثرات مخربی بجای می‌گذارد که یکی از مشکلات عمده صنایع به شمار می‌رود. سالانه صنایع مختلف از جمله نفت، گاز، خودروسازی و سایر صنایع میلیاردها دلار خسارت به واسطه این نوع خوردگی را متحمل می‌شوند که با مانیتورینگ و پیش‌گیری به موقع می‌توان این هزینه‌ها را کاهش داد. مشاهدات نشان می‌دهد که تقریباً یک سوم از همه موارد شکست به وسیله اثرات محیطی مانند خوردگی می‌باشد [۱،۲].

با نگاهی به آمار منتشر شده از خسارات مستقیم و غیرمستقیم خوردگی

Please cite this article using:

R. Khamedi, E. Poursaeidi, M. Jabbari, Research corrosion in stainless steel with acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp.195-200, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

توسط عامل مکانیکی صورت می‌گیرد [۴].

این نوع خوردگی تحت تنش نه فقط در مواد با مقاومت کششی بالا بلکه در مواد نرم^۱ نیز باعث کاهش چقرمگی شکست می‌شود. اصطلاح تشدید^۲ برای توصیف این فرایند به خاطر ترکیب و عمل هم‌زمان نیروهای شیمیایی و مکانیکی که منجر به انتشار ترک می‌شوند، بکار می‌رود. درحالی که هیچ کدام از این دو فاکتور اگر به صورت مستقل یا متناوب هم عمل کنند، این اثر را نخواهند داشت. درحالت کلی سه پارامتر در خوردگی تحت تنش تأثیرگذار است:

- مواد
- محیط
- بارگذاری مکانیکی

هر کدام از این پارامترها باید بطور ویژه مورد توجه قرار گیرند. بنابراین با توجه به خوردگی تحت تنش، یک ماده را به تنهایی نمی‌توان براساس ترکیب شیمیایی طبقه‌بندی کرد بلکه شرایط بوجود آمده به وسیله عملیات حرارتی را نیز باید در نظر گرفت [۵].

تمامی مواد صلب دارای خاصیت الاستیکی معینی هستند و هنگامی که مواد تحت بارهای خارجی قرار می‌گیرند دچار کرنش شده و زمانی که نیرو حذف می‌شود به حالت اولیه بر می‌گردند. آزاد شدن سریع انرژی الاستیکی را یک حادثه آکوستیک امیشن می‌نامند که در طی آن یک موج الاستیک تولید می‌شود و انتشار می‌یابد. بنابراین دریافت صحیح و به موقع این امواج می‌تواند به عنوان یک روش غیر مخرب برای پیدا کردن عیوب سازه‌های تحت بار مورد استفاده قرار گیرد [۶]. در روش آکوستیک امیشن انرژی آزاد شده از ماده تحت آزمایش مرجعی برای کار بازرسی است. با توجه به انتشار امواج از منبع تا سطح ماده، می‌توان آنها را توسط سنسورهای ثبت کرد و از این طریق اطلاعاتی در مورد وجود و محل منبع انتشار امواج به دست آورد. این امواج می‌توانند فرکانس‌هایی تا چند MHz داشته باشند. برای شنیدن صدای مواد و شکست سازه‌ها از سنسورهای التراسونیک در محدوده ۲۰ KHz تا ۱ MHz استفاده می‌شود [۷].

در سال ۲۰۰۲ فرر، حساسیت خوردگی تحت تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L را با روش آکوستیک امیشن بررسی کرد. او نمونه‌های خم شده U شکل را در سه نوع بدون تنش، دارای تنش و دارای سطح تنش پسماند بالا، در محلول غلیظ و داغ کلرید منیزیم با غلظت ۳۳٪ و ۴۴٪ قرار داد. نتایج حاکی از این بود که هرچه سطح تنش اولیه نمونه بیشتر باشد مواد به خوردگی تحت تنش حساس‌تر خواهند بود و سیگنال‌های نشر فرا‌آوایی نیز این مسأله را تایید کردند [۸].

در سال ۱۹۸۴ یویاما، اثرات محیطی، شرایط مکانیکی و خصوصیات مواد در فرایند خوردگی خستگی را توسط سیگنال نشر فرا‌آوایی بررسی نمود. ایشان نمونه‌هایی از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را در دماهای مختلف و تحت بار گذاری متفاوت آزمایش کرد. او بیان نمود که در میان منابع نشر فرا‌آوایی ترک خوردگی مهمترین منبع می‌باشد زیرا به طور کلی انرژی زیادی آزاد می‌کند. او دیگر فاکتور تأثیرگذار بر حساسیت خوردگی تحت تنش را حضور و به دام افتادن هیدروژن در داخل ترک را گزارش نمود [۹].

