



پیشکسوت و پیشرو در صنعت تصفیه و شرایطسازی آب کشور

RSCO® ROSOUBGIRI
A to Z in Specialty Water Treatment Since 1973



معتبرترین استاندارد ملی و بین المللی کنترل کیفی
ISIRI-ISO/IEC 17025

ISO 9001 / ISO 14001 / ISO 45001
ISIRI 3601 / ISIRI 6591 / ISIRI 6792

آدرس: تهران، خیابان میرزای شیرازی، بالاتر از خیابان
مطهری، کوچه عرفان، پ ۲۸، ک.پ ۱۳۷۱۳-۱۵۸۶۷

 **Wateradditives**

 <https://t.me/watertechnochemical>

 ۰۲۱ - ۸۸ ۱۰ ۶۱ ۶۱

 ۰۲۱ - ۸۸ ۱۰ ۱۸ ۱۷

 ۰۹۱۲ ۸۰۰ ۱۸ ۲۵

● مواد شیمیایی بهسازی آب

- انواع ضد رسوب، ضد خوردگی و بایو ساید جهت سیستم‌های خنک کننده.
- ممانعت کننده رسوب، بایوساید و مواد شستشو جهت آب شیرین کن‌های اسمز معکوس (RO).
- ممانعت کننده رسوب و ضد کف آب شیرین کن‌های حرارتی (MSD/MSF).

● مواد شیمیایی تصفیه آب و فاضلاب

- انواع منعقدکننده‌های معدنی کلرورفریک پودر و مایع، پلی آلومینیوم کلراید، سولفات آلومینیوم.
- انواع منعقدکننده‌های پلیمری (فلوکولانت).

● مواد شیمیایی خاص مورد مصرف در صنایع بالا دستی نفت (Over head-Oil Field chemicals)

- انواع بازدارنده‌های خوردگی و رسوب، باکتری کش‌ها و ضدکف‌ها.
- فروش، شارژ، خدمات آزمون و بازرسی سیلندر و مخازن گاز کلر

زنگ

سال نوزدهم، شماره ۷۹ - تیر ۱۴۰۵
فصلنامه علمی، آموزشی، ترویجی انجمن خوردگی ایران



سخن آغازین	۲
پیش‌گفتار	۳
گزارش بیست و سومین کنگره ملی خوردگی	۴
مقاله	
بررسی مقاومت شیمیایی پوشش‌های ضدخوردگی از دیدگاه انرژی سطح	۱۲
بررسی پارامترهای موثر بر خوردگی آلیاژ پایه نیکل (Ni200) در محیط قلیایی	۱۸
بالا بردن ضریب تأثیر آموزش‌های خوردگی برای مهندسان فرآیند جانی و افسایت در پالایشگاه‌های گاز و دیگر صنایع انرژی	۳۶
دنیای خوردگی	
واژه‌های خوردگی و حفاظت فلزات	۴۴
معرفی کتاب	۴۵
روی خط اینترنت	۴۸
بیشتر بدانیم	
آزمون‌های غیرمخرب	۵۰
پوشش‌های دما بالا	۵۸
اخبار انجمن	
آموزش	۶۶
خبر	۶۷
فهرست کتاب‌های موجود	۶۸

بسم الله الرحمن الرحيم

زنگ

صاحب امتیاز: انجمن خوردگی ایران

مدیر مسئول: دکتر عماد رعایانی

سر دبیر: مهندس احمد رضا بحرانی

اسامی هیئت مدیره و بازرسان (به ترتیب حروف الفبا):

دکتر مریم احتشام‌زاده

دکتر کوروش جعفرزاده

مهندس علیرضا حاتمی منفرد

دکتر هادی عادل‌خانی

مهندس سید محمود کثیریها

دکتر محمدعلی گل‌عذار

مهندس محمد نجمی

مهندس رضا ایمانیان نجف‌آبادی

دکتر ابودر مسعودی

همکاران اجرایی (به ترتیب حروف الفبا):

انجمن: زهرا آصف، حجت عباسیان، اکرم کرمی

دانشجویی: محمد جلالی، علی جوکار

ناشر: انجمن خوردگی ایران

زنگ، فصلنامه علمی، آموزشی، ترویجی انجمن خوردگی ایران از یکطرف با هدف ارتقای سطح دانش خوردگی متخصصان و دست‌اندرکاران علم و مهندسی خوردگی، ایجاد انگیزه در دانشجویان جهت پرداختن به فعالیت‌های پژوهشی و تحقیقاتی و از طرف دیگر اطلاع‌رسانی در باب مسائل مرتبط با خوردگی در سطوح داخلی و خارجی و ایجاد پل ارتباطی بین انجمن خوردگی ایران و اعضای آن، اساتید دانشگاه و پیشکسوتان صنعت منتشر می‌گردد.

• فصلنامه زنگ در ویرایش، رد یا قبول، حک و اصلاح مطالب آزاد است.

مقاله‌های دریافتی به هیچ عنوان عودت داده نمی‌شود.

• مسئولیت صحت مطالب، ارقام و نمودارها برعهده نویسندگان و مترجمان

مقاله‌ها خواهد بود.

• مقاله‌ها و دیدگاه‌های مندرج در فصلنامه زنگ، لزوماً به معنای تأیید آن

از طرف انجمن خوردگی ایران نمی‌باشد.

• اقتباس و نقل مطالب و استفاده از تصاویر فصلنامه با ذکر ماخذ آزاد است.

تهران، میدان فردوسی، خیابان شهید عباس موسوی (فرصت)،

کوچه اوشانا، پلاک ۱۱، واحد ۳

تلفن: ۸۸۳۴۴۲۸۷-۸ و ۸۸۸۲۷۳۳۴

دورنگار: ۸۸۳۴۷۷۴۹ و ۸۸۸۲۷۳۳۴

پایگاه اینترنتی: www.ica.ir

پست الکترونیک: info@ica.ir

قیمت: نسخه دیجیتال رایگان

سخن آغازین

به نام خدا

میان مقاومت و تداوم
انتشار یک نشریه تخصصی، حتی در قالب الکترونیک، در روزگاری که سرعت تحولات، محدودیت‌های اجرایی و دشواری‌های ارتباطی هر روز بیشتر می‌شود، کاری ساده نیست. این دشواری زمانی دوچندان می‌شود که جهان پیرامون ما درگیر التهاب، جنگ و ناامنی باشد؛ شرایطی که نه تنها آرامش عمومی، بلکه مسیر تولید دانش و تداوم فعالیت‌های علمی و صنعتی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در چنین فضایی که صنعت پتروشیمی - به عنوان یکی از ارکان حیاتی اقتصاد و توسعه کشور - با چالش‌هایی چندلایه روبه‌روست. از یک سو، آسیب‌های ناشی از حملات و بمباران‌های دشمن بر زیرساخت‌ها، امنیت و استمرار فعالیت این صنعت سنگینی می‌کند، و از سوی دیگر، پدیده خاموش اما ویرانگر خوردگی، همچنان یکی از جدی‌ترین تهدیدها برای تجهیزات، سازه‌ها و فرآیندهای صنعتی به شمار می‌رود. خوردگی مواد، اگرچه اغلب بی‌صدا پیش می‌رود، اما آثار آن می‌تواند بسیار پرهزینه، خطرناک و گاه جبران‌ناپذیر باشد.

در این میان، انجمن خوردگی ایران با وجود همه سختی‌ها، محدودیت‌ها و فشارهای موجود، همچنان با جدیت و مسئولیت‌پذیری در مسیر خود گام برمی‌دارد. تداوم فعالیت‌های علمی، آموزشی و تخصصی انجمن در چنین شرایطی، نشانه‌ای روشن از تعهد جامعه فنی و علمی کشور به دانش، توسعه و حفظ سرمایه‌های ملی است. اگرچه مسیر دشوار است، اما باور ما این است که ایستادگی در برابر سختی‌ها، خود بخشی از رسالت علمی ماست. نشریه «زنگ» نیز با همین نگاه منتشر می‌شود؛ تلاشی برای ثبت تجربه‌ها، انتقال دانش و زنده نگه داشتن گفت‌وگو در حوزه‌ای که برای صنعت کشور حیاتی است. امید داریم این شماره، در کنار بازتاب دادن مسائل و دغدغه‌های تخصصی، یادآور این حقیقت باشد که علم، حتی در سخت‌ترین شرایط، می‌تواند چراغ راه بماند.



مهندس احمدرضا بحرانی

عضو هیات مدیره

انجمن خوردگی ایران

با احترام
سرمدیر نشریه زنگ
۱۴۰۵

به نام خدا

بهار در امتدادِ ایثار و دانش

ما این شماره از نشریه را در حالی تقدیم می‌کنیم که قلب تپنده‌ی صنعت کشور، پتروشیمی‌ها، از یک سو آماج کینه‌توزی دشمن و آسیب‌های ناشی از بمباران‌های ناجوانمردانه قرار گرفته و از سوی دیگر، با چالش‌های فنی پیچیده، به‌ویژه معضل خاموش «خوردگی مواد» دست‌وپنچ نرم می‌کند.

انجمن خوردگی ایران، به‌عنوان یک نهاد علمی و تخصصی، ضمن محکوم کردن این تعرضات و ابراز اندوه عمیق خود، شهادت رهبر فرزانه انقلاب، فرماندهان سرافراز، رزمندگان دلاور و جمعی از مردم مظلوم این سرزمین را به ملت بزرگ ایران و جامعه مهندسی کشور تسلیت می‌گوید. ما به خوبی آگاهیم که صیانت از زیرساخت‌های حیاتی کشور در این شرایطِ خطیر، همسنگِ ایستادگی در میدان‌های رزم است.

انتشار نشریه در چنین روزهایی، اگرچه با دشواری‌های بی‌شماری همراه است، اما برای ما نه یک انتخاب، که یک «تکلیف» است. «انجمن خوردگی ایران» با تکیه بر عزم راسخ اعضای خود و با وجود تمامی فشارها، دست از فعالیت برنداشته و رسالت خود را در جهت توسعه دانش، ترویج فناوری‌های نوین کنترل خوردگی و حفظ سرمایه‌های ملی با صلابتی بیش از پیش دنبال می‌کند.

ما بر این باوریم که در کنار ترمیم آسیب‌های ناشی از جنگ، «دانش مهندسی» باید سنگر اصلی ما برای پایداری و خودکفایی باشد. شماره‌ی جدید «زنگ» تلاشی است برای تداوم این مسیر؛ مسیری که در آن علم، نه تنها در آزمایشگاه‌ها، بلکه در خط مقدم صنعت، چراغ راه ایستادگی است.

با احترام



دکتر عماد رعایائی

رئیس هیات مدیره

انجمن خوردگی ایران



بیست و سومین کنگره ملی خوردگی برگزار شد

بیست و سومین کنگره ملی خوردگی توسط انجمن خوردگی ایران با هدف هم‌افزایی علمی، تبادل تجربه‌های صنعتی و ارائه آخرین دستاوردهای پژوهشی در حوزه خوردگی و حفاظت مواد، در تاریخ ۲۰ و ۲۱ آبان ۱۴۰۴ به میزبانی دانشگاه صنعتی امیرکبیر برگزار شد. این کنگره با هدف تبادل دانش، ارائه دستاوردهای نوین پژوهشی و ایجاد ارتباط مستمر میان دانشگاه و صنعت در حوزه خوردگی شکل گرفت و امسال نیز با حضور فعال پژوهشگران، صنعتگران، متخصصان و دانشجویان، به یکی از پربارترین رویدادهای علمی سال در خصوص پدیده مخرب خوردگی تبدیل شد.

در این دوره، مجموعاً ۹۴ مقاله به دبیرخانه ارسال شد که پس از داوری علمی:

۵۸ مقاله در قالب پوستر

۲۱ مقاله به صورت شفاهی

۵ مقاله در قالب نشست تخصصی و علمی

به برنامه کنگره راه یافتند.



تنوع موضوعی مقالات، حضور پژوهشگران برجسته، و مشارکت گسترده صنایع، نشان‌دهنده اهمیت روزافزون موضوع خوردگی در کشور و نقش مؤثر این کنگره در هم‌افزایی علمی است. دبیر کنگره در سخنان خود اشاره کردند که کنگره با چالش‌هایی از جمله تغییر محل برگزاری و محدودیت زمان مواجه شد، اما با همکاری دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اساتید، متخصصان صنعت و



بخش ویژه افتتاحیه - تجلیل از پیشکسوتان

در بخش ویژه مراسم، از سه بزرگوار به عنوان چهره‌های اثرگذار حوزه خورده‌گی کشور تقدیر شد:

- جناب آقای دکتر عبدالحمید جعفری

- جناب آقای دکتر هادی عادل خانی

- سرکار خانم پروفسور مریم احتشام‌زاده (به پاس خدمات ماندگار در حوزه ترویج و آموزش خورده‌گی)

به هر سه استاد پیشکسوت، تندیس ویژه کنگره اهدا شد.



برگزاری کنگره

سایر برنامه‌های بیست و سومین کنگره ملی خورده‌گی:

- سخنرانی‌های کلیدی و تخصصی توسط اساتید برجسته و کارشناسان مجرب و همچنین ارائه مقالات شفاهی به صورت سخنرانی در سالن‌های بهمن، فجر و مولانا انجام شد.

- پنج نشست تخصصی، خورده‌گی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی برگزار گردید.

- چندین کارگاه تخصصی با موضوعات کاربردی و صنعتی برگزار شد.

- نمایشگاه جانبی تجهیزات و خدمات خورده‌گی به صورت فعال در کنار کنگره برگزار شد و فرصتی برای آشنایی با تکنولوژی‌های جدید فراهم کرد.

ارائه پوسترهای علمی با حضور فعال پژوهشگران و دانشجویان، امکان تبادل نظر و گفتگو درباره تازه‌ترین یافته‌ها را فراهم نمود.

در کنگره خورده‌گی ۱۴۰۴، سخنرانی‌های مدعو از اساتید برجسته کشور از دانشگاه‌های صنعتی اصفهان، مالک اشتر، تربیت مدرس،

دانشجویان، برنامه علمی و اجرایی به شکل مطلوب برگزار گردید. هدف اصلی کنگره، اشتراک تجربه، ارائه راهکارهای علمی برای پیشگیری از خسارت‌های خورده‌گی و ارتقای دانش صنعتی کشور بوده است.

افتتاحیه

مراسم افتتاحیه با حضور اساتید برجسته، پژوهشگران و صنعتگران، با تلاوت قرآن کریم، پخش سرود ملی جمهوری اسلامی ایران آغاز شد. ابتدا دبیر کنگره، جناب آقای مهندس کتیریها ضمن خوش‌آمدگویی، گزارشی از روند آماده‌سازی، تعداد مقالات و بخش‌های مختلف برنامه ارائه کرد. در ادامه، رئیس دوره‌ای هیات مدیره انجمن جناب آقای دکتر رعایایی، ضمن خوش‌آمدگویی به مدعوین بیست و سومین کنگره ملی خورده‌گی، یکبار دیگر از اهمیت اقتصادی خسارت خورده‌گی به صنایع کشور صحبت نمود و گفت که تنها در نتیجه خسارت مستقیم خورده‌گی مبلغی معادل ۱۲۹۰ همت صنایع کشور زیان می‌بینند. حال آنکه با استقرار مدیریت جامع خورده‌گی، می‌توان با بهینه‌سازی روش‌های کنترل خورده‌گی، مبالغی معادل ۳۸۰ همت، صرفه‌جویی کرد.

در ادامه برنامه افتتاحیه پیام جناب پروفسور ناصر کنعانی برای حاضران قرائت شد.



در بخش علمی افتتاحیه، چند سخنرانی کلیدی با موضوعات تخصصی روز ارائه گردید.

در این میان سخنرانی تامل‌برانگیز جناب پروفسور محمدعلی گل‌عذار که به خسارت‌های خورده‌گی در ایران و هدر رفت سرمایه ملی، آسیب محیط زیست و تخریب اکولوژی و اکوسیستم پرداخته شد می‌توان اشاره کرد. (فایل کامل سخنرانی‌ها در پایگاه اینترنتی انجمن منتشر خواهد شد)

تبریز، صنعتی امیرکبیر، دانشگاه فنی برلین آلمان، صنعت نفت، خواجه نصیر، شهید باهنر کرمان، شهید بهشتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشگاه صنعت نفت و صنایع نفت، گاز و پتروشیمی ارائه شد. این سخنرانی‌ها شامل موضوعات متنوعی از جمله خوردگی دمای بالا، حفاظت کاتدی، پوشش‌های سرامیکی، آنالیز تخریب تجهیزات و نوآوری‌های صنعتی بود.

ارتباط دانشگاه و صنعت در طول کنگره به خوبی شکل گرفت و پژوهشگران جوان با ارائه‌های دقیق علمی در تعامل با اساتید و متخصصان برجسته، فرصت ارزشمندی برای یادگیری و تبادل تجربیات داشتند.

مراسم اختتامیه کنگره

مراسم اختتامیه با ارائه گزارش دبیر کنگره از روند دو روز برنامه آغاز شد. سپس کلیپ دوره‌های آفلاین انجمن پخش و مقالات برتر شفاهی و پوستر به‌طور رسمی معرفی شدند. پس از ارزیابی هیئت داوران، مقالات برتر به شرح زیر معرفی و نویسندگان تقدیر شد:

الف) مقالات برتر شفاهی و نام ارائه دهنده (۲ مقاله)

۱. رضا عظیمی کیا

عنوان: تأثیر افزودن نانو ساختارهای اکسید ایتیریم به پوشش‌های سرامیکی TBC بر مقاومت به اکسیداسیون چرخه‌ای سوپرآلیاژهای پایه نیکل

۲. رضا جعفری

عنوان: علت وقوع خوردگی در تیوب‌های مربوط به چگالنده‌های سطحی واحد الفین مجتمع پتروشیمی سازند (اراک)

ب) مقالات برتر پوستر و نام ارائه دهنده (۳ مقاله)

۱. محمدرضا شهاب‌الدینی
عنوان: بررسی علل خوردگی شافت فن تأمین فشار منفی کوره فلش کارخانه ذوب مجتمع مس سرچشمه و ارائه راهکارهای کنترل

۲. امیرحسین گمرک‌چی‌زاده
عنوان: ارزیابی اثر عنصر بور بر رفتار خوردگی روکش سخت کامپوزیتی FeCr/B4C اعمال شده روی فولاد ساده‌کربنی به روش جوشکاری قوس تنگستن

۳. اسماء حسنی
عنوان: بررسی تأثیر اصلاح آمینی TETA بر چسبندگی و مقاومت خوردگی پوشش‌های اپوکسی در محیط‌های خورنده

از مشارکت فعال و ارائه مقالات تخصصی کارشناسان مراکز صنعتی و پژوهشی به خصوص شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب / بازرسی فنی و خوردگی فلزات، در کنگره اخیر، که نقشی کلیدی در ارتقای غنای علمی کنگره افزود، صمیمانه قدردانی می‌نماییم.

از تمامی نویسندگان مقالات برتر در مراسم اختتامیه با اهدای لوح تقدیر و جوایز نفیس مورد تجلیل قرار گرفتند.

در ادامه از موارد زیر تقدیر به عمل آمد:

- * حامیان مالی و علمی کنگره
- * مجری کنگره (شرکت همایش صنعت انرژی)
- * گروه اجرایی و دبیرخانه کنگره
- * دانشجویان داوطلب و همراهان امور اجرایی

اختتامیه با پیام جناب آقای دکتر دهکردی درباره ضرورت حفاظت از سرمایه‌های ملی در برابر پدیده مخرب خوردگی و همچنین عکس یادگاری پایان یافت.

سخن پایانی

بیست و سومین کنگره ملی خوردگی با مشارکت فعال پژوهشگران، اساتید و صنعتگران و با حمایت دانشگاه صنعتی امیرکبیر و حامیان مالی برگزار شد. این دوره فرصتی ارزشمند برای اشتراک تجربه، انتقال دانش و ارائه راهکارهای عملی برای پیشگیری از خسارت‌های خوردگی فراهم آورد. امید است دستاوردهای این کنگره مسیر توسعه علمی و صنعتی کشور را روشن‌تر سازد و در دوره‌های آتی شاهد رویدادهای علمی پرثمرتر و اثرگذارتر باشیم.









فراخوان مقاله

نشریه علمی - پژوهشی

علوم و مهندسی خوردگی

(فصلنامه)

انجمن خوردگی ایران مفتخر است که در راستای نشر علم و دانش، دستاوردهای تحقیقاتی اساتید و دانشجویان دانشگاه‌ها و پژوهشگاه‌ها، محققان و پژوهشگران عرصه صنعت را در قالب مقالات علمی پژوهشی در نشریه "علوم و مهندسی خوردگی" منتشر نماید.

این نشریه تاکنون ۵۷ شماره را طی پانزده سال فعالیت منتشر نموده است

سرمدیر: آقای دکتر سعیدرضا اله کرم، استاد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

مدت زمان اعلام نتیجه مقاله: حداکثر ۴۵ روز
زمینه‌های مورد نظر برای پذیرش مقالات:

تمامی زمینه‌های مرتبط با خوردگی، الکتروشیمی و حفاظت از مواد: کنترل خوردگی شامل طراحی، انتخاب مواد، استفاده از رنگ و پوشش، استفاده از حفاظت‌های کاتدی و آندی، بازدارنده‌ها، نانو و بیومواد و کاربرد آنها در رابطه با خوردگی و حفاظت، جنبه‌های الکتروشیمیایی و مکانیزم‌های خوردگی، مدیریت خوردگی در صنایع، خوردگی و عوامل متالورژیکی، مکانیکی، میکروبی، محیطی، اکسیداسیون و خوردگی در دماهای بالا (خوردگی داغ)، ارزیابی و پایش خوردگی، آثار، اهنیه و اشیای تاریخی، شبیه‌سازی و مدل‌سازی در خوردگی، آنالیز تخریب ناشی از خوردگی و تخمین عمر، محیط زیست و ...

همچنین چاپ مقالات مروری نوشته شده توسط اساتید، محققان و پژوهشگران بنام در هریک از زمینه‌های یاد شده جزو اهداف نشریه است.

به منظور کسب اطلاعات بیشتر به سایت‌های زیر مراجعه کرده و یا با شماره‌های زیر تماس گرفته شود:

corrosionengineering.ica.ir

پایگاه اینترنتی فعلی نشریه

journal.ica.ir

پایگاه اینترنتی جدید نشریه (در دست بروزرسانی)

www.ica.ir

پایگاه اینترنتی انجمن خوردگی ایران

تلفن: ۸-۸۸۳۴۴۲۸۷-۰۲۱ (داخلی ۲)

به منظور تسریع در امر داوری مقاله لطفا:

۱: با مراجعه به سایت انجمن خوردگی ایران، مقاله دقیقا طبق دستورالعمل تهیه مقالات آماده و برای نشریه ارسال شود.

۲: همراه با مقاله، سه داور بنام در زمینه کار پژوهشی انجام شده با ذکر مشخصات (ایمیل، تلفن تماس، آدرس محل کار) نیز ارسال شود.

با مساعدت اعضای محترم هیات تحریریه نشریه، بازه زمانی دریافت مقاله کامل تا انجام داوری حداکثر ۴۵ روز خواهد بود.

مقاله

نحوه ارسال مقاله به انجمن خوردگی ایران

علاقه‌مندان می‌توانند مقالات خود را به هر یک از نشریات زیر با صاحب امتیازی انجمن خوردگی ایران ارسال نمایند:

- نشریه علمی و پژوهشی "علوم و مهندسی خوردگی"
- نشریه علمی، ترویجی و آموزشی "زنگ"

- فصلنامه علمی و پژوهشی "علوم و مهندسی خوردگی"

فصلنامه علمی پژوهشی علوم و مهندسی خوردگی با مجوز شماره ۹۰/۳/۱۱/۱۰۰۴ مورخ ۱۳۹۰/۱/۱۰ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری توسط انجمن خوردگی ایران به چاپ می‌رسد. این فصلنامه با هدف انتشار نتایج جدیدترین تحقیقات و پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه علم و مهندسی خوردگی فلزات منتشر می‌شود. فصلنامه علمی پژوهشی علوم و مهندسی خوردگی همواره از دریافت مقاله‌ها اساتید، صاحب‌نظران و دانشجویان استقبال کرده و به ارتقاء سطح دانش و فناوری مهندسی خوردگی در کشور می‌اندیشد. مقاله‌ها ارسالی باید دارای قالب مشخصی باشند. این مقاله‌ها باید طبق دستورنامه موجود در بخش راهنمای نگارش مقاله موجود در پایگاه اینترنتی مجله نوشته شوند.

سردبیر: دکتر سعیدرضا اله‌کرم
مدیر مسئول: دکتر هادی عادل‌خانی

پایگاه اینترنتی: www.corrosionEngineering.ica.ir

پست الکترونیک: CorrosionEngineering@ica.ir

شماره تماس: ۸ - ۸۷ ۴۲ ۳۴ (داخلی ۲)

- فصلنامه علمی، ترویجی و آموزشی "زنگ"

انجمن خوردگی ایران با هدف انتشار آخرین یافته‌های علمی کاربردی در جهت ارتقای سطح دانش خوردگی، گسترش تحقیقات و برقراری ارتباط هرچه بیشتر به‌منظور آشنایی مسئولان و صاحبان صنایع، اساتید دانشگاه‌ها، کارشناسان و پژوهشگران، نشریه انجمن را به‌صورت فصلنامه و به‌نام "زنگ" منتشر نموده است. به‌طور کلی انتشار نشریه زنگ اهداف مختلفی را بر مبنای رویکرد علمی (شامل ارتقای سطح علمی خوانندگان، برطرف نمودن سوالات و نیازهای تخصصی خوانندگان در مسائل مختلف خوردگی، بروز نگهداشتن اطلاعات خوردگی خوانندگان و تبادل تجربیات خوردگی)، رویکرد اطلاع‌رسانی (شامل اطلاع‌رسانی در سطوح داخلی و خارجی)، رویکرد انگیزشی و ترویجی، رویکرد ارتباطی و رویکرد توسعه‌ای دنبال می‌کند.

لازم به یادآوری است از آنجا که فصلنامه زنگ، یک مجله تخصصی علمی بوده و از سوی یک انجمن علمی به‌دست متخصصین می‌رسد، طبیعی است اهداف علمی آن غالب بر دیگر رویکردها باشد. دست‌اندرکاران فصلنامه زنگ درصدد هستند تا با افزودن بخش‌های مفید دیگر به بخش‌های قبلی، سطح کیفی آنرا ارتقاء بخشند.

مدیر مسئول: دکتر عماد رعایائی، سردبیر: مهندس احمدرضا بحرانی

پایگاه اینترنتی: www.ica.ir یا new.ica.ir، پست الکترونیک: info@ica.ir

شماره تماس: ۸ - ۸۷ ۴۲ ۳۴

بررسی مقاومت شیمیایی پوشش‌های ضد خوردگی از دیدگاه انرژی سطح

لیلا محمودی^{۱*}، امیر هژبر^۲

^۱ پسادکتری مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

^۲ شرکت مدیریت بهره‌برداری تولید برق فارس، شیراز، ایران.

^۳ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، شرکت البرز انرژی کارنو، شیراز، ایران.

amir.hozhabr@gmail.com

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: lm1367@yahoo.com

چکیده

انتخاب رنگ و پوشش مناسب در تجهیزات نیروگاهی همواره یکی از کاربردی‌ترین راهکارها برای مقابله با پدیده خوردگی به عنوان یکی از دغدغه‌سازترین مسائل صنعتی، در نظر گرفته می‌شود. در انتخاب انواع مختلف پوشش‌های سطحی، نیاز به بررسی‌های آزمایشگاهی و یا پایلوت‌های نیمه‌صنعتی است که علاوه بر هزینه، زمان زیادی هم برای بررسی عملکرد پوشش‌های متفاوت لازم است. از این رو، دیدگاهی نوآورانه بر اساس محاسبات انرژی سطح می‌تواند پیش‌بینی کند که پتانسیل خوردگی سطوح پوشش‌دهی شده مختلف تجهیزات در معرض محیط آبی شامل مواد شیمیایی متفاوت؛ که بعضاً به منظور کنترل پی‌اچ محیط آبی افزوده می‌شود، چگونه خواهد بود و با یکدیگر مورد مقایسه قرار گیرند. به بیان دیگر، مقاومت شیمیایی انواع مختلف پوشش‌های مورد بررسی می‌تواند با دو پارامتر ترشوندگی و نرخ خوردگی توسط علم انرژی سطح مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین ترتیب، تمرکز این مقاله بر چگونگی کاربرد علم انرژی سطح برای ارزیابی مقاومت شیمیایی پوشش‌های ضد خوردگی است.

واژه‌های کلیدی: انرژی سطح، ترشوندگی، پوشش، خوردگی، محاسبه، نرخ خوردگی؛

۱- مقدمه

خوردگی یک فرآیند بسیار نامطلوب است چرا که به تجهیزات فلزی مورد استفاده در قسمت‌های مختلف نیروگاه آسیب می‌رساند و منجر به تخریب تدریجی آن‌ها می‌شود. از این رو، اخیراً انواع مختلفی از پوشش‌های ضد خوردگی مورد تحقیق و توسعه قرار داده شده‌اند به طوری که این پوشش‌ها از تماس مواد با محیط خورنده مانند محلول‌های آبی جلوگیری می‌کنند.

به طور معمول، خوردگی الکتروشیمیایی زمانی اتفاق می‌افتد که یک سطح فلزی در تماس با محلول رسانی الکتریکی به نام الکترولیت اکسایش می‌یابد. یک الکترولیت معمولی که در مطالعات خوردگی استفاده می‌شود، محلول آبی ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلرید است که رسانایی الکتریکی آن برابر با ۳/۵ زیمنس بر متر است [۱]. سطح آبگریز یا فوق آبگریز به عنوان وسیله‌ای برای مهار خوردگی، سطح مشترک غیرهمگن این الکترولیت و سطح فلزی را کاهش می‌دهد. ساخت یک سطح فلزی فوق آبگریز یک کار چالش برانگیز است. اصولاً، ترکیبی پایدار از یک پوشش سطحی کم انرژی با جزئیات زبری معین مورد نیاز است. نوع نسبتاً جدیدی از پوشش‌ها که آب و محلول‌های آبی را دفع می‌کنند، پوشش‌های فوق آبگریز هستند که خاصیت مرطوب‌کنندگی یک ماده را تغییر می‌دهد. علاوه بر ضد آب بودن، سطوح فوق آبگریز دارای کاربردهای نوظهور بسیاری مانند خود تمیز شوندگی، کاهش کشش در جریان آب، ضد رسوب و غیره هستند. اگرچه مطالعات کمی در مورد مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی غیراساسی درگیر یا کاربردهای بالقوه برای مواد آب شیرین وجود دارد، اخیراً تعدادی از مطالعات تجربی در مورد اینکه چگونه آب‌گریز بودن می‌تواند خوردگی را کاهش دهد، منتشر شده‌اند [۲].

برای تعیین عملکرد یک سطح فوق آبگریز در یک محیط خورنده تهاجمی، نیاز به تعیین مقاومت در برابر خوردگی و همچنین تخریب به دلیل قرار گرفتن در معرض طولانی مدت دارد. همچنین ویژگی‌های زبری سطح و پوشش‌ها باید در برابر سایش مکانیکی مقاومت کنند.

چنانچه در این مقاله بر می‌آید؛ هدف بررسی مقاومت شیمیایی پوشش‌های سطحی ضدخورنده مختلف با استفاده از علم انرژی سطح است. این تئوری بر آن است که با صرف مدت

زمان حداقلی و کمترین هزینه انجام آنالیزهای آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی به بررسی مقاومت شیمیایی پوشش‌ها در مقابل پدیده خوردگی بپردازد، هرچند که برای انتخاب یک پوشش در صنعت، نیاز به بررسی فاکتورهای دیگر از جمله مقاومت حرارتی، مقاومت مکانیکی و فشاری، ماندگاری و چسبندگی پوشش نیز می‌باشد.

۲- تئوری انرژی سطح

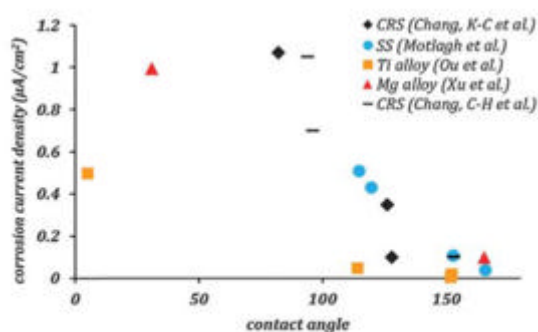
زاویه تماس^۱ پارامتر اصلی است که میزان خیس شدن یک سطح جامد توسط یک مایع، معمولاً آب، را مشخص می‌کند. سطوح آب‌دوست دارای زاویه تماس آب کمتر از ۹۰ درجه هستند؛ در حالی که سطوح آبگریز دارای زاویه تماس آب بیشتر از ۹۰ درجه هستند. برای یک سطح همگن ایده آل، زاویه تماس تعادلی (θ_0) یک قطره مایع (مثلاً آب) توسط معادله ۱ به دست می‌آید [۳]. که به معادله یانگ مشهور است.

$$\cos \theta_0 = \frac{\gamma_{SA} - \gamma_{SW}}{\gamma_{WA}} \quad (1)$$

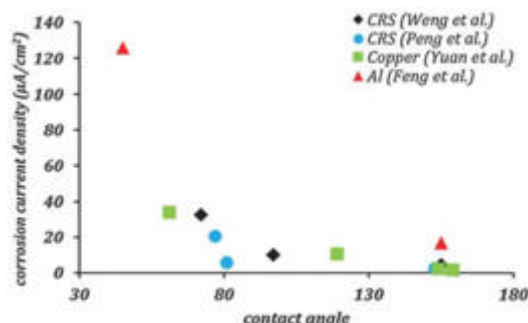
که در آن γ_{WA} و γ_{SA} ، γ_{SW} به ترتیب انرژی آزاد سطح جامد - هوا، جامد - آب و آب - هوا هستند. اما در سطوح واقعی، که ناهموار و ناهمگن هستند، قطعاً زاویه تماس با مقدار تعادلی آن متفاوت است. اثر زبری و ناهمگنی شیمیایی بر روی زاویه تماس در دو مدل معروف به نام‌های مدل ونزل^۲ و کسی - باکستر^۳ گنجانده شده است.

با توجه به مدل ونزل، زاویه تماس موثر (θ_w) یک سطح ناهموار از معادله (۲) به دست می‌آید، که در آن فاکتور زبری (R_f) را نسبت سطح جامد به سطح مقطع تصویر شده آن تعریف می‌کند. در معادله ونزل، سطح زیر قطره کاملاً توسط مایع خیس می‌شود و یک سطح مشترک همگن جامد - مایع ایجاد می‌کند. در حالی که مدل کسی - باکستر توضیح می‌دهد که چگونه ناهمگنی‌های سطحی بر خیس شدن تأثیر می‌گذارد. اگر حفره‌های سطح حفره‌هایی از هوا را در خود جای دهند، زاویه تماس با معادله کسی - باکستر به صورت معادله (۳) نشان داده می‌شود که در آن فاکتور زبری برای سطح خیس مد نظر قرار می‌گیرد و f_{SL} که مقداری بین صفر تا یک دارد،

می شود. خوردگی موثر سطوح مقاوم نه تنها به زوایای تماس بزرگ، بلکه به حداقل سطح مشترک جامد - مایع نیاز دارند.



الف



ب

شکل ۱: چگالی جریان خوردگی بر حسب زاویه تماس از مطالعات اخیر [۱]

خواص ترشوندگی و الکترواستاتیکی در یک سطح مشترک با معادله موسوم به لیپمن^۳ به هم مرتبط می شوند که زاویه تماس در سطح مشترک جامد - مایع را با ولتاژ اعمالی Z مرتبط کرده و توسط معادله (۴) به دست می آید. به طوری که C ظرفیت ویژه الکتریکی در واحد سطح لایه دوگانه الکترواستاتیکی^۴ سطح مشترک است [۶].

$$\cos \theta^* = \cos \theta_0 + \frac{CZ^2}{2\gamma_{WA}} \quad (4)$$

لازم به ذکر است که اثر پتانسیل الکتریکی اعمال شده به سطح مشترک بر روی انرژی سطح و زاویه تماس تعادلی، مشابه اثرات زبری و ناهمگنی (معادلات ۲ و ۳) است. مطابق با اصل لوشاتلیه، می توان انتظار داشت که تغییر خواص ترشوندگی منجر به تغییرات قابل توجهی در پتانسیل خوردگی شود که به نوبه خود می تواند منجر به تغییر در جریان خوردگی و در نهایت نرخ

سطح مشترک کسری جامد - مایع است [۴].

$$\cos \theta_w = R_f \cos \theta_0 \quad (2)$$

$$\cos \theta_{CR} = R_f f_{SL} \cos \theta_0 = 1 + f_{SL} \quad (3)$$

توجه داشته باشید که معادله (۳) تنها زمانی اعمال می شود که حفره های سطحی، هوا را در خود جای دهند و مایعی به داخل حفره ها نفوذ نکند، که برای اکثر موارد چنین است. در این حالت، سطح مشترک زیر قطره غیرهمگن است که شامل فازهای جامد، آب و هوا می باشد. اعتقاد بر این است که بالاترین زاویه تماس ممکن در هر جامد صاف ۱۱۹ درجه است، بنابراین، فقط یک سطح ناهموار ممکن است زوایای تماس بزرگتری داشته باشد. این خیس شدن غیرهمگن سطح زمانی رخ می دهد که زاویه تماس بزرگتر از $\cos^{-1}(\frac{f_{SL}}{R_f - f_{SL}})$ باشد.

در تعریف حالت هیستریسیس^۱ برای زاویه تماس که تفاوت بین حداکثر زاویه تماس (زاویه تماس در حال پیشروی، به عنوان مثال؛ در مقابل یک قطره متحرک) و حداقل زاویه تماس (زاویه تماس در حال عقب نشینی، به عنوان مثال؛ در پشت یک قطره متحرک) پارامتر CAH تعریف و برای مشخص کردن چسبندگی مایع به یک سطح مشخص استفاده می شود [۵]. سطوحی که دارای زاویه تماس آب بیشتر از ۱۵۰ درجه و CAH بسیار کم (کمتر از ۱۰ درجه) هستند، فوق آب گریز نامیده می شوند.

شکل ۱ چگالی جریان خوردگی^۲ بر حسب میکروآمپر بر سانتی متر مربع را به عنوان تابعی از زاویه تماس بر اساس داده های مشابه نشان می دهد. در شکل ۱ - الف این وابستگی برای موادی با تمایل به خوردگی کم در حالت اصلی خود نشان داده شده است، در حالی که شکل ۱ - ب داده ها را برای مواد با تمایل بالا به خوردگی در حالت اصلی خود نشان می دهد. در تمام این موارد، چگالی جریان خوردگی به محض اینکه زاویه تماس بیشتر از ۹۰ درجه شد، به طور قابل توجهی کاهش یافت که نشان می دهد آبریزی منجر به مهار خوردگی می شود. کاهش بیشتر در چگالی جریان خوردگی با ایجاد حفره های هوای پایدار در حالت کسی - باکستر مشاهده

۲-۱-۳- نرخ خوردگی و انرژی آزاد سطح

از تئوری واکنش مطلق، سرعت اکسیداسیون مولکول‌های فلز را می‌توان با رابطه معروف $r = \frac{kT}{h} \exp(-\frac{\Delta G}{RT})$ تخمین زد، جایی که r سرعت واکنش (s/l)، k ثابت بولتزمن، h ثابت پلانک و ΔG انرژی اکتیواسیون یا فعال‌سازی می‌باشد. انرژی فعال‌سازی برای یک واکنش خوردگی فلز را می‌توان به صورت معادله (۷) بیان کرد به طوری که G_O^0 و G_R^0 به ترتیب انرژی آزاد حالت اکسید شده و فلز است.

$$\Delta G^0 = G_O^0 - G_R^0 \quad (7)$$

اگر سطح فلز به طور ایده‌آل صاف نباشد و در عوض از ناصافی‌های سطحی تشکیل شده باشد، اکسیداسیون کامل سطح فرض می‌شود و نرخ خوردگی در نهایت از معادله (۸) محاسبه می‌شود در حالی که r_0 نرخ واکنش خوردگی برای سطح صاف ایده‌آل است [۷].

$$r = r_0 \exp\left(-\frac{\gamma \Delta r_f (1 - f_{SL})}{RT}\right) \quad (8)$$

وقتی که:

$$\Delta G^* = (G_O^0 + \gamma \Delta r_f) - (G_R^0 + \gamma \Delta r_f f_{SL}) \quad (9)$$

مجدداً می‌توان با در نظر گرفتن معادله کسی - باکستر دریافت که سرعت واکنش خوردگی با افزایش زاویه تماس کاهش می‌یابد و افزایش زبری سطح موجب کاهش سرعت واکنش می‌شود. نتیجه اصلی این بخش آن است که ناهمگن کردن سطح الکتروود و سطح مشترک آن با الکترولیت یک مکانیسم جفت‌کننده برای خواص ترشوندگی و خوردگی فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، هم افزایش زبری سطح و هم کاهش سطح تماس جامد-مایع (الکتروود-الکترولیت)، به طور همزمان بر انرژی سطح موثر و سرعت خوردگی تأثیر می‌گذارند [۸].

۳- روش آزمایشگاهی و کاربردی در صنعت

برای بررسی بیشتر ارتباط نرخ خوردگی و ترشوندگی می‌توان

خوردگی گردد. در ادامه به اصول اساسی ترشوندگی و رابطه‌ی آن با نرخ خوردگی پرداخته می‌شود.

۲-۱-۲- مدل‌سازی تئوری

در این بخش، چگونگی تأثیر تغییر خواص ترشوندگی با اصلاح زبری سطح در حالت‌های ونزل و کسی - باکستر بر نرخ خوردگی بحث می‌شود. ابتدا مشخص می‌شود که چگونه ناحیه تماس جامد و مایع و زبری سطح بر جریان الکتریکی در حالت کسی - باکستر مطابق با قانون اهم تأثیر می‌گذارد. سپس، نرخ خوردگی با استفاده از قانون الکترولیز فارادی به جریان مرتبط می‌شود و در نهایت، اعمال معادله نرنست برای ارتباط دادن نرخ خوردگی با انرژی سطحی ناشی از کاهش پتانسیل شیمیایی صورت می‌پذیرد.

۲-۱-۱- قانون اهم و ترشوندگی

تماس قانون اهم ($E=IR$) رابطه بین پتانسیل سطحی (E) و جریان (I) را با مقاومت بین سطحی (R) ارائه می‌دهد. مقاومت با سطح مشترک جامد - مایع (A_{SL}) نسبت معکوس دارد (معادله ۵). به عبارتی می‌توان گفت:

$$I \propto A_{SL} \propto r_f f_{SL} \quad (5)$$

به عبارتی می‌توان گفت که با کاهش مقدار f_{SL} ، جریان در سراسر ماده (سطح فلزی مورد نظر در پدیده خوردگی) کاهش می‌یابد. این تئوری کاهش زیادی در جریان خوردگی با کاهش سطح مشترک جامد - مایع پیش‌بینی می‌کند. بنابراین، ایجاد یک سطح آبگریز پایدار می‌تواند به طور قابل توجهی خوردگی را کاهش دهد.

۲-۱-۲- قانون فارادی الکترولیز و خواص ترشوندگی

جرم ماده خورده شده در واکنش‌های خوردگی با قانون فارادی بر اساس معادله (۶) محاسبه می‌شود که در آن A معادل وزن اتمی ماده خورنده، t زمان خوردگی، Z تعداد الکترون‌های منتقل شده در واکنش خوردگی است [۱].

$$m = \frac{A i_{corr} t}{ZF} \pi r^2 \quad (6)$$

اندازه‌گیری حجم مشخص قطره سیال آب روی مکان‌های متفاوت از سطح مورد بررسی ریخته شده و زاویه تماس میانگین گزارش می‌شود. به علاوه، برخی دستگاه‌ها قابلیت اندازه‌گیری و محاسبه CAH را نیز دارند. به منظور اندازه‌گیری زبری سطح و نیز دستگاه‌هایی در آزمایشگاه موجود است که یکی از آن‌ها Mitutoyo, SURFTEST SJ-210, Japan است که در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۲: دستگاه آنالیز شکل قطره



شکل ۳: دستگاه زبری سنج

۴ - ۴ - تست پلاریزاسیون پتانسیودینامیک^۱

رفتار خوردگی نمونه کوپن‌ها با استفاده از روش تست پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. یک سیستم استاندارد سه الکترودی با نمونه به عنوان الکتروکاتود کار، کلومل اشباع به عنوان الکتروکاتود مرجع و پلاتین به عنوان الکتروکاتود مقابل استفاده می‌شود. سپس یک پتانسیواستات با نرم افزار مشخص برای بررسی ولتاژ و جمع‌آوری داده‌ها استفاده می‌شود. الکترولیت در این روش می‌تواند یک محلول از نمک طعام ۳/۵ درصد وزنی باشد که نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در تماس با الکترولیت قرار بگیرند تا به پتانسیل مدار باز برسند. سپس می‌توان با مدل‌سازی و داده‌های حاصل، مقدار نرخ خوردگی و یا پتانسیل خوردگی را بررسی کرده و تخمین زد.

آزمایش‌های متعددی بر روی مواد فلزی انجام داد. لازم به ذکر است که مطالعات [۸ و ۹] نشان داده است که از بین جنس‌های مختلف لوله‌های در معرض آب، هرچند چدن با سرعت قابل توجهی در معرض خوردگی قرار می‌گیرد اما راحت‌تر می‌تواند آب‌گریز شود. برای این منظور روشی در این بخش تشریح می‌شود که می‌توان خوردگی و ترشوندگی را بررسی کرد.

۳ - ۱ - زبر کردن سطح

ابتدا کوپن‌های مربعی ۲۵ میلی‌متری با ضخامت تقریباً ۶ میلی‌متر آماده شوند. شماره‌گذاری برای هر دو دسته نمونه‌های کوپن بدون پوشش و با پوشش‌های مختلف صورت می‌گیرد. سطوح به روشی که در ادامه توضیح داده می‌شود، زبر شده و سپس نمونه‌ها به روش اولتراسونیک در آب و سپس در اتانول تمیز شده و سپس در هوا خشک می‌شوند.

برای زبر کردن کوپن‌ها، یک مجموعه از نمونه‌ها با استفاده از کاغذهای سیلیکون کاربرد به صورت مکانیکی ساییده و سپس با یک پارچه نرم آغشته به ذرات آلومینا ۳ میلی‌متری پرداخت می‌شود تا سطح صافی به دست آید. مجموعه‌ی دیگر با استفاده از کاغذ کاربرد سیلیکون برای به دست آوردن یک سطح ناهموار ساییده می‌شود و مجموعه سوم با سنبلاست به مدت ۳۰ ثانیه برای به دست آوردن یک سطح بسیار ناهموار زبر می‌شود.

۳ - ۲ - پوشش‌دهی آب‌گریز

پس از زبر کردن نمونه‌ها، آن‌ها به مدت دو ساعت در محلول اسید استیک ۳۶٪ غوطه‌ور شده و سپس در محلول هیدروژن پراکسید ۱۵٪ به مدت سه ساعت قرار می‌گیرند. پس از آن، نمونه‌ها در محلول ۰/۰۱ مولار استتاریک اسید در اتانول به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور می‌شوند. سپس نمونه‌ها از محلول خارج گردیده و در هوا خشک می‌شوند. لازم به ذکر است که برای بررسی آن که آیا آب‌گریزی توسط تک‌لایه‌ها می‌تواند خوردگی را مهار کند از پوشش استتاریک اسید استفاده می‌شود.

۳ - ۳ - اندازه‌گیری زاویه تماس و زبری سطح

دستگاه و نرم‌افزارهای مختلفی برای اندازه‌گیری زاویه تماس آب بر روی سطوح مختلف وجود دارد. یکی از معمول و رایج‌ترین آن‌ها دستگاه آنالیز شکل قطره (Kruss-DSA 100, Germany) است که تصویر آن در شکل (۲) آمده است [۹ و ۱۰]. در این

نتیجه‌گیری

تمرکز این مقاله در مورد اصول خوردگی و ترشوندگی بر اساس علم انرژی سطح و همچنین مکانیسم‌هایی که منجر به همبستگی آن‌ها با پدیده‌ی فوق آبگریزی می‌شود بوده است به طوری که ابتدا داده‌های تست خوردگی از مطالعات اخیر برای برجسته کردن روند مشاهده‌شده در پارامترهای مرتبط با خوردگی گردآوری شد. سپس، روند کار آزمایشگاهی و کاربردی این مدل‌سازی در مطالعات پوشش‌های آب‌گریز به منظور تعیین مقاومت شیمیایی آن‌ها در مقابل پدیده خوردگی ارائه شده است. اهم نتایج به شرح زیر است:

– نتایج مطالعات پیشین در پرتوی قانون لوشاتلیه و داده‌های جمع‌آوری‌شده حاکی از آن است که آب‌گریز شدن سطح موجب کاهش پتانسیل خوردگی سطح می‌شود.

– یک پوشش فوق آب‌گریز ایده‌آل برای جلوگیری از خوردگی باید دو شرط را برآورده کند: باید بتواند تحت فشار در برابر انتقال کسی – باکستر به وزنل مقاومت کند و باید مسیری پر پیچ و خم را با پارامتر زبری، برای عوامل خورنده که سعی در حمله به سطح فلزی دارند فراهم کند. به عبارت دیگر، هم افزایش زبری سطح و هم کاهش سطح تماس جامد – مایع (الکترو – الکترولیت)، به طور همزمان بر انرژی سطح موثر و سرعت خوردگی تأثیر می‌گذارند.

– در نهایت، وجود یک سطح مشترک غیرهمگن پایدار و کاهش قابل توجه چگالی جریان خوردگی بدان معناست که پوشش مورد بررسی در صنعت آب کاربردهایی مانند خطوط لوله آب، گنج‌ها، پروپ‌ها و غیره پیدا می‌کند.

مراجع

- [1] R. Ramachandran and M. Nosonovsky; Coupling of surface energy with electric potential makes superhydrophobic surfaces corrosion-resistant, *Phys. Chem. Chem. Phys. Journal*, Vol. 17, 2015, pp. 24988- 24997.
- [2] M. F. Montemor, Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances, *Surf. Coat. Technol. Journal*, Vol. 258, 2014, pp. 17–37.
- [3] R. Tadmor, Line energy and the relation between advancing, receding, and young contact angles, *Langmuir Journal*, Vol. 20, 2004, pp. 7659–7664.
- [4] K. L. Cho, A. H. Wu, I. I. Liaw, D. Cookson and R. N. Lamb, Influence of Roughness on a Transparent Superhydrophobic Coating, *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 114, No. 25, 2010, pp. 11228-11233.
- [5] L. Feng, Y. Zhang, J. Xi, Y. Zhu, N. Wang, F. Xia and L. Jiang, Petal Effect: A Superhydrophobic State with High Adhesive Force, *Langmuir Journal*, Vol. 24, No. 8, 2008, 4114–4119.
- [6] K. Liu, M. Zhang, J. Zhai, J. Wang and L. Jiang, Bioinspired construction of Mg–Li alloys surfaces with stable superhydrophobicity and improved corrosion resistance, *Journal of Applied Physics Letters*, Vol. 92, 2008, 183103.
- [7] A. B. D. Cassie and S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *Transactions of the Faraday society*, Vol. 40, 1944, pp. 546-551.
- [8] J. Tan; J. Hao; Z. An; Ch. Liu, Simple Fabrication of Superhydrophobic Nickel Surface on Steel Substrate via Electrodeposition, *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 12, No. 1, 2017, pp. 40-49.
- [9] L. Mahmoodi, M. R. Malayeri, F. Farshchi Tabrizi, H. Aghaei, Mitigation of Mineral Deposition in Carbonate and Sandstone Rocks Using Green Scale Inhibitors, *Langmuir Journal*, Vol. 38, No. 5, 2022, pp. 1797-1810.
- [10] L. Mahmoodi, M. R. Malayeri, F. Farshchi Tabrizi, Abatement of scale precipitation in oil-fields using green scale inhibitors, *Vol. 208*, 2022, pp. 109237.