در سال ۱۹۶۳ لاکو، میزان خوردگی فولادهای زنگ‌نزن را محیط‌های خورنده گزارش نمود. پس از ۱۱۹ روز و دمای ۲۴۵ تا ۲۵۵ درجه حرارت فرانهایت در محلول هیدروکسید سدیم فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ نرخ خوردگی

۳/۷ mpy و فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ نرخ خوردگی ۳/۱ mpy داشت. همچنین ایشان بیان کرد که نرخ خوردگی در محلول هیدروکسید آلومینیوم در نزدیکی نقطه جوش به شدت افزایش می‌یابد. در دمای ۴۸۳ درجه فرانهایت و فشار ۱۲۰۰ psi نرخ خوردگی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ برابر با ۱۰۶۰ mpy در محلول هیدروکسید آلومینیوم می‌باشد و در همان شرایط برای فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ نرخ خوردگی برابر با ۱۴ mpy می‌باشد [۱۰]. در این پژوهش سعی شده است که ارتباط بین نرخ خوردگی در نمونه‌های مختلف فولاد ضد زنگ دارای تنش پسماند و بدون تنش با روش نشر فرا‌آوایی بصورت کیفی مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و آزمایش‌ها

فولادهای زنگ‌نزن به خاطر مقاومت به خوردگی بالای آنها در محیط‌های مختلف کاربردهای زیادی در صنایع پیدا کرده‌اند. خوردگی فولادهای زنگ‌نزن در اکثر موارد حفره‌دار شدن و خوردگی مرز دانه‌ای می‌باشد. مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ‌نزن از تشکیل یک لایه اکسید روی آنها ناشی می‌شود [۱۱،۱۲] که ضخامتی بین یک تا چند نانومتر دارند [۱۲،۱۳].

جنس‌های آزمایش شده در این تحقیق فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ بودند که به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی انتخاب شده‌اند. در همین راستا نمونه‌های دارای تنش و بدون تنش از این نوع فولادها تهیه شد. ماده دیگر انتخاب شده پره کمپرسور توربین گاز با جنس GTD-450 می‌باشد. با توجه به خواص منحصر بفرد GTD-450 از قبیل نسبت بالای کروم و مولیبدن و نیکل موجود در ترکیب شیمیایی، این ماده جایگاه ویژه‌ای را در صنایع نیروگاهی و پره‌های کمپرسور توربین گاز پیدا کرده است. از سوی دیگر خواص مکانیکی GTD-450 تأثیر بهینه‌ای روی حد تنش تسلیم، تنش نهایی و شکست نسبت به سایر جنس‌های استفاده شده در ساخت پره‌های توربین دارد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی مواد آزمایش شده را نشان می‌دهد [۱۴].

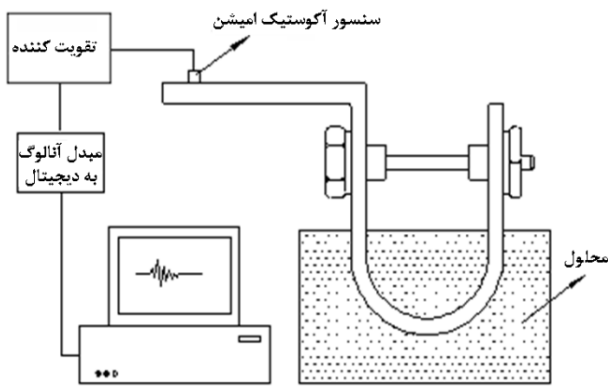
برای آزمایش خوردگی تحت تنش ورق‌هایی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و عرض ۲۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM G30 برش‌کاری شدند و سپس با استفاده نیروی پرسی نمونه‌ها به شکل U خم‌کاری شدند. برای خم کردن نمونه‌ها از پرس هیدرولیک استفاده شد که نیروی فشار پرس سبب بروز تنش در نمونه‌ها می‌شود. برای آماده‌سازی نمونه‌های U شکل از پره کمپرسور ابتدا با اشعه لیزر برش‌کاری روی تکه شکسته شده پره کمپرسور انجام شد و سپس با ماشین‌کاری ورق‌هایی با ضخامت ۳ میلی‌متر و عرض ۹ میلی‌متر تهیه شدند. به خاطر عرض کم پره کمپرسور امکان تهیه نمونه با عرض ۲۰ میلی‌متر وجود نداشت که سبب تغییر ابعاد نمونه پره کمپرسور شد. ورق‌های برش خورده از پره کمپرسور همانند نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن به شکل U خم شدند.

بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها در محیط خورنده قرار داده شدند و پارامترهای آکوستیکی را با استفاده از تجهیزات آزمون نشر فرا‌آوایی دریافت کرده و به تجزیه و تحلیل پارامترهای به دست آمده پرداخته شد. به دلیل خوردگی بالا اسید سولفوریک و اسید کلریدریک روی فلزات این اسیدها با غلظت یکسان ۵٪ به عنوان محیط‌های خورنده انتخاب شدند. در گذشته نیز از اسید سولفوریک و اسید کلریدریک برای بررسی مکانیزم خوردگی فولادهای ضد زنگ استفاده شده است [۱۵،۱۶]. وضعیت قرارگیری برای آزمایش خوردگی تحت تنش نمونه‌های U شکل همانند شکل ۱ می‌باشد.