بررسی پارامترهای موثر بر خوردگی آلیاژ پایه نیکل (Ni200) در محیط قلیایی

حامد پرویزی

شرکت نیروکالر، رئیس بازرسی فنی

*پست الکترونیک: prvzhmed@gmail.com



چکیده

به منظور انجام پژوهش یکی از پروانه‌های از جنس Ni200 که دارای خوردگی دهانه ورودی مواد است را انتخاب و از قسمت خورده شده و بخش سالم آن، نمونه‌برداری گردید. سه نمونه جهت آزمایش پلاریزاسیون برشکاری شده و در دماهای مختلف جهت بررسی آزمون‌های پلاریزاسیون قرارداد شد. سپس بر روی نمونه‌ها و نمونه خورده شده آنالیزهای SEM و XRD انجام شد. نتایج SEM نشان داد که حفرات متعدد و بزرگی بر روی سطح ایجاد شده است که اندازه متوسط آن‌ها حدود ۹/۵nm است. وجود این حفرات بیانگر آن است که در کنار خوردگی عمومی که تمام سطح نمونه غوطه‌ور در محلول خورنده را درگیر کرده است، خوردگی حفره‌ای نیز رخ داده است. همچنین تصاویر SEM نشان داد که افزایش دمای محلول تا ۵۰°C باعث تشدید شرایط خوردگی شده و ناحیه خورده شده را بیشتر کرده است. نتایج طیف‌سنجی XRD، وجود فاز شاخص نیکل به عنوان جزء اصلی تشکیل دهنده هر سه نمونه را نشان داد. در همه نمونه‌ها مشاهده شد که پس از نمونه واقع شده در دمای ۲۵°C، نمونه قرار گرفته در دمای ۴۰°C شدت پیک نیکل کمتری نشان می‌دهد که دلیل این امر تشکیل یک لایه نازک اکسید نیکل بر روی سطح این نمونه است. همچنین در دمای ۵۰°C، به دلیل دمای بالاتر و وابستگی فرآیند نفوذ به دما، مشخص شد که لایه پسیو تشکیل شده کمترین ضخامت و تراکم را نسبت به دو نمونه دیگر دارد. بنابراین، تعداد فوتون‌های پرتوایکس بیشتری از روی صفحات نیکل بازتاب نموده و شدت پیک‌های مربوط به ساختار نمونه واقع در دمای ۵۰°C، از دو نمونه دیگر بیشتر است. نتایج آزمون امپدانس نشان داد که مقاومت نمونه‌ها با افزایش دمای غوطه‌وری کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش ضخامت پوشش نازک اکسید نیکل تشکیل شده بر روی سطح با افزایش دمای غوطه‌وری است. نتایج آزمون امپدانس نشان داد که برخلاف نمونه غوطه‌ور در دمای ۲۵°C که در آن سرعت خوردگی از دو نمونه دیگر به طور مشهودی کمتر بود (۰/۰۰۸۹ میلی‌متر در سال)، در دو نمونه دیگر سرعت خوردگی نزدیک به هم بوده و سرعت خوردگی برای نمونه‌های غوطه‌ور در دمای ۴۰ و ۵۰°C به ترتیب برابر با ۰/۰۲۰۳ و ۰/۰۲۲۹ میلی‌متر در سال به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: ترک خوردگی تنش، آلیاژ پایه نیکل، محلول قلیایی، سودسوزآور، خوردگی، پمپ انتقال.

۱- مقدمه

عنصر نیکل با نماد شیمیایی Ni و عدد اتمی ۲۸ در گروه VII و دوره چهارم جدول تناوبی قرار گرفته است. از ویژگی‌های این عنصر مقاوم می‌توان به ساختار بلورین و مکعبی شکل، رنگ سفید و نقره‌ای براق، چکش‌خواری، قابلیت انعطاف و هادی جریان الکتریسیته بودن آن اشاره نمود. این عنصر به دلیل اینکه از گروه عناصر آهن و کبالت است از نظر خواص مغناطیسی و فعالیت شیمیایی شباهت زیادی به آن‌ها دارد. نیکل کاربردهای فراوانی در طبیعت دارد و در صنایع مختلف نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. پمپ وسیله‌ای مکانیکی است که جهت انتقال سیال از ارتفاع پایین به ارتفاع بالاتر و یا انتقال آن از منطقه کم‌فشار به منطقه پرفشار مورد استفاده قرار می‌گیرد. پمپ‌های سانتریفیوژ بر اساس نیروی گریز از مرکز کار می‌کنند. قطعات این پمپ‌ها شامل پروانه، شفت، حلزونی و ... است. مکانیزم کار پمپ‌های سانتریفیوژ به این گونه است که شفت باعث انتقال قدرت بین موتور محرک به پروانه می‌شود. پروانه انواع مختلفی از جمله باز، بسته و نیمه‌باز دارد و با حرکت دورانی حول شفت، انرژی مکانیکی را به جنبشی تبدیل می‌کند. افزایش انرژی جنبشی باعث جدا شدن سیال از لبه پروانه وارد شدن آن به محفظه حلزونی می‌شود. جنس پروانه پمپ با در نظر گرفتن سیال و مکانیسم‌های تخریب از جمله خوردگی شیمیایی، سایش و ... انتخاب می‌شود [۲].

سدیم هیدروکسید^۱ یا سود سوزآور^۲ ترکیبی با فرمول شیمیایی NaOH است. کاربردهای این ماده در صنایع تولید آلومینیوم، تولید انواع سیلیکات سدیم، صنایع تولید پودرهای شوینده و مایعات ظرف‌شویی، روغن نباتی، چرم‌سازی، فرآورده‌های معدنی، تولید الیاف ویسکوز، صنایع غذایی، تولید پرکلرین، تولید آب ژاول و انواع مشتقات معدنی و آلی سدیم، صنایع تولید PVC و عامل چربی‌زدا و تمیزکننده سطوح ولوله‌های چرب، فرآوری زیتون است. این ماده یک ترکیب یونی سفیدرنگ است، این ترکیب در تماس با پوست می‌تواند سوختگی شیمیایی شدید ایجاد کند. سدیم هیدروکسید به شدت در آب انحلال‌پذیر بوده و به راحتی رطوبت و کربن دی اکسید موجود در هوا را جذب می‌کند.

پدیده خوردگی واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده، معمولاً یک فلز و محیط اطراف آن است که به تغییر خواص ماده منجر خواهد شد. پدیده خوردگی در تمامی دسته‌های اصلی مواد،

شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد، اما وقوع آن در فلزات آن قدر شایع و فراگیر بوده و اثرات مخربی به جای می‌گذارد که هرگاه صحبت از خوردگی به میان می‌آید، ناخودآگاه خوردگی یک فلز به ذهن متبادر می‌شود.

۱-۱- خوردگی آلیاژهای پایه نیکل

نیکل مقاومت خوبی در برابر خوردگی جو، آب‌های شیرین طبیعی، اسیدهای غیر اکسیدکننده و مواد قلیایی دارد. این آلیاژها مقاومت به خوردگی خوبی در برابر اسیدهای غیر اکسیدکننده دارند. آلیاژهای نیکل حاوی ۳۰ تا ۴۹ درصد مس، مقاومت بالایی در برابر اسید سولفوریک (H_2SO_4) و اسید هیدروفلوئوریک (HF) دارند. افزودن ۲ تا ۳ درصد مس به آلیاژهای نیکل کروم مولیدن آهن مقاومت آلیاژ را در برابر اسید کلریدریک (HCl)، اسید سولفوریک و اسید فسفریک (H_3PO_4) بهبود می‌بخشد.

وجود کروم در آلیاژهای پایه نیکل مقاومت آلیاژ را در برابر محیط‌های اکسیدی مانند اسید نیتریک (HNO_3) و اسید کرومیک (H_2CrO_4) افزایش می‌دهد. علاوه بر این، کروم باعث افزایش مقاومت در برابر اکسیداسیون آلیاژهای پایه نیکل در دماهای بالا می‌شود.

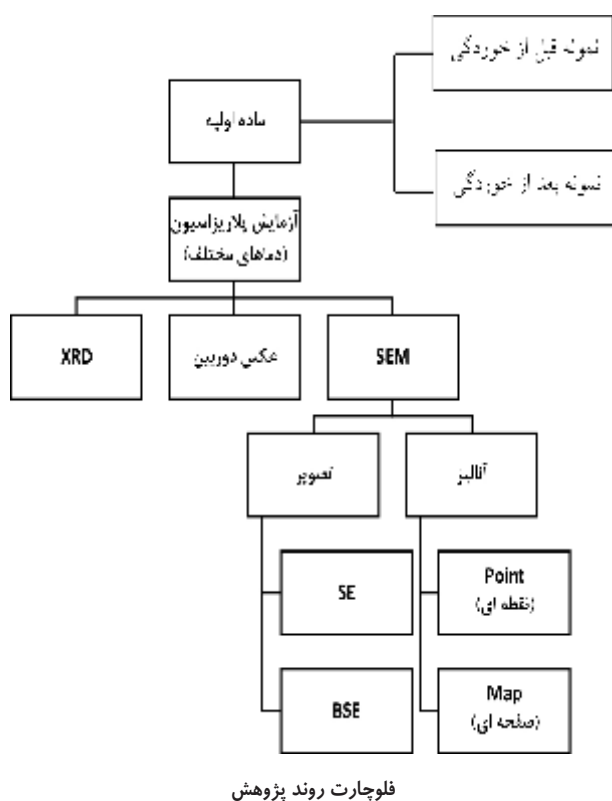
در آلیاژهای پایه نیکل از عنصر آهن به منظور صرفه جویی در هزینه‌ها استفاده می‌شود. آهن در غلظت‌های بالاتر از ۵۰ درصد مقاومت به خوردگی نیکل را در برابر اسید سولفوریک بهبود می‌بخشد.

مولیدن مقاومت نیکل در برابر اسیدهای غیر اکسیدکننده را افزایش می‌دهد. آلیاژهای پایه نیکل حاوی ۲۸ درصد مولیدن، در برابر محلول‌های غیر اکسیدکننده مانند HF، H_3PO_4 ، HCl و H_2SO_4 (غلظت‌های زیر ۶۰ درصد) مقاومت خوبی دارند. علاوه بر این، مولیدن خوردگی شکافی و حفره‌ای آلیاژهای پایه نیکل را بهبود می‌بخشد. کبالت باعث بهبود عملکرد آلیاژهای نیکل در دماهای بالا می‌شود. کبالت خوردگی اتمسفری نیکل و آلیاژهای آن را بهبود می‌بخشد. افزودن کروم و مولیدن، خوردگی حفره‌ای آلیاژهای پایه نیکل را کاهش می‌دهند.

۱-۲- بیان مسئله و اهمیت انجام تحقیق

با توجه به این که نیکل و آلیاژهای آن در صنایع مختلف از

دمای پایین‌تر در سیستم باعث شد که به فرضیه تأثیر دما بر روی نرخ رشد خوردگی در پروانه پمپ P-1305 رسیده و این پژوهش در راستای بررسی پارامتر دما شکل بگیرد. به‌منظور انجام پژوهش یکی از پروانه‌های از جنس Ni200 که دارای خوردگی دهانه ورودی مواد است را انتخاب و از قسمت خورده شده و بخش سالم آن، نمونه‌برداری گردید. سه نمونه جهت آزمایش پلاریزاسیون برشکاری شده و در دماهای ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد تحت آزمون قراردادده شد. سپس نمونه‌ها به‌علاوه نمونه خورده شده در شرایط و محیط واقعی به‌منظور انجام عکس‌برداری و آنالیز الکترون روبشی اقدام گردید. فلوجارت روند پژوهشی در این کار به صورت زیر است.



۲-۲- مشخصات مواد مورد استفاده

۱-۲-۲- نیکل Ni200

نیکل ۲۰۰ حداکثر دمای ۶۰۰ درجه فارنهایت (۳۱۵ درجه سانتی‌گراد) را تحمل می‌کند؛ و در برابر خوردگی‌های ناشی از سود سوزآور (سدیم هیدروکسید) و همچنین مواد قلیایی مقاومت فوق‌العاده‌ای دارند. از طرف دیگر، این آلیاژ در برابر خوردگی‌های ناشی از آب طبیعی و جریان آب دریا مقاومت می‌کنند، اما توسط آب دریا که به‌صورت بی‌حرکت و راکد است، خورده می‌شوند. جدول ۱ ترکیب شیمیایی برای نیکل

جمله صنایع شیمیایی استفاده گسترده‌ای دارد بنابراین، بررسی مقاومت به خوردگی و عوامل موثر بر سرعت خوردگی آن حائز اهمیت فراوانی است. همچنین بررسی اقداماتی که منجر به کنترل خوردگی نیکل و آلیاژهای آن می‌شود، در صنایع بسیار مهم است. خوردگی با سود سوزآور از جمله خوردگی است که برای بویلرها از جنس نیکل در صنایع رخ می‌دهد. هدف از این پژوهش بررسی رفتار خوردگی آلیاژ پایه نیکل (Ni200) در محلول‌های سود سوزآور مربوط به پروانه پمپ‌های انتقال سود سوزآور در محدوده غلظت ۳۰ تا ۶۰ درصد در محدوده دمایی بالا است. از آنجایی که تغییرات دما بر نرخ خوردگی تأثیر بسیاری دارد لذا، در این پژوهش اثر تغییر دما بر روی نرخ خوردگی آلیاژ پایه نیکل مورد بررسی قرار خواهد گرفت و نهایتاً دمای بهینه به‌منظور کاهش نرخ خوردگی گزارش خواهد شد.

۲- روش و روش تحقیق

۱-۲- پیشگفتار

این مقاله با هدف پژوهش کاربردی که به‌منظور بهبود رفتارها، روش‌ها، ابزارها، وسایل، تولیدات، ساختارها و الگوهای مورد استفاده جوامع انسانی انجام می‌گیرد از نتایج تحقیقات بنیادی و میدانی کمک گرفته و هدف آن توسعه دانش کاربردی در زمینه خوردگی نیکل Ni200 در محیط سود سوزآور ۳۳ درصد است. پس از بررسی رفتار نیکل Ni200 در پمپ‌های سود سوزآور با مطالعه مقاله آقای زعفرانی و همکاران در پژوهشی با موضوع بررسی رفتار خوردگی الکتروکود نیکل در محلول NaOH و مهار آن مشخص شد نیکل یکی از فلزات مهم در صنعت است که بررسی رفتار خوردگی آن همانند فلز آهن حائز اهمیت است. خوردگی و رفتار آندی نیکل در محلول‌های اسیدی، خنثی و قلیایی به‌منظور بهبود فرآیندهای ماشین‌کاری شیمیایی نیکل و آلیاژهای آن دارای کاربردهای متداول شامل تولید فولاد زنگ نزن و سایر فلزات مقاوم در برابر خوردگی حاوی نیکل است. نیکل همچنین در آבקاری الکتروفرمینگ و پوشش‌های فلزی متخلخل استفاده می‌شود. مقاومت به خوردگی نیکل به دلیل محیط خوردگی است با این وجود، نیکل می‌تواند توسط رسانه‌های قلیایی به میزان قابل‌توجهی موردحمله قرار گیرد؛ بنابراین، نرخ خوردگی آن باید کنترل شود. یکی از مفیدترین روش‌های کنترل فرآیند خوردگی، افزودن بازدارنده خوردگی است. با در نظر گرفتن محصول نهایی که امکان اضافه نمودن بازدارنده‌های خوردگی را به ما نمی‌دهد و مقایسه نقاط دارای

۳-۲- مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده

۲-۳-۱- پلاریزاسیون

دستگاه پتانسیواستات / گالواناستات مدل PARSTAT227 جهت انجام هرگونه تحقیقاتی در زمینه الکتروشیمی مناسب است. جریان بالا، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و توانایی تقویت شدن تا ۲۰ میلی‌آمپر این دستگاه را در تحقیقاتی که در زمینه‌های پیل سوختی و باتری انجام می‌شود ایده‌آل ساخته است. ترکیب محدوده وسیعی از ولتاژ و جریان هرگونه اندازه‌گیری موردنیاز را در خوردگی امکان‌پذیر ساخته است. امکان بررسی پوشش‌ها حتی پوشش‌های ضخیم به دلیل امپدانس ورودی بالا و ظرفیت ورودی پائین وجود دارد. این دستگاه در ولتاژمتری به دلیل رزولوشن عالی و حساسیت در جریان، کارآمدی بالایی در اندازه‌گیری‌های دقیق دارد. ازجمله قابلیت‌های این دستگاه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- آزمون پلاریزاسیون تافل

- آزمون سیکلی

- آزمون امپدانس

- آزمون Et

- آزمون CV

پلاریزاسیون به معنای افزایش یا کاهش پتانسیل الکتروود در اثر عبور جریان در آن است. اصول این آزمون به این صورت است که با تغییر پتانسیل سیستم، جریان اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از این مقادیر می‌توان شاخه آندی و کاتدی نمودار را رسم کرده و شیب هر کدام از شاخه‌ها را در ناحیه خطی رسم نمود. از تقاطع شیب‌های اندازه‌گیری شده می‌توان جریان خوردگی را محاسبه نمود. در آزمون پلاریزاسیون ابتدا لازم است تا سل الکتروشیمیایی به شرایط پایدار بدون تغییر زیاد در پتانسیل برسد. به پتانسیل به‌دست‌آمده در این حالت، پتانسیل مدار باز یا پتانسیل تعادل گفته می‌شود. زمان رسیدن به پتانسیل تعادل وابسته به سل الکتروشیمیایی از چند دقیقه تا چند ساعت متغیر است. در آزمایش پلاریزاسیون خطی، با اعمال پتانسیل کم، نرخ خوردگی نسبت به پتانسیل مدار باز به دست می‌آید. آزمون پلاریزاسیون شامل چهار زیر مجموعه پلاریزاسیون خطی، پلاریزاسیون تافل، پتانسیل دینامیک و سیکلی است. نوع دوم پلاریزاسیون یعنی پلاریزاسیون دینامیکی یکی از متداول‌ترین آزمون‌های ارزیابی مقاومت به خوردگی است. در این آزمون جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی مشخص شده و سرعت خوردگی به دست می‌آید. آزمون پلاریزاسیون در محیط‌های مختلفی انجام می‌شود و منحنی پتانسیل بر حسب جریان رسم

۲۰۰ نشان داده شده است. نمونه نیکل ۲۰۰ مورد استفاده در این مطالعه تولید شرکت‌های چینی است.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی (درصد) برای نیکل ۲۰۰

عنصر	درصد
نیکل	در کمترین حالت ۹۹٫۰ درصد
مس	در بیشترین حالت ۰٫۲۵ درصد
آهن	در بیشترین حالت ۰٫۴۰ درصد
منگنز	در بیشترین حالت ۰٫۳۵ درصد
کربن	در بیشترین حالت ۰٫۱۵ درصد
سیلیسیم	در بیشترین حالت ۰٫۳۵ درصد
سولفور	در بیشترین حالت ۰٫۰۱ درصد

۲-۲-۲- سود سوزآور (NaOH)

سود سوزآور نمونه‌ای از قلیاهای قوی است. با اسیدهای مختلف مانند هیدروکلریک اسید واکنش می‌دهد. گرچه خطر انفجار یا اشتعال، وجود ندارد ولی گرمای قابل‌توجهی برای خنثی‌سازی ایجاد می‌کند. باعث خوردگی فلزات مانند آلومینیوم، قلع و روی می‌شود. در طی این فرایند، هیدروژن تولید می‌کند که پتانسیل آن را دارد که به عنوان یک گاز منفجره رفتار کند. بسیار مرطوب‌کننده است و رطوبت، دی اکسید کربن یا گوگرد و دی اکسید موجود در هوا را جذب می‌کند. همچنین بسیار لطیف است و رطوبت را به خود جذب می‌کند تا به شکل یک محلول آبی درآید. وقتی سود سوزآور مایع رقیق می‌شود، مقدار قابل‌توجهی گرما تولید می‌کند. در اثر رقیق کردن سود سوزآور، از آنجا که گرمای شدیدی در زمان کم تولید می‌شود، اگر آب با بی‌احتیاطی در آن ریخته شود، ممکن است محلول حاصل به اطراف پاشیده شود، برای همین برای رقیق کردن سود سوزآور باید خیلی مراقب بود.

سود سوزآور به‌راحتی فیبرهای حیوانی را تجزیه می‌کند. الیاف گیاهی نیز گرچه تجزیه‌شده هستند، اما مقاومت بالاتری نسبت به الیاف حیوانی دارند. گرچه مواد مقاوم در برابر خوردگی توسط سود سوزآور شامل فولاد زنگ‌نزن، اپوکسی فولاد است، اما رزین‌ها و پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف، فولاد و فولاد باروکش لاستیک بیشترین مقدار را دارند و اغلب استفاده می‌شوند. سود سوزآور مورد استفاده در این مطالعه تولید شرکت نیرو کلر است.

می‌شود. این آزمایش، به دلیل اعمال پتانسیل‌های زیاد نسبت به پتانسیل مدار باز کاملاً تخریبی است و با خوردگی نمونه‌ها در محیط آزمایش همراه است. پلاریزاسیون سیکلی حساسیت قطعه نسبت به خوردگی حفره‌ای را مشخص می‌کند و همان‌طور که از اسم آن مشخص است نمودار آن به‌صورت دایره‌ای گزارش می‌شود. در روش تافل نمودار به‌صورت دو شاخه آندی و کاتدی گزارش می‌شود که با رسم مماس بر منحنی در دو شاخه کاتدی و آندی می‌توان مقدار جریان خوردگی را به دست آورد. روش دقیق‌تر با استفاده از نرم‌افزارهای موجود است که مقادیر دقیق‌تری از جریان خوردگی و مقاومت پلاریزاسیون به دست می‌دهد.

$$n\lambda = 2d\sin \theta \quad (1)$$

این قانون طول موج تابش الکترومغناطیسی را به زاویه پراش و فاصله شبکه در یک نمونه بلوری مرتبط می‌کند.

۳- نتیجه‌گیری

در شکل ۱ تصاویر نمونه‌های نیکل قبل و پس از غوطه‌وری در محلول NaOH نشان داده شده است. مطابق این شکل مشخص است که سطح نمونه در حضور محلول سود سوزآور کاملاً خورده شده و پستی‌وبلندی‌های بسیاری بر روی سطح قابل‌مشاهده است. خورده شدن آلیاژهای بر پایه نیکل در محلول سود سوزآور در پژوهش‌های دیگری نیز به اثبات رسیده است [۲۵ و ۲۶]. جهت بررسی بهتر مکانیزم خوردگی در نمونه خورده شده، قسمتی از این نمونه جدا شده و به عنوان نمونه خورده شده در شرایط واقعی، در ادامه، توسط آزمون میکروسکوپی (SEM) مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور بررسی میکروساختار نمونه‌های غوطه‌ور در الکترولیت NaOH در دماهای مختلف از آزمون SEM استفاده شده است. همچنین عناصر موجود در هر نمونه توسط روش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس (EDS) مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۳ تا شکل ۶ برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. در این تصاویر از نرم‌افزار پردازش تصویر Image J جهت اندازه‌گیری قطر حفرات ایجادشده بر روی سطح استفاده شده است.

۲-۳-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

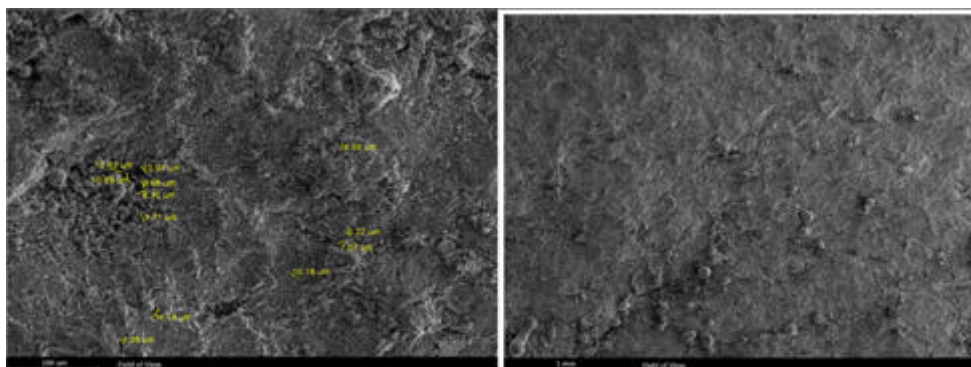
میکروسکوپ SEM استفاده‌شده در این پژوهش مدل Philips XI30 ساخت کشور هلند است. این میکروسکوپ ریزساختار مواد را با روبش سطح توسط پرتو الکترونی بررسی می‌کند و مشابه میکروسکوپ‌های نوری، ولی با قدرت تفکیک بسیار بالاتر و عمق میدان بسیار بزرگ‌تر، عمل می‌کند. شاید مهم‌ترین ویژگی میکروسکوپ الکترونی روبشی، نمایش سه‌بعدی تصویرهای آن به دلیل عمق میدان بزرگ آن باشد. به‌علاوه، میکروسکوپ الکترونی روبشی با روش‌های مختلفی شامل تجهیز شدن با طیف‌سنجی انتشاری انرژی پرتوایکس و طیف‌سنجی انتشاری طول موج پرتوایکس امکان دست‌یابی به اطلاعات شیمیایی نمونه را نیز فراهم می‌کند.

۳-۳-۲- طیف‌سنجی پراش اشعه‌ی پرتوایکس (XRD)

در این پژوهش از دستگاه مدل X'Press استفاده شده است. این تکنیک یک روش بسیار سریع و تحلیلی است که برای شناسایی فاز یک ماده‌ی بلوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکنیک فوق‌المروزه یکی از روش‌های معمول برای مطالعه

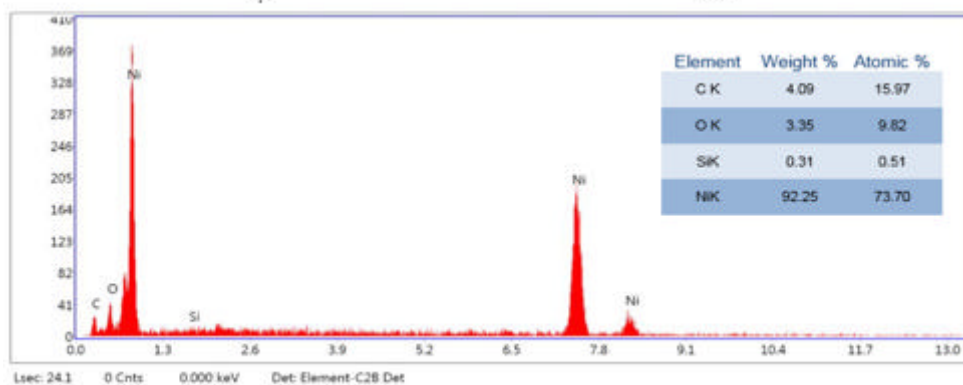


شکل ۲: تصاویر مربوط به آلیاژ پایه نیکل (الف) سمت راست نمونه خورده نشده و سمت چپ نمونه خورده شده و (ب) قسمت خورده شده در محیط NaOH در شرایط واقعی



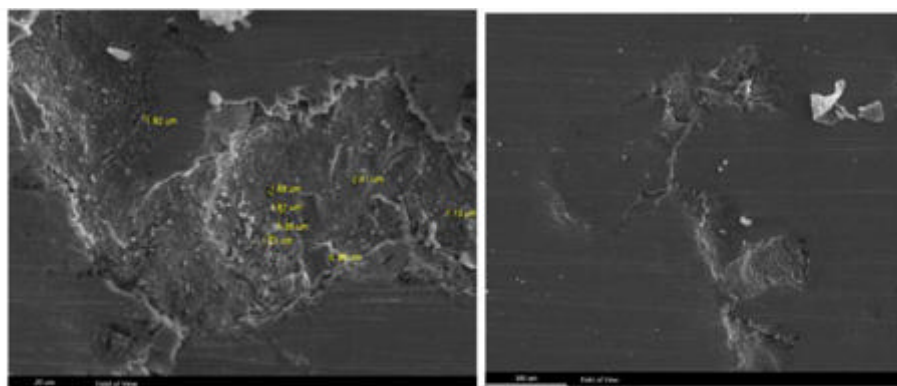
ب

الف



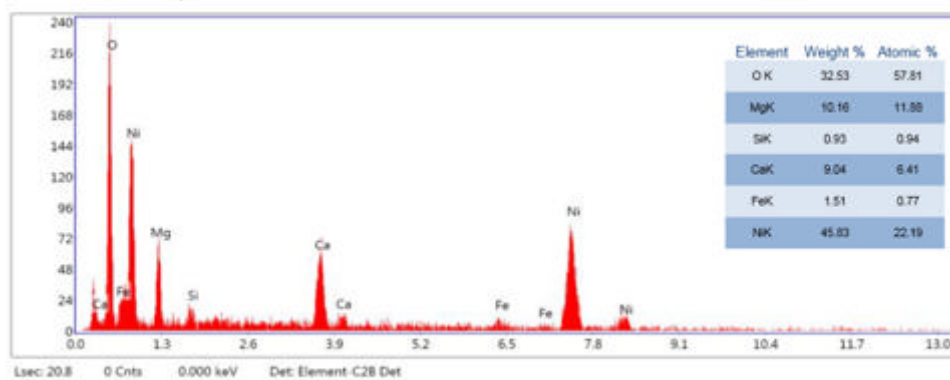
پ

شکل ۳: (الف) و (ب) تصاویر SEM مربوط به آلیاژ پایه نیکل غوطه‌ور در الکترولیت NaOH در محیط واقعی و (پ) نتایج آزمون ایدکس مربوط به این نمونه



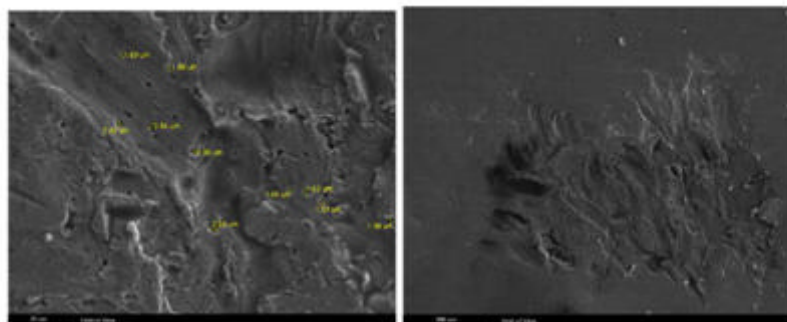
ب

الف



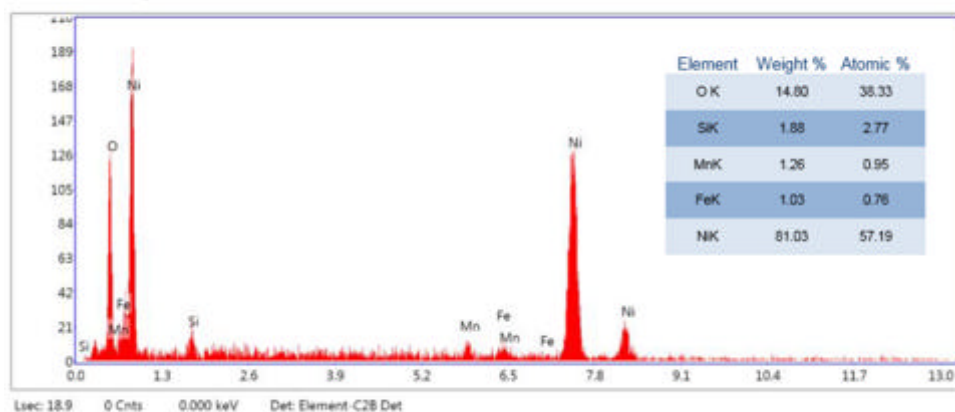
پ

شکل ۴: (الف) و (ب) تصاویر SEM مربوط به آلیاژ پایه نیکل غوطه‌ور در الکترولیت NaOH در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و (پ) نتایج آزمون ایدکس مربوط به این نمونه



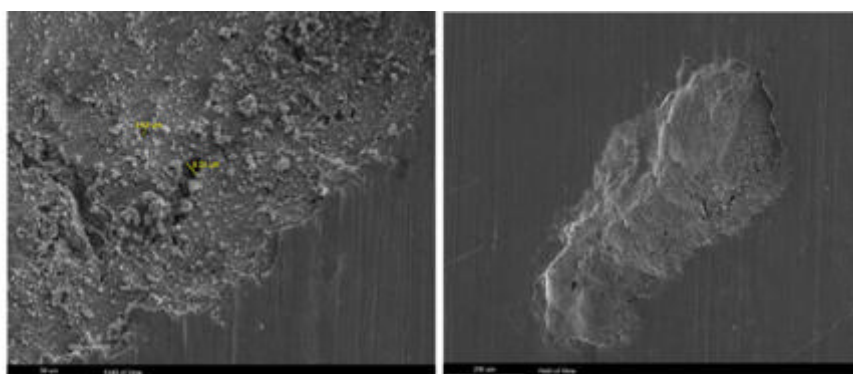
ب

الف



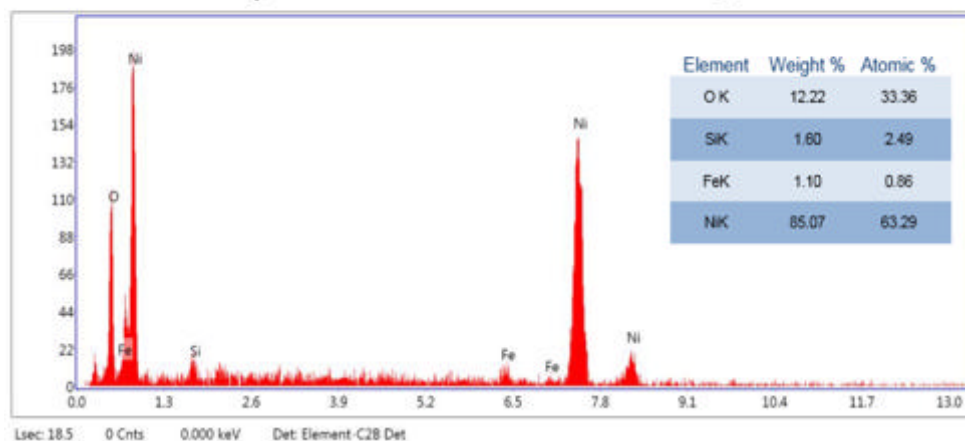
ب

شکل ۵: (الف) و (ب) تصاویر SEM مربوط به آلیاژ پایه نیکل غوطه‌ور در الکترولیت NaOH در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و (پ) نتایج آزمون ایدکس مربوط به این نمونه



ب

الف



شکل ۶: (الف) و (ب) تصاویر SEM مربوط به آلیاژ پایه نیکل غوطه‌ور در الکترولیت NaOH در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و (پ) نتایج آزمون ایدکس مربوط به این نمونه

در تصویر با بزرگنمایی بالاتر حفرات موجود در این ناحیه نیز قابل مشاهده است. مطابق این تصویر، متوسط اندازه حفرات حدود ۱.۵ میکرومتر به دست آمده است که به شکل قابل توجهی نسبت به نمونه قبلی (غوطه‌ور در محیط واقعی) کمتر به دست آمده است. این نتیجه نشان می‌دهد که فرصت کافی برای تشدید خوردگی حفره‌ای در نمونه‌های آزمایشگاهی وجود نداشته است. با این حال، تشکیل حفرات در نمونه آزمایشگاهی نیز تأییدکننده این واقعیت است که مکانیزم خوردگی حفره‌ای مکانیزم غالب در این شرایط بوده است. همچنین در شکل ۴ مشخص است که درصد وزنی و اتمی اکسیژن به شکل قابل توجهی بیشتر از نمونه غوطه‌ور در محیط واقعی بوده است که این بیانگر پایدار بودن لایه اکسیدی موجود بر روی سطح نیکل در این دما است. با افزایش دمای غوطه‌وری به ۴۰ درجه سانتی‌گراد، مطابق شکل ۵ مجدداً ناحیه خورده شده و همچنین حفرات متعدد قابل مشاهده است. مطابق این تصاویر اندازه حفرات نسبت به نمونه غوطه‌ور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بزرگ‌تر شده و اندازه متوسط قطر حفرات به حدود ۲ میکرومتر رسیده است که مؤید تشدید خوردگی حفره‌ای در این نمونه است. درواقع با افزایش دما و به دلیل تشدید فرآیند نفوذ، عوامل خورنده بیشتری به لایه پسیو سطحی نفوذ کرده و منجر به تشدید شرایط خورنده شده است. با مقایسه نتایج آنالیز عنصری نیز مشخص است که مقدار درصد اتمی و درصد وزنی عنصر اکسیژن در این نمونه نسبت به نمونه غوطه‌ور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد کمتر شده است که این بیانگر آسیب‌دیدگی لایه اکسیدی سطحی و کاهش ضخامت و تراکم آن با افزایش دما است.

مطابق شکل ۶ افزایش بیشتر دمای محلول تا دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد باعث تشدید شرایط خوردگی شده و ناحیه خورده شده را بزرگ‌تر کرده است. از طرف دیگر مشخص است که این افزایش دما اندازه حفرات را نیز بزرگ‌تر کرده است که به دلیل افزایش نفوذ عوامل خورنده به لایه پسیو در نتیجه تشدید خوردگی حفره‌ای در این نمونه است. در این نمونه نیز مجدداً مشاهده می‌شود که مقدار غلظت عنصر اکسیژن با افزایش دما باز هم کاهش یافته است که روند قبلی مبنی بر تخریب لایه پسیو اکسید نیکل با افزایش دما را تأیید می‌نماید. بنابراین از نتایج آزمون میکروسکوپی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دما ضمن افزایش ناحیه خوردگی سطح، قطر حفرات را نیز بزرگ‌تر کرده و به دلیل نفوذ بیشتر عوامل خورنده به لایه اکسیدی، مقدار اکسیژن شناسایی شده را کاهش داده است.

نتایج نشان داده شده در شکل ۳، مربوط به همان نمونه‌ای است که تصاویر آن در شکل شکل ۲ نشان داده شده و نمونه در شرایط واقعی تحت شرایط خورده شدن در محلول سود سوزآور قرار گرفته بود.

شکل ۳ (الف) و (ب) مشخص است که در نمونه غوطه‌ور در محیط واقعی سود سوزآور، تمام سطح نمونه ناهموار و زبر شده است که این به دلیل وقوع خوردگی شدید در این نمونه است که تصاویر اثرات این خوردگی بر روی نمونه در شکل ۳ نیز قابل مشاهده بود.

مطابق شکل ۳ (ب)، حفرات متعدد و بزرگی بر روی سطح قابل مشاهده است که اندازه متوسط آن‌ها با توجه به نتایج آنالیز SEM حدود ۹/۵ میکرومتر به دست آمده است. وجود این حفرات بیانگر آن است که در کنار خوردگی عمومی که تمام سطح نمونه غوطه‌ور در محلول خورنده را درگیر کرده است، خوردگی حفره‌ای نیز در این نمونه به وقوع پیوسته است که قبلاً نیز توسط پژوهشگران دیگری وقوع این نوع خوردگی برای نیکل در محلول NaOH داغ به اثبات رسیده بود [۲۵ و ۲۷]. درواقع همان‌گونه که قبلاً توسط هاشیموتو^۱ و همکارانش [۲۸] به اثبات رسید، تشکیل یک لایه اکسید نیکل بر روی سطح آلیاژ بر پایه نیکل غوطه‌ور در محلول سود سوزآور در ابتدا از خوردگی بیشتر سطح آلیاژ جلوگیری به عمل می‌آورد. با این حال در صورت مساعد بودن شرایط نفوذ (دمای بالا و یا زمان غوطه‌وری طولانی)، با نفوذ عوامل خورنده به این لایه، خوردگی به صورت موضعی آغاز شده و به دلیل حضور آند کوچک (جایی که لایه پسیو اکسید نیکل شکسته شده است) نسبت به کاتد بزرگ (ناحیه پسیو) خوردگی به صورت موضعی و شدید ادامه پیدا می‌کند و خود را به صورت حفره‌هایی بر روی سطح نشان می‌دهد. این خوردگی باعث شکسته شدن کامل لایه پسیو شده است.

شکل ۳ (پ) عمده عنصر شناسایی شده نیکل است و اکسیژن اندکی شناسایی شده است که بیانگر نبود اکسید نیکل بر روی سطح است.

در شکل‌های بعدی که مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی است، به دلیل عدم فرصت کافی برای از بین رفتن کامل لایه پسیو، مشخص است که سطح نمونه‌ها در اکثر قسمت‌ها صاف و همگن است و تنها در قسمت کوچکی از سطح به دلیل شکسته شدن لایه پسیو، اثراتی از خوردگی قابل مشاهده است. مطابق شکل ۴، در نمونه غوطه‌ور در محلول NaOH در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، ناحیه خوردگی کوچکی مشاهده می‌شود که

۳-۱- تحلیل نتایج آزمون XRD

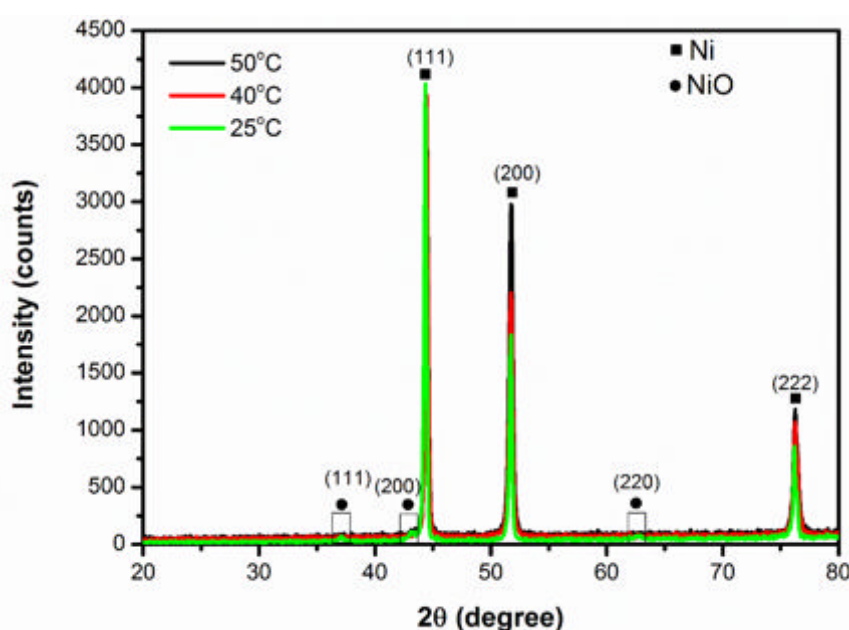
به منظور بررسی دقیق تر ساختار کریستالی نمونه های مورد بررسی از آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شده و الگوهای پراش حاصل در شکل ۷ نشان داده شده است.

جهت شناسایی فاز در این نمونه ها از نرم افزار X'Pert Highscore plus استفاده شده است. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس نشان دهنده وجود فاز شاخص نیکل به عنوان جزء اصلی تشکیل دهنده هر سه نمونه است. این فاز با کد مرجع JCPDS No. 00-003-1051 دارای ساختار کریستالی مکعبی و پارامتر شبکه ۳.۵۱۴۰ آنگستروم است [۲۹]. در این الگوی پراش، پیک های واقع شده در زوایای 44.4° ، 51.7° و 76.2° در هر سه نمونه به ترتیب مربوط به صفحات پراش (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۲) ساختار کریستالی نیکل هستند. شناسایی این ساختار با توجه به اینکه آلیاژ مورد استفاده پایه نیکل بوده است، کاملاً قابل پیش بینی بود. علاوه بر این ساختار، در نمونه غوطه ور در محلول سود سوزآور در دمای 25°C درجه سانتی گراد، پیک های کوچکی در زوایای مختلف قابل مشاهده است که به منظور مقایسه بهتر، تصاویر بزرگنمایی شده از این نواحی در الگوهای پراش مورد بررسی در شکل ۷ نشان داده شده است.

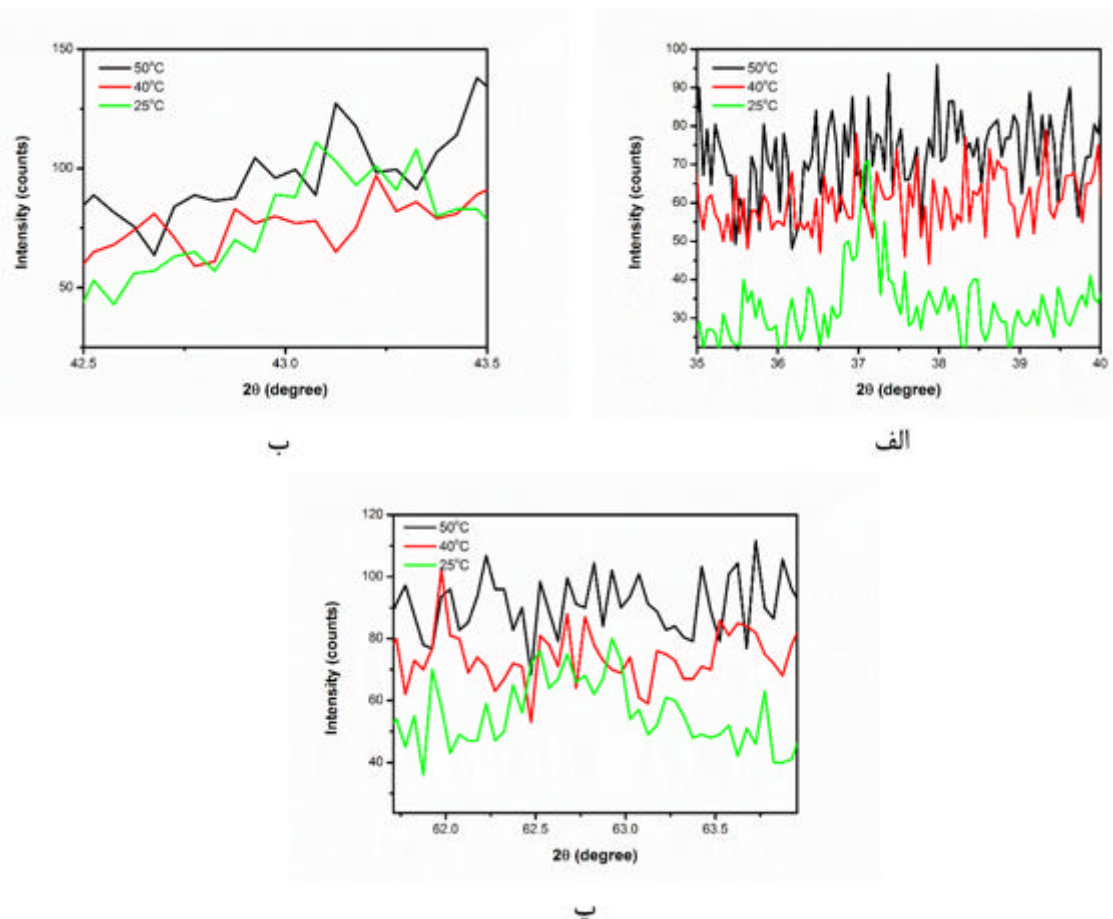
مطابق شکل ۸ مشخص است که در هر سه محدوده زوایای مشخص شده در این تصاویر، در نمونه غوطه ور در دمای 25°C درجه سانتی گراد پیک ضعیفی قابل مشاهده است در صورتی که در دو نمونه دیگر تغییرات الگوهای پراش در حد نویز است و پیکی

قابل مشاهده نیست؛ بنابراین، مطابق این الگوهای پراش، تنها در نمونه غوطه ور در دمای 25°C درجه سانتی گراد فاز کریستالی جدیدی شناسایی شده است که با انطباق پیک های آن با الگوهای مرجع در کتابخانه نرم افزار مذکور مشخص می شود که این پیک ها مربوط به ساختار اکسید نیکل با کد مرجع JCPDS No. 00-047-1049 با فاز کریستالی مکعبی و پارامتر شبکه 4.1771 آنگستروم بوده است. در این الگوی پراش، صفحات پراش با اندیس های میلر (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) به ترتیب در زوایای 37.0° ، 43.3° و 67.3° پیک نشان داده اند [۳۰].

وجود ساختار اکسید نیکل در نمونه غوطه ور در دمای 25°C درجه سانتی گراد و عدم حضور این ساختار در دماهای بالاتر بیانگر آن است که در دمای کمتر، یک لایه نسبتاً محافظ از اکسید نیکل بر روی سطح تشکیل شده است که تا حدودی از خوردگی بیشتر سطح نمونه جلوگیری به عمل آورده است در حالی که با افزایش دما و نفوذ اکسیژن و دیگر عوامل خورنده به این لایه محافظ، خوردگی به صورت حفره ای ادامه یافته است که اثرات آن در نتایج آزمون میکروسکوپی نیز مشخص بود. درباره نتایج آزمون XRD باید به این نکته نیز توجه داشت که به دلیل محدودیت این آزمون، فازهای کریستالی با درصد جرمی کمتر از ۳ تا ۵ درصد توسط این آزمون قابل شناسایی نیست [۳۱]. این بدان معنی است که ممکن است در نمونه های غوطه ور در دماهای بالاتر نیز اکسید نیکل بر روی سطح وجود داشته باشد، ولی به دلیل کاهش ضخامت آن و یا عدم پیوستگی آن بر



شکل ۷: الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه های غوطه ور در محلول NaOH در دماهای مختلف



شکل ۸: الگوهای پراش پرتو ایکس بزرگنمایی شده مربوط به نمونه‌های غوطه‌ور در محلول سود سوزآور در دماهای ۲۵، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد در محدوده زوایای (الف) ۳۵ تا ۴۰ درجه، (ب) ۴۲.۵ تا ۴۳.۵ درجه و (پ) ۶۱.۵ تا ۶۴ درجه

نمونه واقع شده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد شدت پیک نیکل کمتری داشته است که این می‌تواند بیانگر وجود یک لایه نازک اکسید نیکل بر روی سطح این ماده باشد. همچنین در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، به دلیل دمای بالاتر و با توجه به وابستگی فرآیند نفوذ به دما، مشخص است که لایه پسیو تشکیل شده کمترین ضخامت و تراکم را نسبت به دو نمونه دیگر داشته و بنابراین تعداد فوتون‌های پرتو ایکس بیشتری از روی صفحات نیکل بازتاب نموده و شدت پیک‌های مربوط به این ساختار از دو نمونه دیگر بیشتر بوده است. به علاوه، با توجه به محدودیت آزمون XRD در شناسایی فازهای کریستالی با غلظت کم، و نظر به وجود عناصر آهن و سیلیسیم در نتایج آزمون ایدکس، امکان تشکیل فازهای اکسید آهن و اکسید سیلیکون بر روی سطح نیز وجود دارد.

یکی دیگر از پارامترهای قابل استخراج از نتایج آزمون XRD، اندازه بلورک‌های ساختارهای کریستالی است. برای یافتن اندازه بلورک از رابطه شرر استفاده شده است [۳۲].

روی سطح، اثری از پیک‌های مربوط به این فاز در نتایج آزمون XRD مشاهده نشده است. این موضوع به صورت غیرمستقیم توسط نتایج آزمون XRD قابل بررسی است. با دقت در الگوهای پراش نمونه‌های مورد بررسی مشخص است که کمترین شدت پیک‌های مربوط به نیکل غالباً مربوط به نمونه غوطه‌ور در محلول با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بوده است که این به دلیل تشکیل لایه پسیو اکسید نیکل بر روی سطح است. به عبارت دیگر حضور این لایه پسیو بر روی سطح باعث شده است که مقداری از پرتو ایکس تابیده شده به سیستم از روی ساختار کریستالی پوشش اکسید نیکل بازتاب نموده و فوتون‌های کمتری از پرتو ایکس به زیر لایه این پوشش نازک (نیکل) برسد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هرچقدر لایه اکسید نیکل موجود بر روی سطح نیکل متراکم‌تر و ضخیم‌تر باشد، شدت پیک‌های مربوط به نیکل زیر لایه کمتر می‌شود. با دقت در نتایج آزمون XRD مربوط به این سه نمونه مشخص است که پس از نمونه واقع شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد،

اکسید نیکل در نمونه قرار گرفته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر با ۲۸۸ نانومتر به‌دست‌آمده است که این اندازه بلورک برای نمونه‌های دیگر به دلیل عدم قابل‌مشاهده بودن پیک مربوط به این فاز، قابل محاسبه نیست.