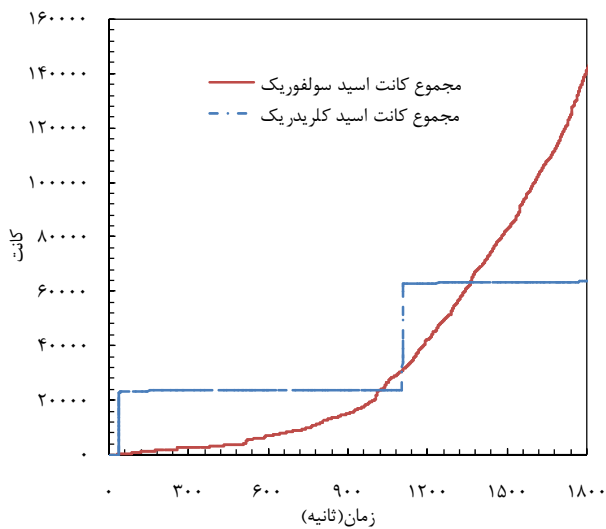
زمان آزمایش همه نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه بود و در ضمن ارتفاع غوطه‌وری نمونه‌ها در داخل اسید به اندازه ۳۰ میلی‌متر از نقطه خم به سمت بالا بود.

1- Ductile
2- Synergy

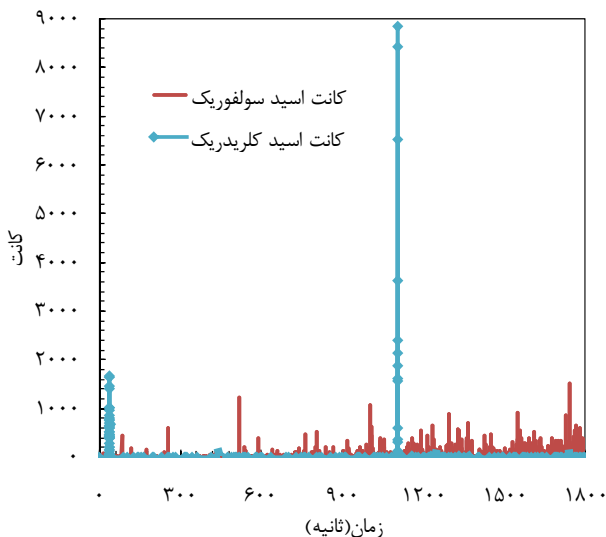
و خوردگی با نرخ آرام انجام می‌شود. شکل ۴ نمودار مجموع کانت برای نمونه بدون تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شماتیک مجموعه استفاده شده در آزمون U شکل



شکل ۲ مجموع کانت نمونه دارای تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴



شکل ۳ کانت نمونه دارای تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

جدول ۳ فرکانس نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

نوع اسید	نمونه‌های تنش دار (kHz)	نمونه‌های بدون تنش (kHz)
اسید سولفوریک	۴۸-۲۸۹	۱۰۱-۴۷۶
اسید کلریدریک	۴۵-۲۷۵	۱۴۱-۳۷۷

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولادهای آزمایش شده

Grade	C	Mn	Si	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb
۳۰۴	۰/۰۸	۲/۰	۱/۰	۰/۰۳	۲۰/۰	۱/۰	۱۰/۵	۱/۰	-
۳۱۶	۰/۰۸	۲/۰	۱/۰	۰/۰۳	۱۸/۰	۳/۰	۱۴/۰	۰/۵	-
GTD-450	۰/۰۲۷	۰/۶	۰/۲۴۵	-	۱۵/۱۷	۰/۷۹	۶/۴۳	۱/۴۸	۰/۳۵

جدول ۲ پیش تنظیمات سیستم نشر امواج صوتی

پیش تقویت کننده	۴۰ dB	تقویت کننده	۶۰ dB
آستانه رد نویز	۳۰ تا ۲۵ dB	پهنای فرکانس	۱۰۰۰-۲۰ KHz
فیلتر بالا گذر	۴۰۰ KHz	فیلتر پایین گذر	۲۰ KHz

در این تحقیق از نرم‌افزار انتشار امواج آکوستیکی AEwin از شرکت آکوستیکی فیزیکی^۱ با برد اصلی دریافت کننده اطلاعات PCI-2 (PAC) استفاده شده است. برای دریافت امواج نشر فرا آوایی و پردازش آنها تنظیماتی بر روی نرم‌افزار دستگاه صورت گرفت که به شرح جدول ۲ می‌باشد.