۳-۲- تحلیل نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی

۳-۲-۱- نتایج آزمون EIS

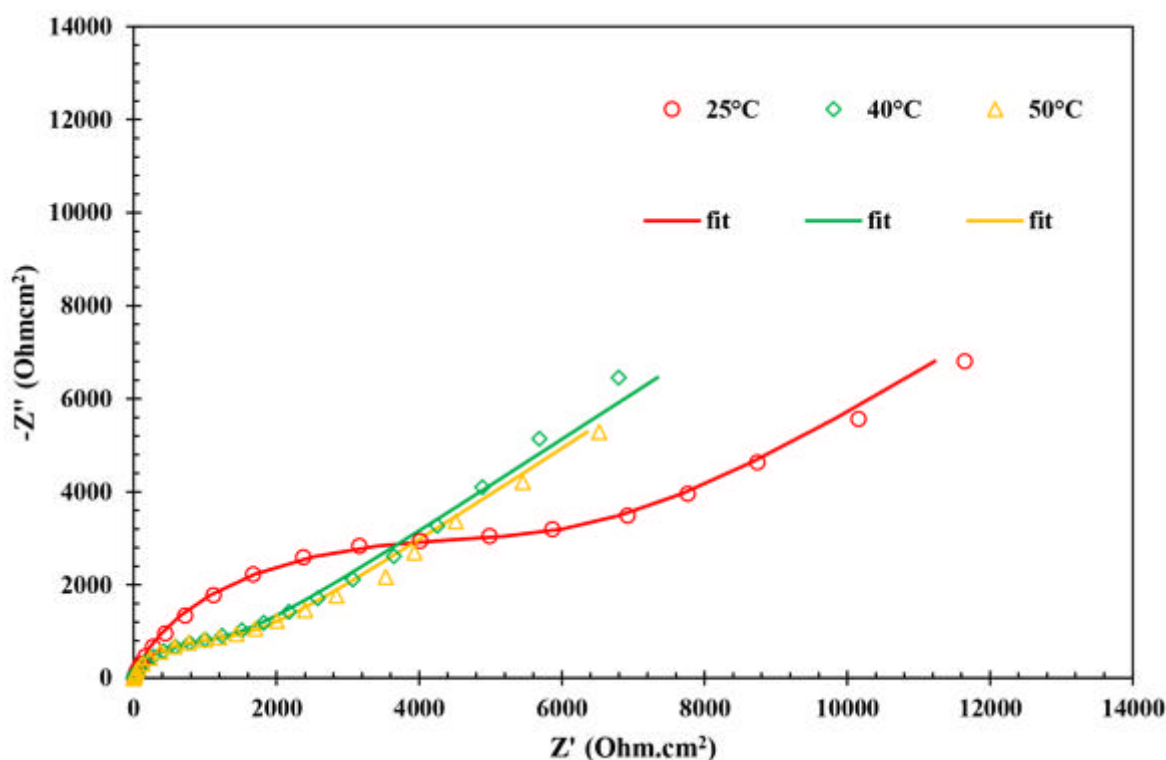
آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی آزمونی است که در آن جریان متناوب به سیستم وارد شده و امپدانس به دو صورت امپدانس حقیقی و موهومی از سیستم دریافت می‌شود. با رسم این اطلاعات بر حسب یکدیگر به روش‌های گوناگون که در ادامه آمده است، می‌توان با فیت نتایج بر روی مدار معادل‌های الکتروشیمیایی، پارامترهای مؤثر در خوردگی سیستم را تحلیل نمود [۳۳]. در شکل ۹ منحنی‌های نایکوئیست^۱ (Z'' بر حسب $-Z''$) مربوط به نمونه‌ها آمده است.

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در منحنی‌های نایکوئیست یک نیم‌دایره در فرکانس‌های بالا و یک خط راست با زاویه ۴۵ درجه در فرکانس‌های پایین در هر سه نمونه قابل‌مشاهده است. لازم به ذکر است که در منحنی‌های نایکوئیست فرکانس از

$$D = K\lambda / (FWHM) \times \cos(\theta) \quad (2)$$

که در این رابطه D اندازه بلورک، K فاکتور شکل، λ طول‌موج پرتوایکس مورد استفاده (۱.۵۴ آنگستروم)، $FWHM$ پهنای باند در نصف ارتفاع و θ محل وقوع پیک است.

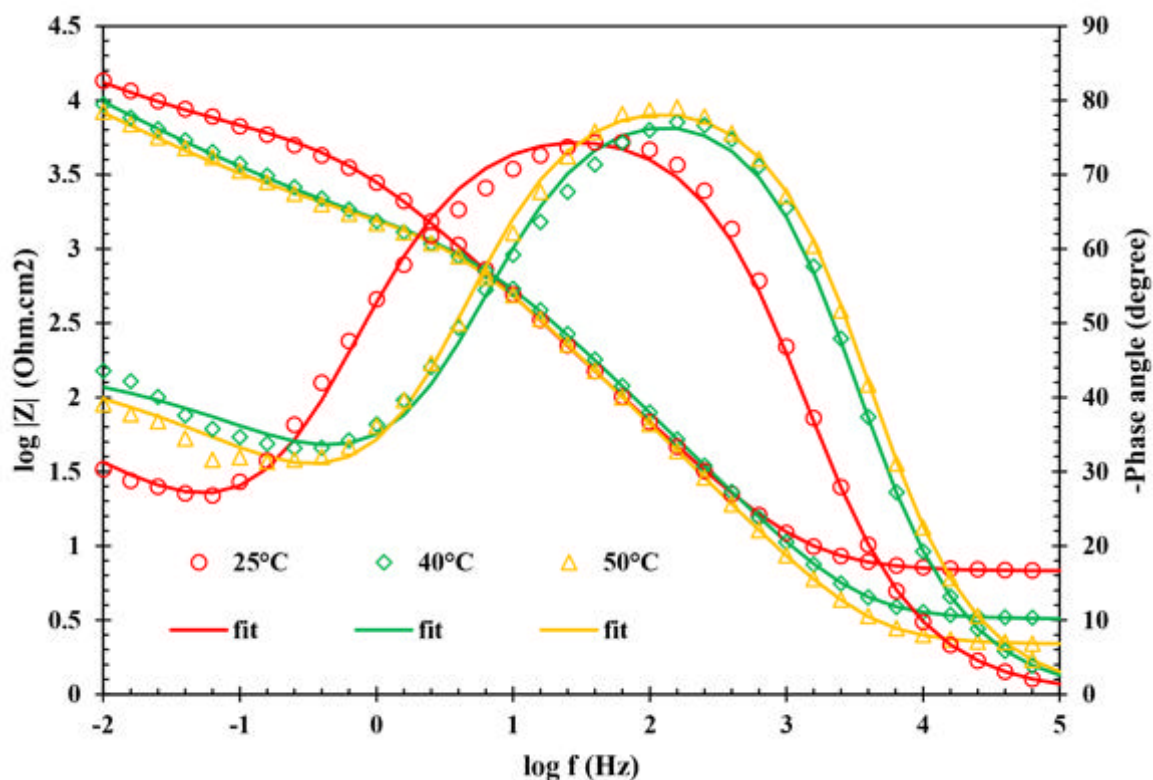
با داشتن مقدار $\cos(\theta)$ و $FWHM$ و همچنین مقادیر ثابت λ (۱.۵۴ آنگستروم) و k (۰.۹) مقدار اندازه بلورک طبق رابطه شرر به دست می‌آید که با توجه به اینکه λ بر حسب آنگستروم بود این مقدار نیز بر حسب آنگستروم است. با تقسیم مقدار به‌دست‌آمده بر ۱۰ اندازه بلورک بر حسب نانومتر محاسبه می‌شود. این پارامتر برای فاز نیکل در نمونه‌های غوطه‌ور در محلول با دمای ۲۵، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۳۹.۴، ۴۱.۹ و ۴۲.۳ نانومتر به‌دست‌آمده است که این اختلاف اندک بیانگر عدم اثرگذاری قابل‌ملاحظه تغییر دما بر اندازه بلورک ساختار نیکل در این سه نمونه است. افزایش اندک اندازه بلورک با افزایش دما نیز می‌تواند ناشی از رشد بلورک‌ها در دمای بالاتر باشد، با این حال به دلیل آنکه دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای نیکل با دمای ذوب ۱۴۵۵ درجه سانتی‌گراد، اصلاً قابل‌ملاحظه نیست، این افزایش اندازه بلورک قابل‌چشم‌پوشی است. همچنین اندازه بلورک برای ساختار



شکل ۹: منحنی‌های نایکوئیست نمونه به‌علاوه ی نتایج فیت داده‌های حاصل از آزمون EIS بر روی مدار معادل الکتروشیمیایی مناسب (نقاط نتایج حاصل از آزمایش و خطوط نتایج حاصل از فیت است)

مربوط به این نمونه‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در منحنی‌های باد - امپدانس، امپدانس در کمترین فرکانس می‌تواند بیانگر مقاومت کل سیستم در برابر خوردگی باشد [۳۶]؛ بنابراین از شکل مشخص است که امپدانس در کمترین فرکانس نمونه قرار گرفته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد دارای بالاترین مقاومت بوده و با افزایش دما مقاومت کل سیستم در برابر خوردگی کاهش یافته است. مقدار دقیق مقاومت این سیستم‌ها را باید از توسط مدل‌سازی این نتایج توسط مدار معادل الکتروشیمیایی تعیین نمود. جهت تعیین شکل مدار معادل الکتروشیمیایی، تعیین تعداد ثابت زمانی سیستم ضروری است. تعداد ثابت زمانی به معنی تعداد خازن/مقاومت‌های موازی در مدار معادل الکتروشیمیایی است. از روی منحنی‌های باد-زاویه فاز می‌توان به تعداد ثابت زمانی سیستم‌ها پی برد که این تعداد ثابت زمانی به ما در تعیین مدار معادل الکتروشیمیایی کمک خواهد نمود. مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که همه نمونه‌ها مورد مطالعه دارای یک پیک در منحنی باد - زاویه فاز خود است که این به معنی تک ثابت زمانه بودن سیستم‌ها است. جهت تعیین دقیق‌تر پارامترهای الکتروشیمیایی، نتایج حاصل از آزمون امپدانس بر روی مدار معادل الکتروشیمیایی (شکل ۱۱) منطبق گردید.

قسمت راست نمودار به سمت چپ منحنی (به صورت پادساعت‌گرد) افزایش می‌یابد بنابراین نقطه‌ای که در انتها الیه سمت چپ نمودار واقع شده است دارای بیشترین فرکانس و نقطه انتها الیه سمت راست دارای کمترین فرکانس است. به طور کلی عنوان می‌شود که هرچه قطر نیم‌دایره بیشتر باشد، مقاومت در برابر انتقال بار الکتریکی بیشتر بوده و بنابراین در سیستم‌های الکتروشیمیایی، مقاومت در برابر انجام واکنش الکتروشیمیایی (در اینجا واکنش خوردگی) بیشتر است [۳۴]؛ بنابراین از روی شکل منحنی‌های نایکوئیست به نظر می‌رسد نمونه قرار گرفته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بیشترین قطر نیم‌دایره و بنابراین بیشترین مقاومت به خوردگی بوده است و دو نمونه دیگر مقاومت خوردگی نزدیک به هم داشته‌اند. همچنین خط راست قرار گرفته در فرکانس‌های پایین به رفتاری واربرگی موسوم است و بیانگر آن است که نمونه تحت کنترل فرآیند نفوذ است [۳۵]. به عبارت دیگر وجود لایه‌ای نازک از اکسید نیکل در این نمونه‌ها بر روی سطح باعث شده است که برای رسیدن عوامل خوردنده به سطح فعال فلز، نیاز به فرآیند نفوذ باشد که در نتایج آزمون‌های قبلی نیز مشاهده شده بود. جهت درک بهتر سیستم مورد مطالعه و بررسی بهتر تعداد ثابت زمانی از منحنی‌های باد - کمک گرفته شود. منحنی‌های باد



شکل ۱۰: منحنی‌های باد - امپدانس و باد - زاویه فاز نمونه‌های مورد مطالعه (نقاط نتایج حاصل از آزمایش و خطوط نتایج حاصل از فیت است)

۳-۲-۲- نتایج آزمون پلاریزاسیون

آزمون پلاریزاسیون، ابزاری مفید جهت بررسی ترمودینامیک و سینتیک واکنش‌های خوردگی در سیستم‌های مختلف است [۳۷]. جهت تعیین دقیق‌تر سازوکار خوردگی در این سیستم آزمون پلاریزاسیون از نمونه‌ها به عمل آمده است.

مطابق شکل ۱۰ مشخص است که در نمونه غوطه‌ور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، یک رفتار پسیوشدگی در شاخه آندی (شاخه بالایی) قابل مشاهده است که به دلیل تشکیل لایه پسیو اکسید نیکل بر روی سطح در این نمونه است که در نتایج آزمون‌های پیشین نیز مشاهده شده بود. در نمونه غوطه‌ور در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نیز اثری از این رفتار در شاخه آندی قابل مشاهده است اما در نمونه غوطه‌ور در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً رفتار از حالت پسیو شدگی به حالت اکتیو تغییرنموده که این بیانگر کاهش ضخامت و تراکم لایه پسیو اکسید نیکل با افزایش دمای غوطه‌وری است.

جهت استخراج مقدار دانسیته جریان خوردگی (i_{corr})، ناحیه تافلی شاخه‌های کاتدی (β_c) و آندی (β_a) برونمایی شده و محل برخورد آن‌ها دانسیته جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی (E_{corr}) را داده است. برای اندازه‌گیری جریان و پتانسیل خوردگی، نواحی تافلی شیب‌ها آندی و کاتدی امتداد یافته و محل تقاطع آنها برای این منظور در نظر گرفته شده است. نتایج در جدول ۱ گزارش شده است. در این جدول، کاهش مقدار شیب شاخه آندی با افزایش دما مشخص است که اثبات‌کننده کاهش پلاریزاسیون شاخه آندی بوده و اثبات می‌کند که با افزایش دما سینتیک واکنش‌های آندی خوردگی تشدید شده است.

برای یافتن مقاومت پلاریزاسیون (R_p) از رابطه اشترن - گری استفاده شده است (رابطه (۳-۲))، [۳۸].

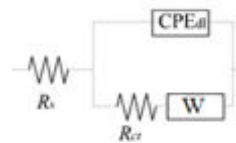
$$R_p = (\beta_a \times \beta_c) / (2.303 \times i_{corr} \times (\beta_a + \beta_c))$$

همچنین سرعت خوردگی از رابطه زیر به دست آمده است [۳۹].

$$CR = (3272000 \times i_{corr} \times EW) / d \times A$$

که در این رابطه EW اکی والان جرمی ماده، d چگالی ماده و A سطح الکترود است.

مطابق جدول ۱، مقاومت خوردگی نمونه‌ی غوطه‌ور در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد کمترین مقدار در بین نمونه‌ها بوده و با توجه به رابطه معکوس سرعت خوردگی با مقاومت به خوردگی بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سرعت خوردگی



شکل ۱۱: مدار معادل نمودار تک ثابت زمانه جهت مدل نمودن نتایج آزمون EIS

این مدار معادل شامل دو مقاومت (به ترتیب از چپ مقاومت محلول و مقاومت انتقال شارژ) و یک عنصر فاز ثابت (مربوط به لایه‌ی دوگانه) است. در این مدار معادل به دلیل آنکه صفحات لایه دوگانه ایجادشده بین سطح الکترود و الکترولیت دقیقاً موازی باهم نیست و همچنین صفحه الکترود و پوشش کاملاً صاف و هموار نیست از عنصر فاز ثابت به جای خازن ایده آل استفاده شده است. تفاوت این دو عنصر در فرمول امپدانس خودش را نشان می‌دهد. امپدانس خازن برابر است با: $Z = 1/j\omega C$ و این مقدار برای CPE برابر است با: $Z = 1/(Y_0 j\omega)^n$ که در این فرمول‌ها C به معنی ظرفیت خازن، ω زاویه فاز، Y_0 ادمیتانس (برعکس امپدانس و معادل پارامتر ظرفیت در خازن ایده آل) و n عبارت موهومی $\sqrt{-1}$ است. همان‌طور که دیده می‌شود اختلاف این دو تنها در یک توان n است که این مقدار عددی بین صفر و یک است. مقدار صفر آن مقاومت ایده آل و مقدار یک آن خازن ایده آل را تداعی می‌کند. همچنین عنصر واربرگ جهت مدل‌سازی فرآیند نفوذ به این مدار معادل افزوده شده است. مدل‌سازی نمونه‌های اندازه‌گیری شده با مدار معادل الکتروشیمیایی توسط نرم‌افزار ZsimpS انجام شد و نتایج در شکل ۱۲۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل‌سازی سازی توانسته است به خوبی بر نمودارهای نایکوئیست و باد منطبق شود که این بیانگر قابل اعتماد بودن نتایج حاصل از مدل‌سازی است. مقادیر پارامترهای به دست آمده از این مدل‌سازی در جدول ۲ گزارش شده است.

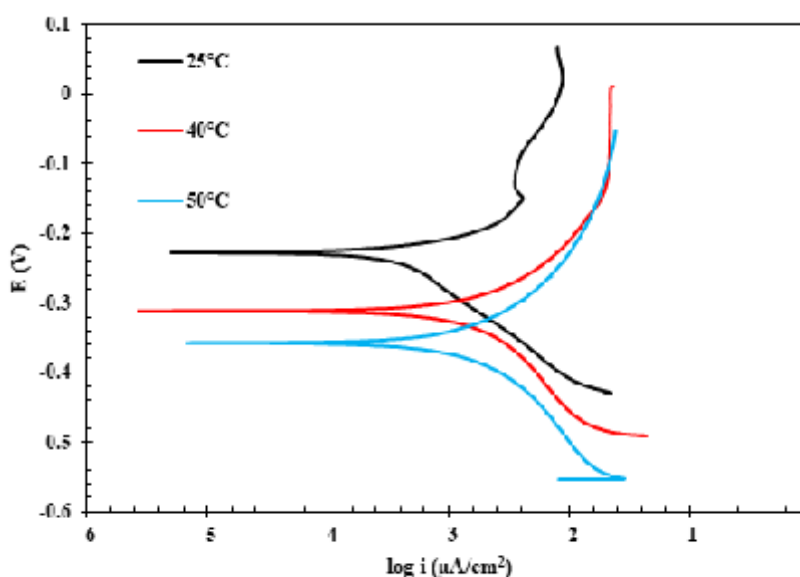
مطابق جدول ۱ اگر مقاومت سیستم در برابر خوردگی را معادل مقاومت انتقال بار در نظر بگیریم، این مقدار برای نمونه واقع شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد حدود ۵.۵ کیلو اهم در سانتی متر مربع به دست می‌آید که از دو نمونه دیگر به شکل قابل توجهی بیشتر است. همچنین این مقدار برای نمونه واقع شده در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۱۱۵۸ اهم در سانتی متر مربع است که مقاومت به خوردگی آن بیشتر از نمونه واقع شده در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد (۱۱۰۵ اهم بر سانتی متر مربع) است که این نتایج مؤید نتایج حاصل از شکل منحنی‌های باد و نایکوئیست است؛ بنابراین نتایج آزمون امپدانس بیانگر آن است که مقاومت نمونه‌ها با افزایش دمای غوطه‌وری کاهش یافته است که این می‌تواند به دلیل کاهش ضخامت پوشش نازک اکسید نیکل تشکیل شده بر روی سطح با افزایش دمای غوطه‌وری باشد.

تأیید کامل نتایج آزمون امپدانس است. پارامتر دیگری که در جدول ۲ قابل توجه است، مقدار پتانسیل خوردگی است. به طور کلی پتانسیل خوردگی با تمایل ترمودینامیکی نمونه به خوردگی در ارتباط است و هرچه پتانسیل خوردگی منفی تر باشد، نمونه فعال تر بوده و تمایل ترمودینامیکی آن به خوردگی بیشتر است [۳۴ و ۴۰]؛ بنابراین و مطابق نتایج گزارش شده در جدول ۲ مشخص است که کمترین تمایل ترمودینامیکی به خوردگی متعلق به نمونه غوطه‌ور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و بیشترین تمایل متعلق به نمونه غوطه‌ور در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. به عبارت دیگر، با افزایش دما و به دلیل کمتر شدن اثر لایه پسیو اکسید نیکل موجود بر روی سطح، نمونه فعال تر شده و تمایل بیشترین به خوردگی دارد که در نتایج آزمون‌های قبلی نیز اثبات شده بود.

این نمونه از بقیه نمونه‌ها بیشتر بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که در اینجا نیز مانند نتایج آزمون EIS، نمونه غوطه‌ور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و پس از آن نمونه غوطه‌ور در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب کمترین دانسیته جریان خوردگی (کمترین سرعت خوردگی و بیشترین مقاومت پلاریزاسیون) را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین در این نتایج نیز مشخص است که برخلاف نمونه غوطه‌ور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد که در آن سرعت خوردگی از دو نمونه دیگر به شکل مشهودی کمتر بوده است (۰.۰۰۸۹ میلی‌متر در سال)، در دو نمونه دیگر سرعت خوردگی نزدیک به هم بوده و برای نمونه‌های غوطه‌ور در دمای ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۰.۰۲۰۳ و ۰.۰۲۲۹ میلی‌متر در سال به دست آمده است. این نتایج در

جدول ۱: نتایج حاصل از مدل‌سازی نتایج آزمون امپدانس بر روی مدار معادل الکتروشیمیایی

Sample	R_s (ohm.cm ²)	Y_{0ad} (S.sec ^{0.5} .cm ⁻²)	n	R_{ct} (ohm.cm ²)	W (S.sec ^{0.5} .cm ²)
25°C	6.73	5.56×10^{-4}	0.86	5568	4.33×10^{-4}
40°C	3.21	3.55×10^{-4}	0.91	1158	4.36×10^{-4}
50°C	2.18	4.08×10^{-5}	0.92	1105	5.34×10^{-4}



شکل ۱۲: نتایج آزمون پلاریزاسیون نمونه‌های غوطه‌ور در الکترولیت NaOH در دماهای مختلف

جدول ۲: نتایج حاصل از برون‌یابی تافلی منحنی‌های پلاریزاسیون

Sample	β_a (V/dec)	$-\beta_c$ (V/dec)	$E_{cor: vs SCE}$ (V)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	R_p (Ωcm^2)	CR (mmy)
25°C	0.051	0.113	-0.228	834	18,294	0.00898
40°C	0.046	0.194	-0.311	1887	8,555	0.02033
50°C	0.038	0.107	-0.357	2134	6,532	0.0229

نتیجه‌گیری نهایی

- با توجه به تصاویر SEM، حفرات متعدد و بزرگی بر روی سطح نمونه‌ها ایجاد شد که اندازه متوسط آن‌ها حدود ۹/۵ nm است. وجود این حفرات بیانگر آن است که در کنار خوردگی عمومی که تمام سطح نمونه غوطه‌ور در محلول خورنده را درگیر کرده است، خوردگی حفره‌ای نیز اتفاق افتاده است.

- با توجه به تصاویر SEM افزایش دمای محلول تا دمای ۵۰ °C باعث تشدید شرایط خوردگی شده و ناحیه خورده شده را بیشتر کرده است. همچنین مشخص شد که این افزایش دما باعث بزرگ‌تر شدن اندازه حفرات به دلیل افزایش نفوذ عوامل خورنده به لایه پسیو در نتیجه تشدید خوردگی حفره‌ای در این نمونه شده است.

- نتایج طیف‌سنجی XRD نشان‌دهنده وجود فاز شاخص نیکل به عنوان جزء اصلی تشکیل دهنده هر سه نمونه بود. در این الگوی پراش، پیک‌های واقع شده در زوایای ۴۴.۴°، ۵۱.۷° و ۷۶.۲° در هر سه نمونه به ترتیب مربوط به صفحات پراش (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۲) ساختار کریستالی نیکل هستند.

- هرچقدر لایه اکسید نیکل موجود بر روی سطح نیکل متراکم‌تر و ضخیم‌تر باشد، شدت پیک‌های مربوط به نیکل زیر لایه کمتر می‌شود. با دقت در نتایج آزمون XRD مربوط به این سه نمونه مشخص است که پس از نمونه واقع شده در دمای ۲۵ °C، نمونه واقع شده در دمای ۴۰ °C، شدت پیک نیکل کمتری داشته است که به دلیل وجود یک لایه‌نازک اکسید نیکل بر روی سطح این ماده است.

- با توجه به نتایج XRD، در دمای ۵۰ °C، به دلیل دمای بالاتر و وابستگی فرآیند نفوذ به دما، مشخص شد که لایه پسیو تشکیل شده کمترین ضخامت و تراکم را نسبت به دو نمونه دیگر داشته و بنابراین تعداد فوتون‌های پرتوایکس بیشتری از روی صفحات نیکل بازتاب نموده و شدت پیک‌های مربوط به این ساختار از دو نمونه دیگر بیشتر است.

- نمونه قرار گرفته در دمای ۲۵ °C بیشترین مقاومت به خوردگی و دو نمونه دیگر مقاومت خوردگی نزدیک به هم دارند به عبارت دیگر وجود لایه‌ای نازک از اکسید نیکل در این نمونه‌ها بر روی سطح باعث شده است که برای رسیدن عوامل خورنده به سطح فعال فلز، نیاز به فرآیند نفوذ باشد.

- نتایج آزمون امپدانس بیانگر آن بود که مقاومت نمونه‌ها با افزایش دمای غوطه‌وری کاهش یافته است که این می‌تواند به دلیل کاهش ضخامت پوشش نازک اکسید نیکل تشکیل شده بر روی سطح با افزایش دمای غوطه‌وری باشد.