۳- نتایج آزمایش و بحث

نشر فرا آوایی به عنوان یکی از روش‌های آزمایش‌های غیرمخرب می‌تواند اطلاعات مربوط به شکست یا خرابی در مواد را بلادرنگ مورد پردازش قرار دهد. اکثر مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است، شامل استفاده از پارامترهای نشر فرا آوایی مثل کانت، دامنه، انرژی و فرکانس جهت تشخیص مکانیزم خوردگی ایجاد شده می‌باشد. اطلاعات جمع‌آوری شده از انجام آزمایش‌ها در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳-۱- فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

نمودار مجموع کانت نمونه‌دارای تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در محلول اسید سولفوریک را همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است می‌توان به دو بخش مجزا تقسیم‌بندی کرد. منحنی نمودار تا زمان ۵۱۷ ثانیه به صورت خطی و آرام افزایش می‌یابد و سپس سیر صعودی منحنی با شدت بیشتر و سریع‌تر افزایش می‌یابد. این نمودار بیان می‌کند که در ابتدای آزمایش با توجه به وجود لایه محافظ خوردگی آرام صورت گرفته و پس از بین رفتن لایه محافظ خوردگی با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد. چنانچه زمان تماس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در داخل اسید سولفوریک بیشتر باشد با گذشت زمان میزان خوردگی نیز به همان نسبت افزایش می‌یابد.

نمودار محلول اسید کلریدریک دارای نوسان‌های متعدد صعودی و افزایش آرام خطی می‌باشد. به غیر از زمان‌های ۳۶ و ۱۱۰۵ ثانیه در مابقی لحظات خوردگی آرامتری برای نمونه غوطه‌ور در اسید کلریدریک مشاهده می‌شود. برای مشاهده بهتر رفتار خوردگی نمونه‌های دارای تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ نمودار کانت ترسیم شده است (شکل ۳). بررسی خوردگی در محلول اسید سولفوریک نشان می‌دهد که بیشینه کانت در زمان ۱۷۴۳ ثانیه اتفاق افتاده است. کانت‌های اسید سولفوریک دارای فراز و نشیب‌های بسیار می‌باشد که پس از گذشت ۵۱۷ ثانیه از شروع آزمون اندازه پیک نمودارها افزایش می‌یابد و بیانگر اتفاقات به وقوع پیوسته در حین خوردگی است.

محلول اسید کلریدریک همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود در دو مرحله افزایش شدیدی داشته است و در زمان‌های ۳۶ و ۱۱۰۵ ثانیه شبیه منحنی به شدت افزایش یافته است که بیان می‌کند در این لحظه خوردگی شدیدی اتفاق افتاده است و سپس منحنی مجدداً به حالت قبلی خود برگشته

1- Physical Acoustics Corporation

دارای نرخ افزایشی صعودی می‌باشد و به غیر از زمان ۷۷ ثانیه که در آن افزایش ناگهانی دیده می‌شود، به طور کلی فرایند خوردگی به آرامی در حال پیشرفت است. مقایسه نمودار نمونه‌های دارای تنش و بدون تنش فولاد ضد زنگ ۳۰۴ نشان می‌دهد که در اسید سولفوریک مجموع کانت‌های نمونه دارای تنش حدوداً ۴ برابر نمونه بدون تنش می‌باشد که نتیجه می‌شود که این نوع فولاد نسبت به خوردگی تحت تنش مقاومت کمتری دارد و به تدریج با افزایش زمان نمونه در مجاورت محیط خورنده آسیب پذیرتر است. همین نسبت برای اسید کلریدریک ۹/۸ می‌باشد که اندازه قابل ملاحظه‌ای است. دلیل بالاتر بودن این نسبت در اسید کلریدریک به دلیل نوع واکنش اسید کلریدریک با فولادهای زنگ‌نزن می‌باشد. خوردگی ناگهانی که در اسید کلریدریک اتفاق افتاده است بسیار مضر می‌باشد چرا که سازه را دچار شوک کرده و متعاقب آن منجر به سایر عوارض ناشی از آن می‌شود. با تامل در نمودارهای نمونه‌های دارای تنش و بدون تنش می‌توان به حساسیت بیشتر نمونه‌های دارای تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ پی برد. با استفاده از روش تبدیل فوریه فرکانس‌های مربوط به خوردگی نمونه‌ها استخراج شد که در جدول ۳ محدوده فرکانس‌ها شرح داده شده است. شروع و پایان بازه فرکانس نمونه‌های دارای تنش، پایین‌تر از نمونه‌های بدون تنش می‌باشد که بیانگر تولید سیگنال با آوای بم‌تر نسبت به نمونه‌های بدون تنش می‌باشد.

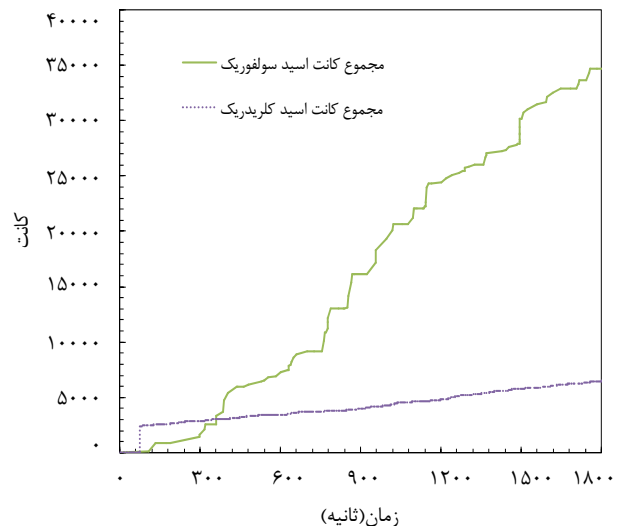
۳-۲- فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶

شکل ۵ میزان مجموع کانت‌های واکنش اسید سولفوریک برای نمونه دارای تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ را نشان می‌دهد. نرخ خوردگی در این نوع فولاد از زمان شروع آزمون تا زمان ۹۱۱ ثانیه به صورت خطی بوده و سپس منحنی نمودار با سیر صعودی شدید افزایش می‌یابد. با افزایش زمان غوطه‌وری ماده در اسید سولفوریک مجموع کانت‌ها نیز نرخ صعودی دارند.

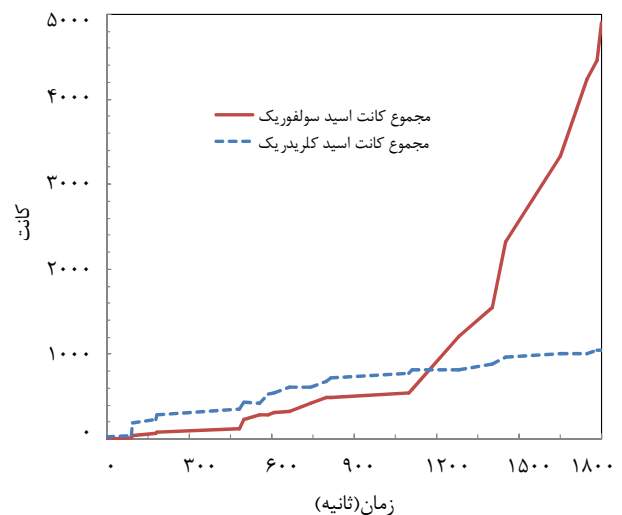
در واکنش نمونه دارای تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ با محیط خورنده اسید کلریدریک مشاهده می‌شود که چنانچه از افزایش ناگهانی در زمان ۹۰ ثانیه چشم پوشی شود خوردگی به صورت خطی و افزایشی، همواره در حال وقوع بوده است. میزان کانت‌های نمودار متعلق به اسید سولفوریک حدود ۴/۸ برابر بیشتر از اسید کلریدریک می‌باشد که این نسبت به نوع مکانیزم خوردگی اسیدها مرتبط است. مکانیزم خوردگی تحت تنش فولادهای زنگ‌نزن در محیط اسید کلریدریک حل شدن آندی می‌باشد؛ در حالی که مکانیزم خوردگی غالب در اسید سولفوریک هیدروژن تردی است [۵،۸]. با توجه به شکل ۶ بررسی نمودار کانت تجمعی نمونه بدون تنش در محلول اسید سولفوریک نشان می‌دهد که رفتار نمونه بدون تنش همانند نمودار دارای تنش می‌باشد و بطور کلی خوردگی فعال برای فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ رخ می‌دهد. در واکنش خوردگی نمونه بدون تنش با اسید کلریدریک نیز به جز افزایش‌های کوچک پله‌ای که در چند نقطه مشهود است، مورد خاص دیگری مشاهده نمی‌شود.

نسبت مجموع کانت‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ تنش‌دار به نمونه بدون تنش در تماس با اسید سولفوریک ۲/۲ برابر می‌باشد که حساسیت این نوع فولاد زنگ‌نزن را بیان می‌کند. همچنین این نسبت برای اسید کلریدریک ۲/۱ برابر است که به مکانیزم خوردگی ماده در محیط و همچنین میزان تنش پسماند در قطعه ارتباط دارد.

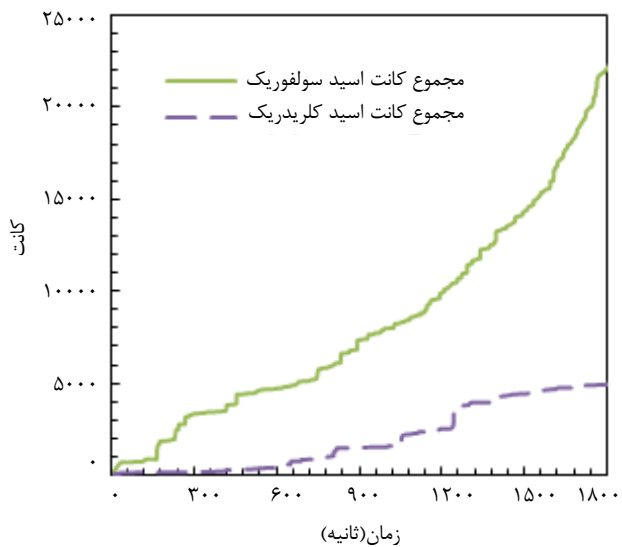
هنگامی که ماده در داخل محیط خورنده قرار می‌گیرد خوردگی تحت تنش منجر به تغییر شکل پلاستیک می‌شود و متعاقباً تغییر شکل پلاستیک سبب آزاد شدن انرژی می‌شود. بزرگی کانت و انرژی آزاد شده به مقدار خوردگی و گسترش