- در نمونه غوطه‌ور در دمای ۲۵ °C، یک رفتار پسیوشدگی در شاخه آندی مشاهده شد که به دلیل تشکیل لایه پسیو اکسید نیکل بر روی سطح در این نمونه بود. در نمونه غوطه‌ور در دمای ۴۰ °C نیز اثری از این رفتار در شاخه آندی قابل مشاهده بود اما در نمونه غوطه‌ور در دمای ۵۰ °C تقریباً رفتار از حالت پسیو شدگی به حالت اکتیو تغییر نموده که این بیانگر کاهش ضخامت و تراکم لایه پسیو اکسید نیکل با افزایش دمای غوطه‌وری بود.

- نمونه غوطه‌ور در دمای ۲۵ °C و پس از آن نمونه غوطه‌ور در دمای ۴۰ °C به ترتیب کمترین دانسیته جریان خوردگی را به خود اختصاص دادند. همچنین مشاهده شد که برخلاف نمونه غوطه‌ور در دمای ۲۵ °C که در آن سرعت خوردگی از دو نمونه دیگر به شکل آشکاری کمتر بود (۰/۰۰۸۹ میلی‌متر در سال)، در دو نمونه دیگر سرعت خوردگی نزدیک به هم بوده و برای نمونه‌های غوطه‌ور در دمای ۴۰ °C و ۵۰ °C به ترتیب برابر با ۰/۰۲۰۳ و ۰/۰۲۲۹ میلی‌متر در سال به دست آمد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات و صبرخانواده عزیزم صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم و همچنین از سایر همکاران و دوستانی که هر کدام به نحوی در تهیه این مجموعه با این جانب همکاری داشته‌اند به خصوص شرکت محترم نیروکلر تشکر نموده و موفقیت همه آنها را از خداوند متعال خواهانم.

- [1] N. Anyadike, Nickel alloy steels, in: Nickel, Elsevier, 2002: pp. 103–119. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85573-594-1.50008-6>.
- [2] M. Lewis, Pumps and pumping, in: Food Process Eng. Princ. Data, Elsevier, 2023: pp. 129–134. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821182-3.00053-4>.
- [3] S. Lyon, Overview of corrosion engineering, science and technology, in: Nucl. Corros. Sci. Eng., Elsevier, 2012: pp. 3–30. <https://doi.org/10.1533/9780857095343.1.3>.
- [4] T. Watanabe, Metal corrosion, in: Nano-Plating (II), Elsevier, 2020: pp. 225–296. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821845-7.00003-5>.
- [5] M.R. Zamani Meymian, A. Ghaffarinejad, R. Fazli, A. Kosari Mehr, Fabrication and characterization of bimetallic nickel-molybdenum nano-coatings for mild steel corrosion protection in 3.5% NaCl solution, Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 593 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124617>.
- [6] J. Wu, X. Wu, P. Cheng, N. Dai, J. Li, Y. Jiang, High-temperature corrosion behaviors of typical nickel alloy coatings in a simulated boiler coal ash/gas environment in the Zhundong region, Mater. Corros. 71 (2020) 1102–1112. <https://doi.org/10.1002/maco.201911167>.
- [7] J. Adamiec, High temperature corrosion of power boiler components clad with nickel alloys, Mater. Charact. 60 (2009) 1093–1099. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.03.017>.
- [8] S.B. Mishra, K. Chandra, S. Prakash, Erosion–Corrosion Behaviour of Nickel and Iron Based Superalloys in Boiler Environment, Oxid. Met. 83 (2015) 101–117. <https://doi.org/10.1007/s11085-014-9509-0>.
- [9] F.C. Campbell, Superalloys, in: Manuf. Technol. Aerosp. Struct. Mater., Elsevier, 2006: pp. 211–272. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617495-4/50006-8>.
- [10] Y. HE, L. CHEN, P. LIAW, R. MCDANIELS, C. BROOKS, R. SEELEY, D. KLARSTROM, Low-cycle fatigue behavior of HAYNES® HR-120® alloy, Int. J. Fatigue. 24 (2002) 931–942. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(02\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(02)00009-9).
- [11] S.G.K. Manikandan, D. Sivakumar, M. Kamaraj, Physical metallurgy of alloy 718, in: Weld. Inconel 718 Superalloy, Elsevier, 2019: pp. 1–19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818182-9.00001-3>.
- [12] S. Chomette, J.-M. Gentzmittel, B. Viguier, Creep behaviour of as received, aged and cold worked INCONEL 617 at 850°C and 950°C, J. Nucl. Mater. 399 (2010) 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.01.019>.
- [13] B.B. Galizoni, A.A. Couto, D.A.P. Reis, Heat treatments effects on nickel-based superalloy inconel 713C, Metals (Basel). 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/met9010047>.
- [14] M. Lachowicz, W. Dudziński, K. Haimann, M. Podrez-Radziszewska, Microstructure transformations and cracking in the matrix of γ - γ' superalloy Inconel 713C melted with electron beam, Mater. Sci. Eng. A. 479 (2008) 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.06.064>.
- [15] S. Wang, M. Du, Y. Jin, Q. Li, J. Li, H. Zhang, H. Zhang, Y. Cheng, Characterization and mechanism analysis of interaction between Inconel 713C superalloy and a novel crucible-shell

- “integrated” mold, Vacuum. 209 (2023) 111750. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111750>.
- [16] D. MJ, D. SJ, Superalloys: a technical guide, ASM international, 2002.
- [17] M. Azadi, M. Azadi, Evaluation of high-temperature creep behavior in Inconel-713C nickel-based superalloy considering effects of stress levels, Mater. Sci. Eng. A. 689 (2017) 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.066>.
- [18] T. Gomez, A. Awarke, S. Pischinger, A new low cycle fatigue criterion for isothermal and out-of-phase thermomechanical loading, Int. J. Fatigue. 32 (2010) 769–779. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.11.003>.
- [19] S. WF, H. J, P.-M. F, Foundations of materials science and engineering, 2006.
- [20] W. Yang, Z. Lu, D. Huang, D. Kong, G. Zhao, J. Congleton, Caustic stress corrosion cracking of nickel-rich, chromium-bearing alloys, Corros. Sci. 43 (2001) 963–977. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00119-0](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00119-0).
- [21] D.-J. KIM, H.P. KIM, S.S. HWANG, SUSCEPTIBILITY OF ALLOY 690 TO STRESS CORROSION CRACKING IN CAUSTIC AQUEOUS SOLUTIONS, Nucl. Eng. Technol. 45 (2013) 67–72. <https://doi.org/10.5516/NET.07.2012.021>.
- [22] A. Bakkar, S. Ataya, O. Badr, Failure analysis of heat exchanger tubes of Ni-200 alloy in a titanium tetrachloride vaporizer, J. Pet. Min. Eng. (2020) 0–0. <https://doi.org/10.21608/jpme.2020.22711.1023>.
- [23] M. Abdallah, I. Zaaferany, S. Wanees, R. Assi, Corrosion Behavior of Nickel Electrode in NaOH Solution and Its Inhibition by Some Natural Oils Authors: M. Abdallah, I. A. Zaaferany, S. Abd El Wanees and R. Assi Journal: Int.J.Electrochem Soc,9, 1071-1086(2014)., Int. J. Electrochem. Sci. 9 (2014) 1071–1086.
- [24] M. Yasuda, K. Fukumoto, Y. Ogata, F. Hine, Corrosion Behavior of Ni and Ni-Based Alloys in Concentrated NaOH Solutions at High Temperatures, J. Electrochem. Soc. 135 (1988) 2982–2987. <https://doi.org/10.1149/1.2095473>.
- [25] M. Yasuda, K. Fukumoto, Y. Ogata, F. Hine, Corrosion Behavior of Ni and Ni-Based Alloys in Concentrated NaOH Solutions at High Temperatures, J. Electrochem. Soc. 135 (1988) 2982. <https://doi.org/10.1149/1.2095473>.
- [26] M. Abdallah, M.M. Salem, I.A. Zaaferany, A. Fawzy, A.A.A. Fattah, Corrosion Performance of Stainless Steel and Nickel Alloys in Aqueous Sodium Hydroxide as Revealed from Cyclic Voltammetry and Potentiodynamic Anodic Polarization, Orient. J. Chem. 33 (2017) 2875–2883.
- [27] M. Yasuda, F. Takeya, F. Hine, Corrosion Behavior of Nickel in Concentrated NaOH Solutions under Heat Transfer Conditions, Corrosion. 39 (1983) 399–405. <https://doi.org/10.5006/1.3593879>.
- [28] K. Hashimoto, K. Asami, XPS study of surface film on nickel alloys in hot concentrated NaOH, Corros. Sci. 19 (1979) 427–435. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-938X\(79\)90041-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-938X(79)90041-6).
- [29] R. Lotfi, P. Derakhshi, S. a. Khorramie, Effect of temperature on synthesis and morphology

- of nickel doped cobalt ferrite in presence of H₂O₂ by Co-precipitation route, *World Appl. Sci. J.* 18 (2012) 929–932. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.07.1122>.
- [30] J. Moavi, F. Buazar, M.H. Sayahi, Algal magnetic nickel oxide nanocatalyst in accelerated synthesis of pyridopyrimidine derivatives, *Sci. Rep.* 11 (2021) 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85832-z>.
- [31] H. Badenhorst, Microstructure of natural graphite flakes revealed by oxidation: Limitations of XRD and Raman techniques for crystallinity estimates, *Carbon N. Y.* 66 (2014) 674–690. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.09.065>.
- [32] F. Hajipour, S. Asad, M.A. Amoozegar, A.A. Javidparvar, J. Tang, H. Zhong, K. Khajeh, Developing a fluorescent hybrid nanobiosensor based on quantum dots and azoreductase enzyme formethyl red monitoring, *Iran. Biomed. J.* 25 (2021). <https://doi.org/10.29252/ibj.25.1.8>.
- [33] A.A. Javidparvar, B. Ramezanzadeh, E. Ghasemi, An overview on the anti-corrosion properties of the pigments based on iron oxide nanoparticles, *J. Stud. Color World.* 4 (2015) 47–60.
- [34] A.A. Javidparvar, M.A. Mosavi, B. Ramezanzadeh, Nickel-aluminium bronze (NiBRAl) casting alloy tribological/corrosion resistance properties improvement via deposition of a Cu-doped diamond-like carbon (DLC) thin film; optimization of sputtering magnetron process conditions, *Mater. Chem. Phys.* 296 (2023).
- [35] T. Hong, M. Nagumo, Effect of surface roughness on early stages of pitting corrosion of Type 301 stainless steel, *Corros. Sci.* 39 (1997) 1665–1672. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(97\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(97)00072-3).
- [36] A.R. Shahmoradi, N. Talebibahmanbigloo, C. Nickhil, R. Nisha, A.A. Javidparvar, P. Ghahremani, G. Bahlakeh, B. Ramezanzadeh, Molecular-MD/atomic-DFT theoretical and experimental studies on the quince seed extract corrosion inhibition performance on the acidic-solution attack of mild-steel, *J. Mol. Liq.* (2021) 117921. <https://doi.org/10.1016/J.MOLLIQ.2021.117921>.
- [37] J.M. Ghosh, Corrosion Behaviour of 304 and 316 Austenitic Stainless Steel in Strong Sulphuric Acid, *Int. J. Adv. Res. Sci. Commun. Technol.* 2 (2022) 62–70. <https://doi.org/10.48175/568>.
- [38] M. Furko, Y. Jiang, T.A. Wilkins, C. Balázs, Electrochemical and morphological investigation of silver and zinc modified calcium phosphate bioceramic coatings on metallic implant materials, *Mater. Sci. Eng. C.* 62 (2016) 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.01.060>.
- [39] M.-H. Yen, J.-H. Liu, J.-M. Song, S.-C. Lin, Electrochemical Corrosion Properties of Commercial Ultra-Thin Copper Foils, *J. Electron. Mater.* 46 (2017) 5150–5157. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5517-6>.
- [40] S. Kamrani, C. Fleck, Biodegradable magnesium alloys as temporary orthopaedic implants: a review, *BioMetals.* 32 (2019) 185–193. <https://doi.org/10.1007/s10534-019-00170-y>.

بالا بردن ضریب تأثیر آموزش‌های خوردگی برای مهندسان فرآیند جانبی و افسایت در پالایشگاه‌های گاز و دیگر صنایع انرژی

محمد رضا حامد غفاریان

رئیس جانبی‌ها و تصفیه‌خانه‌ی فازهای ۲۰ و ۲۱ پارس جنوبی، مجتمع گاز پارس جنوبی، شرکت ملی گاز ایران

*پست الکترونیک: mohamedreza.hamedghafarian@gmail.com

نیاز به آموزش خوردگی، روش‌های پیشگیری از وقوع و کاهش آثار آن در تجهیزات موجود در سایت‌های جانبی و افسایت پالایشگاه‌های گاز و دیگر صنایع انرژی یکی از اساسی‌ترین الزامات آموزشی برای متخصصین مهندسی فرآیند محسوب می‌شود. مهندسی فرآیند در شکل اصیل خود دنبال‌کننده‌ی انحرافات فرآیندی، شناسایی دلایل وقوع آن‌ها، اندازه‌گیری میزان تأثیرشان بر روند تولید محصولات و در نهایت برنامه‌ریزی برای اجرای روش‌های حذف یا کاهش آثار آن‌هاست. در این میان تداوم - یا در مواردی وقوع لحظه‌ای - برخی از این انحرافات باعث ایجاد نطفه‌ی خوردگی و در نهایت تخریب تجهیزات مرتبط با تولید محصولات می‌گردد. ضریب تأثیر آموزش‌های مرتبط با خوردگی به ما می‌گوید آیا آموزش‌های ارائه شده در راستای افزایش مهارت مهندسان فرآیند در این زمینه بوده است؛ و اگر پاسخ مثبت است چه بخشی از نیازهای روزمره و گاه‌گاهی آن‌ها پوشش داده شده است. ضرورت حفظ اموال موجب می‌شود موضوع خوردگی آنقدر اهمیت داشته باشد که برای طرح‌ریزی آموزشی ابتدا به یک پیکره‌بندی معنی‌دار برای آن فکر شود. این پیکره‌بندی آموزشی باید دارای یک مجموعه ویژگی‌های مشخص باشد که باید مورد توجه جدی استراتژیست‌های سازمان قرار گیرد. رسیدن به ضریب تأثیر بالای آموزش در این زمینه با ابزاری به نام "شناخت" محقق می‌شود و به صورت منطقی یک پیکره‌بندی آموزشی مناسب باید بر اساس آن انتخاب شود. شناخت درست مقاومت‌های گوناگون ذاتی و ایجاد یک سازمان آخرین تکه‌ی پازلی است که طرح نهایی رسیدن به یک آموزش با ضریب تأثیر بالا را بر ما نمایان می‌کند.

مهندسی جانبی و افسایت

جانبی‌ها در یک سایت پالایشگاهی به فرآیندهای اصلی - تولیدی کمک می‌کنند تا تداوم یابند. برق موتورها، بخار مورد نیاز برای آغاز واکنش، گرمادهی، رقیق‌سازی، آب خنک‌کننده، آب بدون املاح، آب آشامیدنی، هوای مورد نیاز برای فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری، هوای ابزار دقیق، هوای فرآیندی، گاز سوختی و نیتروژن برای کاربردهای گوناگون همه و همه در اختیار فرآیندهای تولیدی قرار دارند. افسایت می‌تواند شامل فرآیندهایی با ماهیت متفاوت از بخش تولید محصولات باشد. از جمله‌ی این فرآیندها می‌توان به عملیات ذخیره‌سازی، بهره‌برداری از اسکله‌ی فروش، عاری‌سازی آب ترش، ذخیره‌سازی مواد شیمیایی، بازیابی حلال‌ها و تصفیه‌ی

نقطه‌ی شبنم، اسیدیته، رطوبت نسبی، قلیائیت، pH، ترکیب درصد، سختی، کل جامدات محلول، اکسیژن محلول، سن لجن، اندیس ته نشینی لجن، نسبت خوراک به میکروب و بسیاری پارمترهای دیگر از جمله‌ی رایج‌ترین پارمترهای راهبری فرآیندی هستند. در اسناد طراحی و ساخت یک پالایشگاه گاز آورده شده است که مجموعه‌ی پارمترها در یک واحد فرآیندی باید در یک وضعیت مشخص قرار داشته باشند تا محصولی از آن واحد به دست آید که دارای مشخصات مورد نظر طراح باشد. اگر این پارمترها از نظر مقداری دقیقاً همان پارمترهایی نباشند که طراح در اسناد ساخت به آن‌ها اشاره نموده است؛ آنگاه باید منتظر یک رخداد در سایت بود. این یک رخداد لحظه‌ای نیست بلکه یک تغییر پایدار یا ناپایدار در شرایط است که تا هنگام بازنگشتن پارمتر به مقدار مورد نظر طراح فرآیند آن واحد باقی خواهد ماند. به صورت مشخص به این تغییر در وضعیت راهبری یک انحراف گفته می‌شود. یک انحراف می‌تواند دارای تبعات بسیار بزرگ و دیگری هیچ اثر مشخصی بر کل فرآیند نداشته باشد. اما سه وجه مشترک در مواجهه با تمام آن‌ها وجود دارد که در زیر آورده شده‌اند:

(آ) شناسایی چرایی به وجود آمدن هر انحراف،
(ب) اندازه‌گیری میزان بزرگی آن‌ها و تأثیرشان بر بازدهی کلی فرآیند،

(پ) طرح‌ریزی برای مرتفع نمودن آن‌ها، یا کاهش اثر آن‌ها در یک بازه‌ی زمانی مشخص از روزهای عملیاتی.

بخش ب برتابنده‌ی یک نگاه انحصارگرا پیرامون راهبری فرآیندهای یک پالایشگاه است. چرا باید اندازه‌گیری بزرگی یک انحراف تنها در راستای تأثیر آن بر بازدهی کلی فرآیند انجام شود؟ بدیهی است که هدف از طراحی، اجرای مراحل ساخت و سپس بهره‌برداری از یک سایت جانبی و آفاسایت؛ تولید محصولات و ارائه‌ی خدمات متنوع به سایر بخش‌های تولیدی یک پالایشگاه است، اما چنین نگاهی نسبت به انحراف‌های فرآیندی موجب می‌شود به تأثیر آن‌ها بر مهم‌ترین بخش یک صنعت یعنی دارایی‌های فیزیکی نصب شده در واحدهای فرآیندی توجه نشود.

از جملات بالا به درستی می‌توان دریافت که تأثیر یک انحراف فرآیندی بر ایجاد خوردگی در تجهیزات حاضر در واحد فرآیندی

پساب‌های صنعتی اشاره نمود.

فرآیندهای مختلفی از جمله فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در این دو بخش وجود دارند که ضرورت حضور یک مجموعه مهندسان فرآیند را در آن‌ها به اثبات می‌رساند. هر کدام از این فرآیندها بر اساس نیاز به رسیدن به مشخصه‌های از پیش تعیین شده از محصولات گوناگون طراحی شده و انتظار می‌رود که مطابق با اهداف طراحی از آن‌ها بهره‌برداری گردد. مسئولیت نظارت بر بهره‌برداری از این بخش‌ها و فرآیندهای درونشان بر عهده‌ی مهندسان فرآیند است. مشخصات خوراک، افزودنی‌های فرآیندی، حلال‌ها، سطح در دسترس بودن تجهیزات ثابت و دوار، ابزار دقیق، خطای انسانی و در آخر ناپایداری بودن فرآیند به دلایل گوناگون همه جزئی از عوامل به وجود آورنده‌ی انحراف در راهبری این فرآیندهای طراحی شده نسبت به حالتی است که به عنوان مرجع در اسناد آورده شده است. هر یک از این انحراف‌ها بنا به دلیلی مشخص رخ داده و انتظار می‌رود این دلایل چه در یک ارتباط معنی‌دار و زنجیره‌ای با یکدیگر بوده و چه به صورت مستقل به وجود آورنده‌ی یک انحراف مشخص باشند؛ کاملاً شناخته شده و برای رفع آن‌ها برنامه‌ریزی گردد و اگر در یک بازه‌ی زمانی مشخص - که در یک تعریف شخصی گزارنده آن را سطح تحمل‌پذیری فرآیند از یک انحراف مشخص می‌نامد - امکان مرتفع نمودن آن‌ها وجود نداشت؛ سپس برای کاهش تأثیر فرآیند از این انحراف‌ها برنامه‌ریزی گردد.

این جملات به اختصار بیانگر فعالیت‌هایی بود که یک مهندس فرآیند جانبی در صنایع انرژی با آن مواجه است و می‌توان انتظار داشت که چهارچوب کلی کار در این بخش تفاوت چندانی با دیگر صنایع نکند، مگر اینکه نظام تقسیم وظایف دارای یک طراحی مشخص بوده باشد. به عنوان مثال بخشی از انحراف‌های فرآیندی با یک نتیجه‌ی اقتصادی مشخص به بهره‌بردار محول شود و مهندس فرآیند پیرامون آن تحلیلی ارائه ندهد و یا مسئولیت استنباط از نتایج کنترل کیفیت در برخی صنایع انرژی بر عهده‌ی آزمایشگاه باشد.

انحراف‌های فرآیندی

فرآیندهای جانبی و آفاسایت را با پارمترهای فیزیکی و شیمیایی قابل لمس طراحی و راهبری می‌کنند؛ فشار، دما، سرعت، توان،

و سرعت بخشیدن به مکانسیم‌های تخریب دقیقاً به اندازه‌ی کاهش بازدهی تولید و یا نرسیدن به تعهد از نظر کیفیت یا کمیت از پیش تعیین شده‌ی محصول دارای اهمیت فراوان است. از این رو هرگونه احتمال ایجاد خوردگی در تجهیزات فرآیندی که ناشی از انحراف‌های معنی‌دار باشند در ابتدا باید شناسایی شده و سپس برای آموزش چگونگی مواجه شدن مهندسان فرآیند با آن‌ها برنامه‌ریزی گردد.

این نوشته به این نکته می‌پردازد که با توجه به اینکه مهندسان فرآیند شاید دارای دیدی همه جانبه نسبت به مواد ساخت و روش‌های محافظت از آن‌ها در مقابل محرک‌های گوناگون خوردگی در مقایسه با یک متخصص علم مواد نباشند، و از طرفی به دلیل تسلط بالای این افراد بر جزئیات فرآیندی و به کارگیری همزمان دانش‌های مختلف به طور قطع یکی از اصلی‌ترین گزینه‌ها آموزش با ضریب تأثیر بالا برای این متخصصان در راستای درک بهتر مکانسیم‌های خوردگی و تخریب و عوامل محرک آن‌ها در تجهیزات فرآیندی گوناگون است. همچنین نویسنده در این یادداشت تصمیم دارد بر اساس تجارب پیشین خود پیرامون ضریب تأثیر پایین آموزش‌ها به مهندسان فرآیند استفاده نموده و همزمان با توجه به اهمیت آموزش‌های خوردگی به بخش فرآیند، مفهوم ضریب تأثیر آموزش در این زمینه را به روشنی تعریف نماید و ذهن کارشناسان بخش آموزش و برخی از مهندسان مشاور در پیاده‌سازی مدیریت خوردگی و مدیریت دانش خوردگی را به سوی برخی داشته‌های سازمانی و نیز مقاومت‌های ذاتی و ایجاد آن سوق دهد.

مفهوم ضریب تأثیر

این مفهوم یک کمیت قابل اندازه‌گیری و از پیش تعیین شده برای هر واحد فرآیندی در صنعت است. به صورت ساده می‌توان آن را به چهار بازه‌ی شدت خوردگی از عالی تا ضعیف طبقه‌بندی نمود. ولی با توجه به اینکه همیشه قرار نیست که از بخش‌های مختلف یک سایت بازرسی انجام شود، شدت خوردگی اندازه‌گیری و مصادیق عینی خوردگی و تخریب مشاهده گردد؛ می‌توان از پیش تعریف‌هایی استفاده نمود که بر اساس آن‌ها پارامترهایی قابل اندازه‌گیری استخراج شده و نتایج واقعی این پارامترها به مهندسان بگوید که آیا وضعیت واحدها و فرآیندهای تحت اختیارشان از نظر

نزدیکی به شرایط خوردگی مناسب است یا خیر.

به روشنی ضریب تأثیر باید به مهندسان فرآیند مشغول به کار در یک پالایشگاه گاز بگوید که آموزش‌های ارائه شده در راستای افزایش مهارت‌هایشان برای شناخت پتانسیل‌های خوردگی در واحد تحت اختیار آن‌ها بوده‌اند؛ و اگر این طور است چه بخشی از نیازهای روزمره و گاه‌گاهی آن‌ها را پوشش داده‌اند؟

آموزش دادن به یک مهندس فرآیند تا خوردگی بداند

در این بخش به این موضوع پرداخته می‌شود که اگر هدف متعالی یک صنعت فرآیندی مانند پالایشگاه گاز این باشد که مهندسان فرآیند آن، به عنوان نزدیک‌ترین اجزای سیستم به آنچه ارتباط مستقیم به تولید محصولات دارد، به صورت کامل با مفاهیم خوردگی و آثار انحراف‌های فرآیندی بر ایجاد و تسریع مکانسیم‌های خوردگی آشنا باشند و به صورتی مؤثر از آموخته‌های خود و داشته‌های سازمان استفاده نمایند؛ ممکن است یکی از سه پیکره‌بندی زیر برای آموزش ایشان انتخاب شوند:

آ) ارائه‌ی یک مدل برای انطباق شرایط بهره‌برداری با آن

این مدل همان است که به صورت مبنایی در طراحی پایه‌ی جانبی‌ها و افسایت یک پالایشگاه گاز و دیگر صنایع انرژی وجود دارد. ارائه‌ی یک مدل یا چهارچوب مشخص برای انتخاب مواد ساخت تجهیزات فرآیندی، طراحی مکانیکی سرعت سیالات و احجام تجهیزات فرآیندی، تدوین مشخصه‌های مربوط به کنترل کیفیت محصولات میانی و نهایی، طراحی تجهیزات مربوط به تزریق مواد شیمیایی که با کنترل خوردگی ارتباط مستقیم دارند مانند انواع بازدارنده‌ها، اکسیژن‌زداها، آمین‌های خنثی‌کننده و سایر افزودنی‌های معدنی و آلی به فرآیندهایی که درگیر با آب و پساب هستند و تدوین سند انتخاب مواد شیمیایی و حلال‌ها برای فرآیندهای جانبی و افسایت یک پالایشگاه.