شکل ۴ مجموع کانت نمونه بدون تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

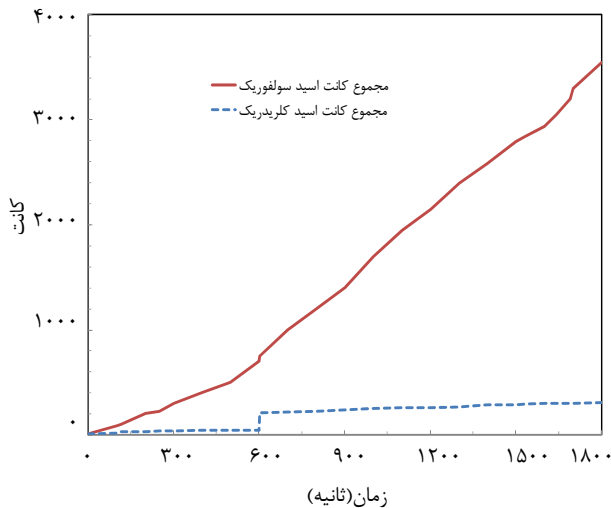


شکل ۵ مجموع کانت نمونه دارای تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶

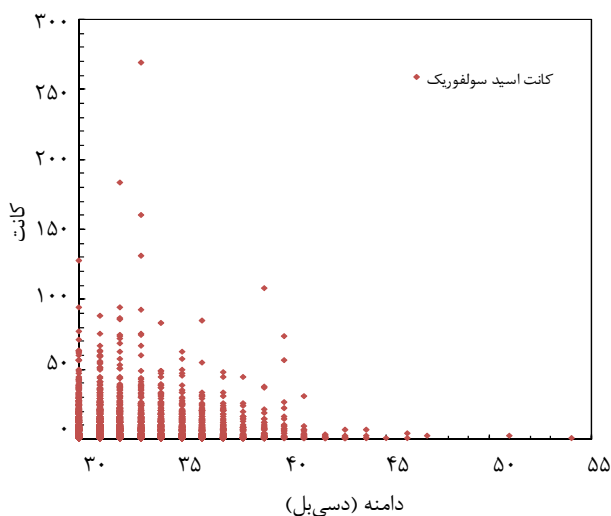


شکل ۶ مجموع کانت نمونه بدون تنش فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶

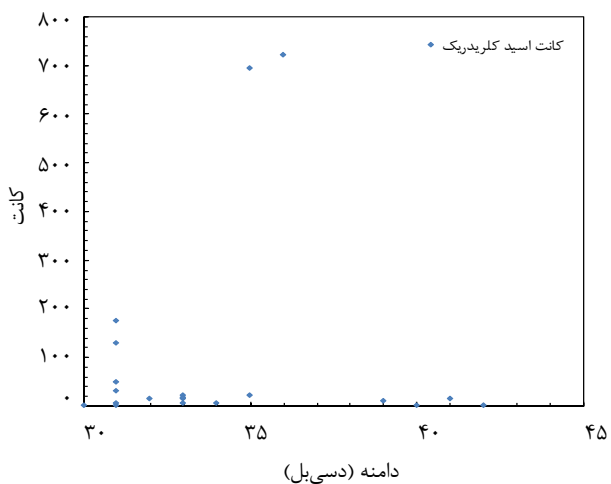
نمونه بدون تنش در اسید سولفوریک همانند نمونه دارای تنش، شیب منحنی از همان ابتدا سیر صعودی دارد و با گذشت زمان به تدریج خوردگی افزایش می‌یابد. نمودار حاصل از واکنش نمونه بدون تنش در اسید کلریدریک نیز



شکل ۷ مجموع کانت نمونه دارای تنش GTD-450



شکل ۸ نمودار کانت برحسب دامنه نمونه دارای تنش GTD-450



شکل ۹ نمودار کانت برحسب دامنه نمونه دارای تنش GTD-450

۴- نتیجه گیری

میزان مجموع کانت نمونه‌های دارای تنش نسبت به نمونه‌های بدون تنش بیشتر می‌باشد. بدین سبب که خم کردن نمونه‌های U شکل سبب بروز تنش پسماند در نمونه‌ها و همچنین باعث بالا رفتن سطح انرژی در مرز دانه‌ها می‌شود. در اثر واکنش نمونه‌های دارای تنش با محلول‌های خورنده انرژی

آن بستگی دارد. در مقایسه میزان کانت‌ها برای نمونه‌های بدون تنش نتایجی همانند نمونه دارای تنش مشاهده می‌شود. به این صورت که اندازه کمتری برای پیک‌های نمونه غوطه‌ور در اسید کلریدریک نسبت به اسید سولفوریک مشاهده می‌شود و همچنین انرژی کمتری نیز در اسید کلریدریک آزاد می‌شود که ناشی از تغییر شکل پلاستیک کمتر نسبت به اسید سولفوریک است. در نتیجه خوردگی کمتری در اسید کلریدریک اتفاق افتاده است. ضمناً نتایج نمودارهای مجموع انرژی آزاد شده در آزمایش‌ها مشابه با نمودار مجموع کانت می‌باشد که دلیل آن در بحث کانت تجمعی ذکر شده است.

محدوده فرکانس‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ برای نمونه دارای تنش و بدون تنش در اسیدهای خورنده به شرح جدول ۴ می‌باشد. در فولاد ۳۱۶ نیز همانند فولاد ۳۰۴ شروع و پایان بازه فرکانس نمونه‌های دارای تنش پایین‌تر از نمونه‌های بدون تنش می‌باشد.

۳-۳- فولاد GTD-450

نمونه دیگری که در این تحقیق آزمایش شده است پره کمپرسور توربین گاز با جنس GTD-450 می‌باشد. بررسی نمودار مجموع کانت نمونه‌های دارای تنش بیانگر این موضوع است که نمودار اسید سولفوریک از زمان شروع خوردگی سیر صعودی دارد. افزایش خطی نمودار حاکی از فعال بودن خوردگی در کل زمان آزمون می‌باشد.

نمودار واکنش فولاد GTD-450 در محلول اسید کلریدریک نشان می‌دهد که در ابتدا ماده به صورت آرامی در حال خوردگی است و تا زمان ۶۶۸ ثانیه خوردگی به آهستگی روی می‌دهد. ولی همان‌گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود در زمان ۶۶۸ ثانیه منحنی به صورت پله‌ای و شدید افزایش یافته و در این لحظه خوردگی شدیدی اتفاق افتاده است و سپس منحنی مجدداً به حالت قبلی خود بر می‌گردد و خوردگی با نرخ آرام انجام می‌گیرد.

نمودار دیگری که در اینجا مورد بررسی قرار گرفته است نمودار کانت برحسب دامنه می‌باشد. این نمودار مشابه نمودار دامنه بر حسب زمان است با این تفاوت که دامنه هر کانت نیز قابل مشاهده است. (شکل ۸)

در اسید سولفوریک بیشینه کانت مربوط به دامنه ۳۳dB می‌باشد و همچنین فراوانی کانت نیز در دسته‌بندی دامنه‌ها قابل مشاهده است. فراوانی کانت‌ها نشان دهنده خوردگی در یک سطح وسیع و گسترده می‌باشد.

برای نمونه دارای تنش در اسید کلریدریک همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود دامنه ۳۶dB برای بیشینه کانت ثبت شده است. میزان بیشینه کانت اسید کلریدریک در دامنه بالا نشان دهنده خوردگی ناگهانی است که قابل تأمل می‌باشد. هنگامی که خوردگی ناگهانی در فولاد GTD-450 روی می‌دهد سبب ثبت واقعه‌ای بزرگ با دامنه بالا می‌شود. این‌گونه منابع برای آزمون‌های غیر مخرب خیلی با اهمیت است و پدیدار شدن این نوع خوردگی تهدید جدی برای سازه به شمار می‌رود. چرا که باعث گسیخته شدن ماده در مقابل نیروی اعمالی و نهایتاً شکست می‌شود.

مقدار انرژی آزاد شده نشر فرا آوایی و بزرگی دامنه آن به مقدار و سرعت خوردگی بستگی دارد. یک اتفاق شدید سیگنال‌های قوی‌تری از یک اتفاق ضعیف و سست ایجاد خواهد کرد. همچنین دامنه سیگنال ایجاد شده به بزرگی سطوحی که در حال خوردگی هستند بستگی دارد.

جدول ۴ فرکانس نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶

نوع اسید	نمونه‌های تنش دار (kHz)	نمونه‌های بدون تنش (kHz)
اسید سولفوریک	۴۶-۳۰۳	۱۱۹-۳۳۹
اسید کلریدریک	۴۵-۳۱۰	۱۱۳-۴۷۶