برای آموزش این موارد اولین چیزی که به فکر فردی هوشمند می‌رسد شاید این باشد که: ارائه‌ی این مدل با توجه به اینکه در طراحی پایه‌ای یک پالایشگاه به صورت پراکنده و مستتر در دیگر اسناد ساخت وجود دارد احتمالاً کار ساده‌ای است و با صرف وقت در یک دوره‌ی شناسایی عناوین، نیازسنجی و پس از آن طرح‌ریزی برای آموزش بتوان مفاهیم بسیاری را به مهندسان فرآیند آموخت. در اصل این مدل پیش از آنکه یک چهارچوب

راهنمای خوردگی واحد (یا شناسنامه‌ی خوردگی واحد فرآیندی) و سپس ساخت یک قالب برای جای گرفتن توصیه‌های فنی در آن

این پیکره‌بندی دارای مدل آموزشی فراگیریِ حین کار در خود است. مهندسان فرآیند با هر سطحی از دانش و نیز سابقه‌ی فعالیت صنعتی در یک مدت زمان مشخص در جریان آموزش مفاد مرتبط با خوردگی در بخش‌های تحت کنترلشان قرار می‌گیرند. در این پیکره‌بندی آموزشی تمامی باید‌ها و نبایدهای مرتبط با خوردگی در یک واحد فرآیندی مشخص به یک مهندس فرآیند ارائه شده و روند آموزش وی در یک بازه‌ی زمانی مشخص به پیش می‌رود. سپس بر اساس تسلط مدرس یا تیم آموزگاران صنعتی در این زمینه تمامی نکات مربوط به پتانسیل‌های خوردگی در ابعاد گوناگون راهبری آن واحد فرآیندی شناسایی شده و در قالب یک سند راهنمای خوردگی واحد فرآیندی (یا شناسنامه‌ی خوردگی واحد فرآیندی) به مهندس فرآیند ارائه می‌گردد. این پیکره‌بندی تا اینجا شاید بتواند بخش بزرگی از نیازهای فراگیری دانش خوردگی را برای یک مهندس فرآیند در یک پالایشگاه گاز یا دیگر صنایع انرژی تأمین نماید. با این وجود این نوع پیکره‌بندی آموزشی زمانی می‌تواند به صورت تثبیت شده در آمده و یک پالایشگاه را از مزایای پیاده‌سازی خود بهره‌مند نماید که دارای ساز و کارهای مشخص برای جای گرفتن تجارب ثبت شده، توصیه‌های فنی و پس از آن دسترسی نسل‌های بعدی مهندسان فرآیند به این اسناد باشد.

این امکان وجود دارد که ترکیبی از این سه پیکره‌بندی پیشنهادی برای یک پالایشگاه گاز یا هر صنعت مشخص دیگر مورد استفاده قرار گیرد. آنچه اهمیت فراوان دارد انتخاب یک پیکره‌بندی آموزشی است که در سازگاری کامل با نوع فرآیندهای جاری، اهداف و استراتژی‌ها، هویت فنی مهندسان فرآیند، زیرساخت‌های موجود و در پایان پتانسیل سازمان برای اعمال تغییرات مهم در خود باشد. جدول زیر (شماره ۱) مقایسه‌ای است میان ویژگی‌های سه پیکره‌بندی پیشنهادی برای آموزش خوردگی به مهندسان فرآیند. در این جدول به هر یک از این ویژگی‌ها یک امتیاز پایین، میانه و بسیار داده شده است. در دو مورد هم به دلیل عدم پوشش پیکره‌بندی نوع آموزش مورد نظر نسبت به ویژگی‌های برشمرده شده از عبارت " دیده نشده است" استفاده شد.

مشخص آموزش باشد؛ یک رویه‌ی کاری مناسب است که از اسناد ساخت یک پالایشگاه استخراج شده و برای اجرا و پس از آن نظارت بر درستی آن به سازمان ابلاغ می‌شود. با این حال جنبه‌ی رویکرد آموزشی داشتن آن می‌تواند به این مربوط باشد که شاید مجموعه‌ی آموزش‌های دانشگاهی و یا صنعتی ارائه شده پیش از ورود یک مهندس به سایت صنعتی دارای ضریب تأثیر مناسب برای به مرحله‌ی اجرا درآوردن این مدل مؤثر کاری نباشد و باید برای به مرحله‌ی تثبیت رسانیدن فراگرفته‌ها در این زمینه دست به دامن یک مجموعه آموزش‌های جدی شد.

ب) فراگرفتن مفاهیم محض خوردگی در دوره‌ی آموزشی و سپس واگذار نمودن ادامه‌ی کار به نوزایی و استنباط‌های مهندسان فرآیند از کار و تجربیات درون سازمانی آن‌ها

می‌توان به فارغ‌التحصیلان مهندسی شیمی در ابتدای ورود به صنعت فرآیندی - و در اینجا به صورت مشخص یک پالایشگاه گاز - مفاهیم خوردگی و مکانیسم‌های گوناگون و مرسوم آن را آموزش داد. سپس در عمل منتظر آن بود که آموزش‌های فراگرفته شده در کار مهندسی فرآیند با نوزایی‌های ذهنی و استنباط از شرایط و تطبیق با آموخته‌های فراگرفته شده به مرحله‌ی عمل برسد و سازمان از مزایای آموزش‌های صرف شده بهره‌مند گردد. در این پیکره‌بندی نکته‌ای که باید به آن توجه کافی شود برقرار بودن یک نظام ثبت و به اشتراک‌گذاری تجربیات فرآیندی است (مدیریت دانش)؛ حال این تجربیات صرفاً در ارتباط با فرآیند به صورت محض باشد و یا آثار انحراف‌های موجود در فرآیندها را بر روی تسریع نرخ خوردگی مورد توجه قرار دهد. الزامی است که گفته شود برخی از این نظام‌های ثبت و به اشتراک‌گذاری تجربیات به صورت پیش فرض در رویه‌های کاری بین دیپارتمان‌های حاضر در یک پالایشگاه وجود دارند و تنظیم یک برنامه‌ی آموزشی در این نوع از پیکره‌بندی باید با پابندی ستخگیرانه نسبت به آن رویه‌های جاری و/یا فراموش شده صورت گیرد. بدیهی است که هر کجا فقدان یک بخش جدید در این رویه‌های جاری یا فراموش شده حس شد به راحتی می‌توان برای جبران کمبودها اقدام به تعریف و جاری‌سازی یک بخش جدید برای افزایش کارایی روندهای پیشین نمود.

پ) استفاده از مدل‌های آموزش "فراگیری حین کار" و طبقه‌بندی نمودن مکانیسم‌های احتمالی در قالب سند

جدول ۱: ویژگی‌های پیکره‌بندی آموزش خوردگی به مهندسان فرآیند

ویژگی	پیکره‌بندی ۱	پیکره‌بندی ب	پیکره‌بندی پ
۱. نیاز به بازتعریف شرح وظایف سازمانی	کم	بسیار	بسیار
۲. نیاز به تغییر نگرش بنیادی در شکل آموزش به مهندسان فرآیند	حالت	کم	بسیار
۳. رسد مورد نیاز برای پیاده‌سازی و تثبیت رویه‌ها و به دست آمدن نتیجه‌ی مطلوب	سیانه	بسیار	بسیار
۴. امکان پیاده‌سازی رویه‌های روتین ثبت تجارب و توصیه‌های صنعتی (مدیریت دانش)	دیدۀ نشده است	میانه	بسیار
۵. امکان بهره‌مندی از تجارب شخصی افراد	دیدۀ نشده است	بسیار	کم
۵. احتمال بروز خطا در اثر تثبیت رویه‌های نادرست و تا از پیش تعیین شده‌ای که هم اکنون به دست فراموشی سپرده شده‌اند یا کارایی خود را از دست داده‌اند	بسیار	بسیار	کم
۷. هزینه‌ی پیاده‌سازی	کم	کم	بسیار
۸. تکمیل ایجاد بیشترین حسن مشارکت در اجرای کار	کم	کم	میانه
۹. امکان رسیدن به حداکثر تمرکز و وحدت رویه در اجرای کار	کم	کم	بسیار

پالایشگاه گاز و دیگر صنایع انرژی گردد. امکان پیاده‌سازی رویه‌های روتین ثبت تجارب و توصیه‌های صنعتی (مدیریت دانش): مسیر جستجو برای یک پیکره‌بندی کارآمد آموزشی پیرامون خوردگی قطعا از ایستگاه مهم ثبت تجارب و توصیه‌های صنعتی به صورت روتین خواهد گذشت. این رویه باید به عنوان بخشی از پیکره‌بندی آموزش خوردگی در یک پالایشگاه گاز یا دیگر صنایع انرژی به سازمان معرفی گردد، در غیر این صورت همه‌ی تلاش‌ها برای تربیت کلاسیک مهندسان فرآیند آشنا به خوردگی و نیز بهره‌مندی سازمان از خدمات آن‌ها با شکست مواجه خواهد شد. امکان بهره‌مندی از تجارب شخصی افراد: یکسان نبودن سطح مهارت و دانش نسبت به خوردگی و ارتباط آن با نحوه‌ی راهبری و محاسبات مهندسی فرآیند به ویژه در بخش‌های مرتبط با آب و بخار موضوعی اجتناب ناپذیر است. سطح دسترسی متفاوت به اسناد صنایع مشابه دیگر، کتاب‌ها، مقالات و یادداشت‌های منتشر شده، مجلاتی که محتوی توصیه‌های فنی و صنعتی جهت‌دار نسبت به تحلیل یک موضوع مشخص هستند و در نهایت ارتباط شخصی با افراد متخصص در چهارچوبی غیر از سازمان، همه و همه می‌توانند موجب برتری سطح مهارت در میان مهندسان فرآیند گردد. اینجا یک انتخاب باید انجام شود؛ افراد کارآزموده را با سطح مهارت بالا که در سازمان در طول سالیان رشد نموده‌اند به هر قیمتی حفظ کرده و دیگر اینکه به مهارت آن‌ها احترام گذاشته و در ضمن تصمیم بگیریم برای آموزش فراگیر تمامی شاغلین در این حرفه اقدام به طرح‌ریزی کنیم، در حالی که تا استقرار یک پیکره‌بندی آموزشی درخور امیدی به دست به دست شدن تجارب و دانش خوردگی در سازمان نداشته باشیم.

در اینجا سعی شده است برای روشن‌تر شدن هر یک از ویژگی‌های برشمرده شده توضیح کوتاهی ارائه گردد:

نیاز به بازتعریف شرح وظایف سازمانی: باید به یاد داشته باشیم که برخی آموزش‌ها برای پیاده‌سازی در سازمان نیاز به بازتعریف برخی از شرح وظایف‌های سازمانی دارند. توجه به این بازتعریف از مناظر گوناگونی مهم است که مهم‌ترین آن‌ها ارزیابی سطح آمادگی سازمان برای پذیرش تغییر در این راستا است که باید توسط عالی‌ترین سطح مدیریت سازمان تخمین زده شود.

نیاز به تغییر نگرش بنیادی در شکل آموزش به مهندسان فرآیند: به هر رو آموزش‌های صنعتی از یک شکل واحد برای نیازسنجی و طرح‌ریزی برای اجرا پیروی می‌کنند ولی در صورتی که شرایط عملیاتی و امکانات موجود در یک صنعت مدیران ارشد آن را به انتخاب یک پیکره‌بندی آموزشی مؤثر در زمینه‌ی خوردگی سوق دهد؛ آنگاه حتما باید این انتخاب با یک تغییر نگرش بنیادی همراه باشد.

زمان مورد نیاز برای پیاده‌سازی و تثبیت رویه‌ها و به دست آمدن نتیجه‌ی مطلوب: به طور کلی هر صنعتی دارای لختی‌های ذاتی خود در پیاده‌سازی و به مرحله‌ی تثبیت رسانیدن رویه‌های جدید است. در این میان انتخاب یک پیکره‌بندی آموزشی که بتواند علاوه بر صرف وقت برای جبران لختی ذاتی، یک بار سنگین بر روی دوش مجریان آن نباشد می‌تواند یک موفقیت مهم قلمداد شود. با این حال در انتخاب یک پیکره‌بندی مناسب برای آموزش خوردگی به مهندسان فرآیند شاید یک اجبار به پذیرش برنامه‌های بلند مدت وجود داشته باشد و داشتن نگاهی با ارزیابی منفی نسبت به برنامه‌هایی با طول مدت پیاده‌سازی بالا، نباید ملکه‌ی ذهن مدیران ارشد در یک

گرفت که دارای ساز و کار روشنی برای حفاظت تجهیزات فرآیندی در برابر آن دسته از انحراف‌های فرآیندی نباشند که موجب خوردگی می‌شوند. در این صورت انتظار پیاده‌سازی یک سیستم جدید و تثبیت رویه‌های جدید بر اساس بازخوردهای پیکره‌بندی آموزشی پیشنهادی، انتظاری دور از ذهن نیست و بدیهی است که اگر این پیکره‌بندی آموزشی پیشنهادی در درون خود مکانیسم‌های ایجاد حس مشارکت را داشته باشد می‌تواند در مراحل بعدی بازتعریف سازمان و اقتباس شرح وظایف کارکنان از نتایج آن، مورد بهره‌گیری بیشتری قرار گیرد.

امکان رسیدن به حداکثر تمرکز و وحدت رویه در اجرای کار: اگر یک پیکره‌بندی آموزشی پیرامون خوردگی آنقدر کارایی داشت که بتواند موجب رسیدن به حداکثر تمرکز و نیز ایجاد وحدت رویه در سازمان شود؛ آنگاه حتماً باید به طراحان آن تبریک گفت.

بالابردن ضریب تأثیر آموزش‌های خوردگی

در بخش پیشین سه پیکره‌بندی آموزشی متفاوت ارائه و پیرامون هر یک توضیحاتی آورده شد. سپس ویژگی‌های هر یک از این پیکره‌بندی‌ها شناسایی، مقایسه و به هر کدام یک امتیاز داده شد. اما در اختیار داشتن یک پیکره‌بندی مناسب به تنهایی نمی‌تواند به مدیران ارشد یک صنعت این اطمینان را بدهد که ضریب تأثیر این آموزش‌ها در سطح بالایی قرار خواهد گرفت. برای این منظور باید اندکی عمیق‌تر شد و ریشه‌های برخی ناکامی‌ها در طرح‌ریزی و اجرای یک پیکره‌بندی آموزشی - در صورت وجود - را در جای دیگری جستجو نمود. برای دریافتن پاسخ این پرسش که: "ضریب تأثیر آموزش‌های خوردگی به مهندسان فرآیند چگونه بالا می‌رود؟ باید اساسی‌ترین مرحله در اقدام به طرح‌ریزی آموزشی؛ یعنی "شناخت" را پشت سر گذاشت. این شناخت دارای جنبه‌های گوناگونی است:

(آ) آگاهی از سطح دانش مهندسان فرآیند پیرامون خوردگی‌های مرتبط با واحدهای فرآیندی تحت اختیارشان،

(ب) آگاهی از فرهنگ حاکم در سازمان پیرامون مدیریت دارایی‌های فیزیکی،

(پ) آگاهی از زیرساخت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری سازمان از منظر امکان پیاده‌سازی آموزش‌های فراگرفته شده،

احتمال بروز خطا در اثر تثبیت رویه‌های نادرست و یا از پیش تعیین شده‌ای که هم اکنون به دست فراموشی سپرده شده‌اند یا کارآیی خود را از دست داده‌اند: باید پذیرفت که این نوشته و البته صد در صد آن چیزی که یک پیکره‌بندی آموزشی این چنینی با آن مواجه است به آموزشهای تکمیلی دانشگاهی و یا مهندسان تازه کاری که وارد صنعت شده‌اند مربوط نمی‌شود. از این رو تمامی پیکره‌بندی‌های مورد اشاره در این یادداشت به شرایطی اشاره دارند که احتمالاً مهندسان فرآیند نسبت به سابقه‌ی خود در یک صنعت مشخص به رویه‌های پیشین عادت کرده‌اند؛ خواه این رویه‌ها نادرست باشند و یا از یک سیستم درست به ارث گرفته شده باشند و اکنون بنا به دلایلی به دست فراموشی سپرده شده و یا کارآیی خود را از دست داده‌اند. در این شرایط پیکره‌بندی آموزشی باید دارای گزینه‌های اضافی باشد همچون: (آ) در نظر گرفتن دوره‌ی تثبیت و دریافت بازخورد، (ب) همراه شدن مشاوره‌ی فنی و مهندسی در یک دوره‌ی زمانی مشخص و (پ) اندازه‌گیری ضریب تأثیر در فواصل زمانی کوتاه به ویژه در دوره‌ی تثبیت و بازخورد به تغییر پیکره‌بندی آموزشی در صورت نیاز.

هزینه‌ی پیاده‌سازی: بدیهی است که بسته به حجم خدمات مورد نیاز در پیکره‌بندی آموزشی و نیز میزان فاصله داشتن آن صنعت با آنچه که ایده‌آل است؛ هزینه‌ی پیاده‌سازی یک پیکره‌بندی آموزشی می‌تواند تغییر کند. در مورد یک پالایشگاه به دلیل مقایسه‌ناپذیر بودن میزان خسارات احتمالی خوردگی در برابر هزینه‌ی صرف شده برای آموزش به راحتی می‌توان پذیرای هر حجمی از یک پیکره‌بندی پیشنهادی برای آموزش بود، ولی برای صنایع فرآیندی دیگر انتخاب میان چند پیکره‌بندی می‌تواند بر اساس ملاحظات اقتصادی انجام شود.

پتانسیل ایجاد بیشترین حس مشارکت در اجرای کار: یک ویژگی بسیار مهم پیکره‌بندی آموزشی مناسب برای خوردگی در یک صنعت آن است که دقیقاً مشخص شود این روش (پیکره‌بندی) چه پتانسیلی را برای ایجاد بیشترین حس مشارکت دارد. باید پذیرفت که اصولاً اقدام به طرح‌ریزی یک یا چند دوره‌ی آموزشی زمانی رخ می‌دهد که فقدان یک سیستم برای جاری‌سازی اهداف و حرکت به سمت افزایش بهره‌وری حس گردد. بنابراین باید انتظار داشت که صناعی هدف چنین آموزش‌های قرار خواهند

شناخته می‌شوند، مقاومت‌هایی که باید به روشنی شناخته شده و روش درست برخورد با هر یک قبل از اقدام به پیکره‌بندی یک مجموعه آموزش‌های خوردگی به مهندسان فرآیند مورد ارزیابی قرار گیرد. ضریب تأثیر بالای آموزش‌های خوردگی به مهندسان فرآیند زمینه‌ی استقرار یک سیستم مدیریت خوردگی کارآمد را فراهم می‌کند و موجب می‌شود بستر رشد فنی و شکل‌گیری بخش‌های جدیدی از هویت فنی مهندسی فرآیند به وجود آید.

ت) آگاهی از رویه‌های استاندارد و پیشین سازمان که در حال حاضر به دست فراموشی سپرده شده‌اند یا کارایی خود را از دست داده‌اند،

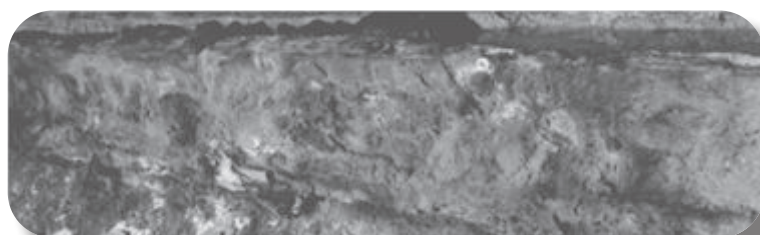
ث) آگاهی از توان مالی و تصمیم جدی سازمان برای بهره‌مندی بیشتر از آموخته‌های موجود در نتیجه‌ی ارائه‌ی آموزش‌های خوردگی.

این موارد برشمرده شده همگی به عنوان مقاومت‌های سازمان

نتیجه‌گیری

حرفه‌ی مهندسی فرآیند در بخش جانبی‌ها و آفاسایت یک پالایشگاه گاز و دیگر صنایع انرژی نیازمند در اختیار داشتن دانشی گسترده پیرامون پتانسیل‌های خوردگی مربوط به تجهیزاتی است که در تولید نقش دارند. بازگشت به مهندسی اصیل و بازتعریف شرح وظایف‌های سازمانی و نیز توجه به ساختارهای از پیش تعریف شده‌ی آن باید در اولویت هر کاری قرار گیرد. وجود انحراف‌های فرآیندی چه به خوردگی مرتبط باشند و چه نباشند باید به عنوان مهم‌ترین نقطه‌ی تلاقی "اهمیت در اختیار داشتن یک پیکره‌بندی آموزشی مناسب با ساختار سازمان" و "حرفه‌ی مهندسی فرآیند" قلمداد شود. برای اقدام به افزایش سطح مهارت و دانش مهندسان فرآیند نسبت به مسائل خوردگی دست یازیدن به آموزش‌های پراکنده، غیر مستمر و بدون همبستگی لازم با دیگر وظایف روتین حرفه‌ای باید از دستور کار خارج شده و جای خود را به انتخاب یک پیکره‌بندی درست و مناسب با شرایط سازمان بدهد. هنگامی که یک پیکره‌بندی آموزشی برای یک صنعت انتخاب شد، مقاومت‌های سازمانی مهم‌ترین مانع برای رسیدن به اهداف آن است. این مقاومت‌ها همگی باید با ملاحظه‌ی جزئیات مورد توجه قرار گرفته و به منظور متأثر نکردن میزان اثربخشی آموخته‌ها (پایین آوردن ضریب تأثیر) آثار آن‌ها را تا حد امکان کاهش داد.

دنیای خوردگی



واژه‌های خوردگی و حفاظت فلزات

معرفی کتاب

روی خط اینترنت

● واژه‌های خوردگی و حفاظت فلزات



واژه‌های مهندسی خوردگی که در این بخش آورده شده است، از سال ۱۳۸۹ تا سال ۱۳۹۵؛ توسط گروه واژه‌گزینی فرهنگستان زبان و ادب فارسی با همکاری انجمن خوردگی ایران، در کارگروه برو ن‌پذیر مهندسی خوردگی بررسی و در شورای واژه‌گزینی تصویب شده‌اند که به ترتیب حروف الفبا در مجله زنگ منتشر می‌گردد.

واژه‌های مصوب خوردگی که به صورت یک جلد کتاب نیز منتشر شده است، شامل ۶۷۸ واژه است که در هر شماره از مجله زنگ برخی از آن‌ها درج می‌شوند.

ب

بازدارندگی inhibition

کاهش سرعت یک واکنش کاتالیز شده (catalyzed reaction) با استفاده از ماده بازدارنده

بازدارندگی خوردگی میانا interface corrosion inhibition

فرایند تعویق خوردگی که در آن برهم‌کنش شدیدی بین زیرآیند (substrate) در حال خورده شدن و بازدارنده خوردگی رخ می‌دهد، در این فرایند بازدارنده خوردگی برحسب میزان پتانسیل زیرآیند (substrate) جذب سطح می‌شود و به عنوان یک الکتروکاتالیزور مثبت یا منفی بر روی واکنش خوردگی اثر می‌کند یا خود بازدارنده در فرایند اکسایش - کاهش الکتروشیمیایی مشارکت می‌کند

بازدارندگی خوردگی میان‌فازی interphase corrosion inhibition

فرایند تشکیل یک لایه سه‌بعدی بین زیرآیند (substrate) در حال خورده شدن و برق‌کاف که در آن لایه بازدارنده معمولاً از ترکیبات حل‌پذیر ضعیف مانند محصولات خوردگی اکسیدی یا واسطه‌ها یا بازدارنده‌ها به وجود می‌آید

بازدارنده inhibitor

ماده‌ای که یک واکنش شیمیایی را متوقف می‌کند یا به تأخیر می‌اندازد

بازدارنده آستانه‌ای threshold inhibitor

نوعی بازدارنده که اگر در مقدارهای کمتر از حد استوکیومتری (stoichiometric) هم به کار رود، همچنان به عنوان یک عامل تعلیقی در محیط آب عمل می‌کند

بازدارنده آندی anodic inhibitor

نوعی بازدارنده خوردگی که در آن ماده یا ترکیبی از مواد شیمیایی با سازوکارهای مختلف فیزیکی یا شیمیایی یا فیزیکی شیمیایی سبب جلوگیری یا کاهش آهنگ واکنش‌های آندی یا اکسایش می‌شود

بازدارنده اسیدی acid inhibitor

نوعی بازدارنده خوردگی غالباً از جنس مواد آلی حاوی نیتروژن و گوگرد و دارای بار قطبی که جذب سطح فلز می‌شود و از حمله اسید به سطح عریان فلز در هنگام پوسته‌زدایی محافظت می‌کند

بازدارنده اکسایش oxidation inhibitor

ماده‌ای که با افزوده شدن به ماده‌ای دیگر، مقاومت آن ماده را در برابر حملات زیان‌بار محیط‌های اکسندة افزایش می‌دهد

بازدارنده بر جذبی adsorption inhibitor

نوعی بازدارنده خوردگی اغلب از جنس ترکیبات آلی که برای متوقف کردن واکنش‌های انحلال و کاهش، جذب سطح فلز می‌شود

بازدارنده بر جذبی adsorption inhibitor

نوعی بازدارنده خوردگی اغلب از جنس ترکیبات آلی که برای متوقف کردن واکنش‌های انحلال و کاهش، جذب سطح فلز می‌شود
مت. بازدارنده جذب سطحی

بازدارنده پوششی شناور flotation-type coating, flotation coating inhibitor, flotation inhibitor

نوعی بازدارنده خوردگی برای محافظت سطح داخلی مخازن که لایه‌ای از آن را بر روی کف مخزن خالی قرار می‌دهند و زمانی که مخزن پر می‌شود، این لایه روغنی شناور می‌شود و با پایین و بالا رفتن سطح مایع، لایه‌ای از پوشش بر روی سطح مخزن به وجود می‌آید

عنوان کتاب:

کنترل خوردگی با استفاده از پوشش‌های آلی

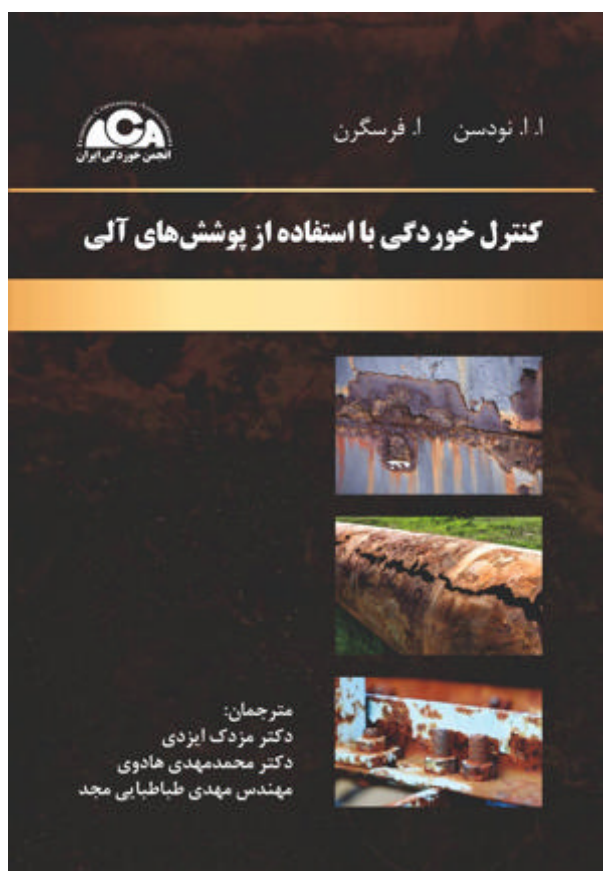
مترجمین:

دکتر مزدک ایزدی، دکتر محمد مهدی هادوی

و مهندس مهدی طباطبایی نجم

مؤلفان: ا.ا. نودسن و ا.ا. فرسگرن

انتشارات: انجمن خوردگی ایران



پوشش‌های آلی کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف داشته و جهت حفاظت از سازه‌های مختلف فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رفتار حفاظتی پوشش‌های آلی ناشی از اتصالات عرضی فشرده پس از پخت در ساختار آنها و عملکرد سدکنندگی آنها است. این پوشش‌ها در ضخامت مناسب می‌توانند به‌عنوان سدی در برابر نفوذ عوامل خوردنده عمل کرده و از رسیدن آنها به فصل مشترک فلز - پوشش و خوردگی متعاقب آن جلوگیری کرده یا نرخ خزش خوردگی در زیر پوشش را کاهش دهند.