- [3] G. Schmitt, *Global Needs for Knowledge Dissemination, Research and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control*, World Corrosion Organization, pp. 3-8, 2009.
- [4] M. Farzam, *Corrosion Engineering and Metals Protection*, pp. 72-85, Ahwaz: Oil Industry University, 2005. (In Persian)
- [5] J. Woodtli, R. Kieselbach, Damage due to Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 7, No. 6, pp. 427-450, 2000.
- [6] Miller R.K., McIntire P., *Acoustic Emission Testing*, American Society for Nondestructive Testing, Vol. 5, No. 2, pp. 58-61, 1987.
- [7] A. Marec, J.H. Thomas, R. E. Guerjouma, Damage Characterization of Polymer-based Composite Materials Multivariable Analysis and Wavelet Transform for Clustering Acoustic Emission data, *Mechanical System and Signal Processing*, Vol. 22, No. 6, pp. 1441-1446, 2008.
- [8] F. Ferrer, E. Sehilled, D. Verardo, J. Goudiakas, Sensitivity of Acoustic Emission for the Detection of Stress Corrosion Cracking during Static U-bend Tests on a 316L Stainless Steel in Hot Concentrated Magnesium Chloride, *Material Science*, Vol. 37, pp. 2707-2712, 2002.
- [9] S. Yuyama, T. Kishi, Fundamental Aspects of AE Monitoring on Corrosion Fatigue processes in Austenitic Stainless, *Material for Energy Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 212-221, 1984.
- [10] J.S. Pettibone, *Other Metals*, in: F.L. LaQue, H.R. Copson, *Corrosion Resistance of Metals and Alloys*, Second Ed., pp. 409-411, New York: Reinhold Publishing, 1963.
- [11] P. Marcus, G.M. Grimal, The Anodic Dissolution and Passivation of Ni-Cr-Fe alloys studied by ESCA, *Corrosion Science*, Vol. 33, No. 5, pp.805-814, 1992.
- [12] J.P. Popić, M.L. Avramov-Ivić, I.D. Doroslovački, Electrochemical behavior of stainless steel W.Nr. 1.4301 in the malic acid and sulfur dioxide solution, *Corrosion Science*, Vol. 43, No. 9, pp. 1601-1613, 2001.
- [13] G. Okamoto, T. Shibata, Stability of Passive Stainless Steel in Relation to the Potential of Passivation Treatment, *Corrosion Science*, Vol. 10, No. 5, pp. 371-378, 1970.
- [14] E. Poursaeidi, Failure Analysis of air Compressor Blades First Stage of GE-Frame 6B Gas Turbine, in the 1st Symposium on Sustainable Gas Production, Mashhad, Iran, 2012, (In Persian)
- [15] H. Heidary, A. Refahi Oskouei, Mechanism Detection of Stress Corrosion Cracking by Acoustic Emission and Effect of Manufacturing Process on AE Signals, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 123, No. 5, pp. 2109-2114, 2008.
- [16] Yuyama S., Kishi T., Hisamatsu Y., Effect of environment, mechanical conditions and materials characteristic on AE behavior during corrosion fatigue processes of an austenitic stainless steel, *Nuclear Engineering Design*, Vol. 81, No. 2, pp. 345-355, 1984.

ذخیره شده در مرز دانه‌ها آزاد می‌شود و سبب فعال‌سازی عمل خوردگی می‌شود. در نتیجه خوردگی بیشتری برای نمونه‌های دارای تنش رخ می‌دهد. مجموع و تعداد کانت‌های اسید سولفوریک هم برای نمونه‌های دارای تنش و هم برای بدون تنش بیشتر از اسید کلریدریک می‌باشد که به نوع مکانیزم خوردگی اسید سولفوریک مرتبط می‌باشد. مکانیزم خوردگی تحت تنش فولادهای زنگ‌نزن در محیط اسید کلریدریک حل شدن آندی می‌باشد در حالی که مکانیزم خوردگی غالب در اسید سولفوریک هیدروژن تردی می‌باشد. در همه نمودارهای اسید سولفوریک تعداد وقایع بیشتری اتفاق افتاده و پارامتر کانت افزایش یافته است.

با توجه به نتایج به دست آمده مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ به مراتب بیشتر از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ می‌باشد که درصد نیکل و مولیبدن این فولاد را به خوردگی مقاوم کرده است.

نتایج آزمایش نرخ خوردگی کمتری را برای نمونه‌های قرار گرفته در اسید کلریدریک نسبت به اسید سولفوریک را نشان می‌دهد. ولی بروز پدیده خوردگی ناگهانی و شدید در اسید کلریدریک در نمونه‌های دارای تنش به ویژه فولاد ۳۰۴ بسیار مخرب می‌باشد. خوردگی ناگهانی باعث ایجاد نقاط با تمرکز تنش بالا می‌شود. لذا سازه در تماس با اسید کلریدریک سریع‌تر دچار شکست می‌شود هرچند که دارای نرخ خوردگی کمتری است.

۵- تقدیر و تشکر

در پایان از زحمات آقای دکتر مهدی احمدی و آقای دکتر حسین حیدری که صمیمانه در انجام آزمایش‌ها و در اختیار نهادن تجهیزات آزمون نشر فرا‌آوایی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ما را یاری کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- مراجع

- [1] L. Faria, *Cost of Fracture*, in Proceeding of SPT'5, Vienna, pp. 67-77, 1993.
- [2] K. Darowicki, A. Mirakowski, S. Kraowiak, Investigation of pitting corrosion of stainless steel by means of acoustic emission and potentiodynamic methods, *Corrosion Science*, Vol. 45, No. 8, pp. 1747, 2003.