به دلیل اینکه در پوشش‌های آلی محافظ صرفاً سازوکار سدکنندگی فعال است، در عدم وجود اجزای بازدارنده، تخریب سامانه در نتیجه نفوذ عوامل خوردنده در کسری از زمان به کاربری سازه فلزی اجتنابناپذیر خواهد بود.

تمامی پوشش‌های آلی به دلیل وجود حفرات ریز، مناطق دارای اتصالات عرضی ناکافی، عیوب حین اعمال، تنش‌های مکانیکی حین به کاربری، و آسیب‌های مکانیکی حین اجرا و پس از آن مستعد نفوذ عوامل خوردنده بوده و لازم است اقدامات حفاظتی در راستای تقویت آنها صورت گیرد. آسیب‌هایی نظیر تاول زدن، جدایش کاتدی، و خزش خوردگی زیر پوشش از جمله اصلی‌ترین آسیب‌های یک سازه محافظت شده با پوشش آلی هستند.

در راستای تقویت پوشش‌های آلی انواع مختلفی از رنگدانه‌های سدکننده، فعال، و فداشونده در قالب آستری یا لایه‌های مختلف به پوشش‌های آلی اضافه شده و جهت بهبود خواص حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

همچنین در پژوهش‌های جدیدتر شاهد استفاده از حامل‌ها و ساختارهای هوشمند جهت ارتقای هرچه بیشتر سامانه‌های حفاظتی بر پایه‌ی پوشش‌های آلی بوده‌ایم.

معرفی کتاب

عنوان کتاب:

بازدارنده‌های خوردگی

مؤلف: دکتر هادی عادل‌خانی

انتشارات: انجمن خوردگی ایران



بازدارنده‌ها در سامانه‌های مدار بسته مانند برج خنک‌کننده، بویلرها، چگالنده‌ها، خطوط انتقال مواد و هر کجا که خوردگی مورد انتظار است استفاده می‌شوند. اگرچه این مواد به مقدار بسیار کم مصرف می‌شوند اما قیمت گزافی دارند. همیشه ترکیب شیمیایی، دانش فنی تولید و عملکرد بازدارنده‌ها در سامانه‌های جلوگیری مواد همیشه محرمانه و به صورت رازی نهفته بوده است. به طوری که سازندگان و تولیدکنندگان این مواد فقط اطلاعات تجاری کلی بازدارنده‌ها را ارائه نموده و کمتر به سازوکار (مکانیسم)، ترکیب شیمیایی، اجزای سازنده و فرمول‌بندی آن‌ها می‌پردازند.

بر اساس مشاهدات میدانی و تجربیات اجرایی این‌جانب، بعد از انقلاب اسلامی به دلیل خروج نمایندگان شرکت‌های خارجی تولیدکننده بازدارنده از کشور تأمین بازدارنده‌ها به یک چالش مهم برای صنایع آب، نفت، گاز، استخراج فلزات و... تبدیل شد. تا این‌که به تدریج کارشناسان جوانان با تخصص‌های خوردگی، شیمی و الکتروشیمی تلاش خود را بر تولید این نوع مواد معطوف داشته و خوشبختانه پیشرفت‌های زیادی در این زمینه حاصل گردید. هرچند تا رسیدن به نقطه مطلوب راه زیادی در پیش است. یکی از ابزار مهم در رسیدن به خودکفایی کامل در زمینه تولید و به‌کارگیری بازدارنده‌های خوردگی اطلاع از ترکیب شیمیایی و سازوکار عملکرد بازدارنده‌ها است. خوشبختانه کتاب حاضر که حاصل مطالعات و تجربیات با ارزش آقای دکتر هادی عادل‌خانی دانشیار رشته شیمی و عضو محترم هیئت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای هست این ابزار را در زمینه بازدارنده‌های خوردگی فراهم نموده است.

عنوان کتاب:

مجموعه‌ی مهندسی شیمی - نگارش گزارش فنی

مترجم:

دکتر محمدرضا حامد غفاریان

مؤلف: فرداچ. رادرز

انتشارات: انجمن خوردهای ایران



هنر نوشتن یک گزارش خوب و تأثیرگذار چیزی است که کار یک مهندس را به اوج ارزش خود رسانده و همه‌ی درون‌مایه‌های آن را به خواننده می‌رساند. کتاب در دست نوشته‌ی یک دانشمند برجسته‌ی صنعتی در دانشگاه کرنل ایالات متحده‌ی آمریکا است که به دست انتشارات مک‌گراوهیل در لندن و نیویورک چهار بار به چاپ رسیده است. از پیش‌گفتار نویسنده این چنین بر می‌آید که این کتاب سال‌ها یک طرح درس تثبیت شده در این دانشگاه در دانشکده‌ی مهندسی شیمی بوده باشد. تا تاریخ نوشتن این یادداشت، ۸۰ سال از واپسین چاپ این کتاب می‌گذرد. اگر یک خواننده از من بپرسد چرا منابع تازه‌تر مورد توجه قرار نگرفته است؟ پاسخ من این خواهد بود که: بهتر است منابع تازه‌تر را بخواند و متوجه تفاوت‌ها بشود. آشنایی با رسالت و ریشه‌های کار مهندسی، سادگی و اصالت در گفتار نویسنده همه‌ی سه چیزی بوده‌اند که موجب انتخاب و معرفی این کتاب شدند. در فصل‌های آغازین این کتاب به اندازه‌ی کافی بر ضرورت نوشتار مهندسی، چرایی و کمینه الزامات آن پرداخته شده است.

در بخش‌های مختلف کتاب به مواردی برمی‌خوریم که با توجه به پیشرفت‌های نرم‌افزاری می‌توان آن‌ها را منسوخ دانست. در آغاز تصمیم گرفتم همه‌ی مواردی که با اتمسفر کار در سال ۲۰۲۳ همخوانی ندارند از بدنه‌ی اصلی نوشته حذف نمایم، اما ضمن اینکه با اخلاق ترجمه همخوانی نداشت، وجود آن‌ها گویای این نکته نیز بود که گزارش‌نویسی فنی تا چه اندازه مورد توجه مراکز مهم آموزشی در کشورهای صنعتی از دهه‌های گذشته بوده است و عملاً می‌توان یک استاد مهم به ضرورت ادامه‌ی این راه در دانشگاه و صنعت کشور با توجه به پیشرفت‌هایی داشت که امروز در تکنولوژی ارتباطات و نرم‌افزارها به دست آمده‌اند...

روی خط اینترنت

مجله زنگ جهت غنی کردن بار آموزشی و محتوایی بخش روی خط اینترنت آماده دارد. تمامی مطالب، اخبار، تحلیل‌ها و دیدگاه‌های کارشناسان، دست‌اندرکاران و علاقه‌مندان به علم و مهندسی خوردگی و مرتبط به آن را در تمامی حوزه‌ها منتشر نماید. لازم به ذکر است مطلب ارسالی با نام فرستنده درج خواهد شد ضمن اینکه درج منبع اصلی مطلب نیز الزامی می‌باشد.

میلی‌متری بوده و حتی به پیچیده‌ترین زوایا، شکاف‌ها و درزها نیز دسترسی پیدا می‌کنند. پس از جمع‌آوری، این داده‌ها می‌توانند به صورت یکپارچه به یک سرور مبتنی بر فضای ابری آپلود شوند تا در دفتر کار برای تحلیل، ارزیابی و تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرند. با استفاده از Cyclone ENTERPRISE، کاربران همیشه می‌توانند به داده‌های ابر نقطه‌ای خود به صورت به روز و به راحتی دسترسی داشته باشند و آن‌ها را به سرعت با تمامی ذی‌نفعان پروژه به اشتراک بگذارند. حتی اگر یک پل به ۵۰ سالگی نزدیک شود، نباید روش‌های مراقبت از آن در گذشته گیر کرده باشند.

منبع:

1 - https://iowadot.gov/bridge/3D/Presentations/3D%20Conference%20Presentation_Turkan_Laflamme.pdf

2-https://www.linkedin.com/redir/redirect?url=https%3A%2F%2Froctest%2Ecom%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F03%2F78%2Epdf&urlhash=FiYE&trk=article-ssr-frontend-pulse_little-text-block

خوردگی در هواپیماهای MD-۸۷ و BAe ۱۴۶ اطفای حریق ناشی از ناسازگاری مواد کندکننده تشخیص داده شد



بازرسان آمریکایی به این نتیجه رسیده‌اند که آزمایش ناکافی یک ماده کندکننده جدید باعث شده است به دلیل ناسازگاری شیمیایی

اسکن لیزری برای بازرسی پل‌ها



اکثر پل‌های مدرن با طول عمر ۵۰ تا ۷۰ سال طراحی می‌شوند. میانگین عمر پل‌ها در ایالات متحده ۴۷ سال است. اما پل‌ها، مانند انسان‌ها، می‌توانند با مراقبت و نگهداری مناسب به شکلی ایمن و بادوام عمر کنند. در مقاله‌ای که در سال ۲۰۰۲ در کنفرانس بین‌المللی نگهداری، ایمنی و مدیریت پل ارائه شد، برانکو گلیسیک، دانیل ایناودی و ساموئل ووریلو گفتند: "ایمن‌ترین و بادوام‌ترین سازه‌ها معمولاً آن‌هایی هستند که به خوبی مدیریت شده‌اند. اندازه‌گیری و نظارت نقشی اساسی در مدیریت سازه‌ها دارند"

روش‌های سنتی اندازه‌گیری و نظارت بر سازه‌ها به شدت به بازرسی بصری و اندازه‌گیری‌های دستی متکی هستند. اما به گفته یلدا تورکان، دکتر، و دیمون لافلام، دکتر و مهندس، این روش‌های فعلی خسته‌کننده، غیرقابل اعتماد و مستعد خطای انسانی هستند. بازرسی بصری قادر به ارائه اندازه‌گیری‌های قابل اعتماد، به‌ویژه برای هندسه‌های پیچیده نیست و هم در محل و هم در دفتر زمان‌بر است. نه تنها جمع‌آوری داده‌های مربوط به سلامت سازه در طول یک بازرسی بصری دشوار و طولانی است، بلکه داده‌های حاصل از این روش حجیم و کار با آن در دفتر پیچیده است. اما نیازی نیست این طور باشد. اسکن لیزری فرآیند بازرسی پل‌ها را متحول کرده است.

با استفاده از اسکنر لیزری مانند P۵۰ از لایکا ژئوسیستمز، یک تیم کوچک از بازرسان می‌توانند مجموعه کاملی از داده‌ها را در زمانی بسیار کمتر از روش‌های سنتی جمع‌آوری کنند. این داده‌ها با دقت

FR-200 و ماده کندکننده مبتنی بر فسفات MVP-Fx جابه‌جا می‌شدند.

هیئت ایمنی اعلام می‌کند که پس از پایان فصل، کارکنان تعمیر و نگهداری شواهد قابل‌توجهی از خوردگی را در سازه و اجزای داخلی مخزن هواپیما و همچنین سازه خارجی بدنه هواپیما مشاهده کردند.

این گزارش می‌افزاید که سازمان جنگل‌ها با نگرانی از این که احتمال بروز «اثرات خورنده جدی‌تر بر هواپیماهای تانکر هوایی وجود دارد که می‌تواند به وقوع یک حادثه منجر شود»، از هیئت ایمنی درخواست کرد تا هواپیماها را بررسی کرده و علت این مشکل را مورد تحقیق قرار دهد.

هواپیماهای BAe 146 از سال ۲۰۱۷ به‌عنوان هواپیمای تانکر هوایی فعالیت می‌کرد و بازرسی‌های انجام‌شده پیش از فصل ۲۰۲۳ هیچ‌گونه خوردگی‌ای را نشان ندادند. هواپیماهای MD-87 نیز پس از انجام تبدیل در اوایل سال ۲۰۲۳، اولین فصل پروازی خود را به‌عنوان تانکر هوایی سپری می‌کرد و مخزن ماده کندکننده آن کاملاً جدید بود.

هر یک از این هواپیماها تا اوت ۲۰۲۳ فقط ماده کندکننده FR-200 را رهاسازی می‌کردند و سپس به مدت سه ماه، تا اواسط نوامبر، به‌صورت متناوب بین FR-200 و MVP-Fx فعالیت داشتند.

هیئت ایمنی اعلام می‌کند که بررسی هواپیماهای BAe 146 «نشانه‌های قابل‌توجهی» از خوردگی در مخزن ماده کندکننده را نشان داد، به‌ویژه در مناطق مجاور پیچ‌ها یا اتصالات.

اما در هواپیماهای MD-87 تازه تبدیل‌شده، «شواهد بسیار بیشتری» از خوردگی مشاهده شد که محدود به مخزن نبود و چندین نقطه جداگانه در قسمت پایین بدنه هواپیما، عقب محل خروج مخزن، شناسایی شد.

هیئت ایمنی می‌گوید:

«مهم‌ترین قطعه سازه‌ای که دچار خوردگی شده بود، تقویت‌کننده کلاهک پایینی تیر جلو بال راست بود»، و تأکید می‌کند که سازنده هواپیما این قطعه را جزو سازه اصلی محسوب می‌کند.

شرکت Aero Air همچنین خوردگی در سه موتور Pratt & Whitney JT8D را کشف کرد، که همه آن‌ها در مقطعی از ارزیابی عملیاتی روی MD-87 نصب شده بودند. شدیدترین خوردگی در موتور سمت راست مشاهده شد، که در طول کل دوره ارزیابی در جای خود باقی مانده بود.

این تحقیق می‌گوید که خوردگی موتور سمت راست بر روی پوسته‌ها، فاصله‌دهنده‌ها، دیسک‌ها، پرده‌ها و شفت‌ها تأثیر گذاشته است، در حالی که مشکلات مشابهی در قطعات موتور سمت چپ نیز یافت شد.

با ماده کندکننده‌ای که از قبل در حال استفاده بوده، خسارت خوردگی قابل‌توجهی به دو فروند هواپیمای اطفای حریق هوایی وارد شود.

سازمان جنگل‌های ایالات متحده سال گذشته هیئت ملی ایمنی حمل‌ونقل را از کشف خوردگی در یک فروند هواپیمای BAe 146-200 متعلق به شرکت Neptune Aviation Services که با عنوان تانکر ۰۲ فعالیت می‌کرد، و همچنین یک فروند مک‌دانل داگلاس MD-87 که توسط شرکت Aero Air و با عنوان تانکر ۱۰۶ بهره‌برداری می‌شد، مطلع کرد.

مواد کندکننده مبتنی بر نمک‌های فسفاتی: از جمله مونوآمونیم فسفات، دی‌آمونیم فسفات یا آمونیم پلی‌فسفات سال‌های طولانی بدون بروز هیچ مشکلی مورد استفاده قرار گرفته بودند. اما سازمان جنگل‌های ایالات متحده در سال ۲۰۲۱ به دو ماده کندکننده جدید، مبتنی بر کلرید منیزیم و با نام‌های

FR-100 و FR-200 مجوز صلاحیت مشروط اعطا کرد.

به گفته هیئت ایمنی، این مواد کندکننده آزمایش‌های مشخص‌شده مربوط به خوردگی را «با موفقیت پشت سر گذاشته بودند»، اما تأکید می‌کند که این آزمایش‌ها «برای سال‌های طولانی بدون تغییر باقی مانده بودند» و تنها اثر یک ماده کندکننده بر آلیاژهای منفرد آلومینیوم، فولاد، برنج و منیزیم را بررسی می‌کردند.

از همان ژوئن ۲۰۲۱، در جریان آزمایش‌های عملیاتی شواهدی شروع به ظهور کرد که نشان می‌داد میان مواد کندکننده مبتنی بر کلرید منیزیم و مواد کندکننده مبتنی بر فسفات، زمانی که در حین خدمت با یکدیگر مخلوط می‌شدند، ناسازگاری شیمیایی وجود دارد.

هیئت ایمنی می‌گوید:

«اپراتورها اعلام کردند که اختلاط این دو ماده کندکننده منجر به تشکیل ماده‌ای غلیظ، منعقد و ژل‌مانند می‌شد که در حالت مرطوب به سازه مخزن می‌چسبید و در حالت خشک به ماده‌ای ضخیم و شبیه گل رس تبدیل می‌شد.»

«این ماده با عملکرد حسگرهای شناور، شیرها، دی‌سنگ‌ها و آب‌بندها تداخل ایجاد می‌کرد و برای حذف آن نیاز به روش‌های مکانیکی بود. همچنین خوردگی عملگرها و تخریب پوشش‌های سطحی نیز گزارش شده است.»

با وجود این شواهد، و بدون انجام آزمایش‌های خوردگی اضافی، سازمان جنگل‌ها در طول فصل آتش‌سوزی سال ۲۰۲۳ اجرای یک ارزیابی میدانی عملیاتی یکپارچه‌سازی را آغاز کرد.

در این ارزیابی از دو هواپیمای تانکر هوایی استفاده شد. هر دو هواپیما در ابتدا صرفاً ماده کندکننده جدید FR-200 را حمل می‌کردند، اما در بخش دوم فصل به‌صورت متناوب بین

کاهش فرسایش فولاد و اثر مشهود آن در کاهش گرمایش کره زمین



محیط های خورنده طول عمر کوتاهی خواهند داشت. ازین رو با تولید زود هنگام آن در صنایع فولادی، سبب افزایش انتشار کربن خواهد شد.

پژوهشگران با استفاده از داده های تاریخی شدت دی اکسید کربن برای تخمین سطح دی اکسید کربن از سال ۱۹۶۰، دریافتند که در سال ۲۰۲۱، تولید فولاد حدود ۲۷ درصد از انتشار کربن در بخش تولید جهانی و حدود ۱۰/۵ درصد از کل انتشار کربن جهانی را به خود اختصاص داده است. جایگزینی فولاد خورده شده حدود ۱/۶ تا ۳/۴ درصد از انتشار را به خود اختصاص داده است.

اما بر طبق این مطالعه، در اثر پیشرفت های فناوری در فرایند ساخت فولاد حدود ۶۱ درصد از مصرف انرژی در ۵۰ سال گذشته کاهش یافته است.

با وجود این پیشرفت، نتایج این مطالعه، از سیاست گذاران و مسئولان صنعتی درخواست می کند که سیاست های بین المللی در مورد تولید فولاد و مدیریت خوردگی را اصلاح و هماهنگ کنند.

فرانکل گفت: «راهبردهای هماهنگ بین المللی، و همچنین کاهش تقاضای جهانی فولاد با استفاده از بهترین روش ها برای کاهش خوردگی، می تواند بهبود راهبرد های جهانی مدیریت خوردگی را بهبود دهد و به طور قابل توجهی از افزایش انتشار گازهای گلخانه ای که به دلیل جایگزینی مکرر فولاد خورده شده رخ می دهد، جلوگیری کند.»

این مطالعه هشدار می دهد که اگر به زودی اقدامی برای بهبود اثر کربنی فولاد انجام نشود، انتشار گازهای گلخانه ای تولید شده توسط صنعت فولاد ممکن است تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۲۷/۵ درصد از کل انتشار کربن جهانی برسد، که فولاد خورده شده حدود ۴ تا ۹ درصد از این مقدار را به خود اختصاص می دهد.

چنین نتیجه ای اهداف تعیین شده در توافق پاریس برای محدود کردن گرمایش زمین به ۱/۵ درجه سانتی گراد و همچنین اهداف اقلیمی داخلی ایالات متحده را تقریباً غیرممکن خواهد کرد.

مطالعه نشان می دهد که راهبرد های مدیریتی مانند بهره گیری از فناوری های یادگیری ماشین می تواند یکی از بهترین راه ها برای کاهش سطح دی اکسید کربن زمین باشد. اگر انسان ها نتوانند این شرایط را برآورده کنند، پیامدهای آن برای اقلیم زمین وخیم خواهد بود. بنابراین، باید افراد بیشتری آگاه شوند که صنعت فولاد با کربن پایین، برای جلوگیری از چنین وضعیتی ضروری است.

آقای فرانکل اعتقاد دارد که «گرمایش جهانی یک چالش اجتماعی است که نیاز به هماهنگی رویکردهایی با تخصص های مختلف زیادی دارد. این فعالیت میتواند اهمیت موضوع را که همواره مورد غفلت قرار داشته و به آن بی توجهی شده است را، شفافیت بخشد.

منبع: <https://engineering.osu.edu/news>

خوردگی فلزات می تواند به زیرساخت های کلیدی و محیط اطراف آسیب بزند.

هر ساله ایالات متحده تقریباً یک تریلیون دلار برای مقابله با خوردگی فلزات، که یک واکنش الکتروشیمیایی است و هنگام اکسید شدن و زنگ زدن فلزات رخ می دهد، هزینه می کند.

پژوهشگران با بررسی این مسئله ی پنهان، اکنون تخمین زده اند که خوردگی چقدر بر تشدید تدریجی انتشار جهانی کربن تأثیر می گذارد. تولید جهانی فولاد در دهه های گذشته به طور پیوسته افزایش یافته است و از آنجا که فولاد مقاومت کمی در برابر خوردگی دارد، بخشی از این تقاضا برای جایگزینی فولاد در مصالح ساختمانی است که با گذشت زمان دچار خوردگی شده اند، از جمله در پل ها و خودروها. جرال فرانکل، یکی از نویسندگان این مطالعه و استاد مهندسی و علم مواد در دانشگاه ایالتی اوهایو، می گوید کاهش میزان فولادی که به دلیل خوردگی نیاز به تعویض دارد، می تواند تأثیر محسوسی بر میزان گازهای گلخانه ای تولید شده برای ساخت فولاد بگذارد.

جرال فرانکل: اگرچه مطالعات قبلی هزینه اقتصادی خوردگی را بین ۳ تا ۴ درصد تولید ناخالص داخلی یک کشور تخمین زده اند، این مطالعه جدید به سرپرستی ماریانو یانوزی، فارغ التحصیل دانشگاه ایالتی اوهایو، اولین مطالعه ای است که تأثیر زیست محیطی مرتبط با خوردگی فولاد را به صورت کمی بیان کرده است. این مطالعه اخیراً در مجله "npj Materials Degradation" منتشر شده است.

فرانکل می گوید: «با توجه به اتکای جامعه به سوخت های زغال سنگ، تولید آهن و فولاد یکی از بزرگترین منتشرکنندگان گازهای گلخانه ای در صنایع است.» او افزود: «اما بیشتر هزینه های مرتبط با این صنعت از انرژی ای ناشی می شود که صرف تولید فولاد می شود و این انرژی در نهایت هدر می رود چون فولاد به زنگ تبدیل شده و به حالت اولیه سنگ آهن برمی گردد.»

همان طور که میدانیم، طول عمر آلیاژها در محیط های مختلف متفاوت است. و هرچه محیط خورنده تر و عناصر آلیاژی در فولادها کمتر باشد، طول عمر آن کوتاه تر است. و لذا فولاد کربنی ساده، در

بیشتر بدانیم



● آزمون‌های غیرمخرب

روش‌های مدرن آزمون‌های غیرمخرب (NDT) ...

● پوشش‌های دما بالا

مروری بر انواع روش‌های حذف پوشش‌های دما بالا ...

آزمون‌های غیرمخرب

روش‌های مدرن
آزمون‌های غیرمخرب
(NDT) برای بازرسی
سازه‌های هوافضا



صنعت هوافضا به دلیل حساسیت بالای عملیات خود نیازمند بالاترین سطح ایمنی و قابلیت اطمینان است. اجزای هواپیما باید شرایط سختی مانند تغییرات شدید دمایی، ارتعاشات و نیروهای آیرودینامیکی را تحمل کنند. وجود هرگونه نقص یا خرابی در این اجزا می‌تواند پیامدهای فاجعه‌باری به همراه داشته باشد و همین امر، آزمون‌های غیرمخرب (NDT) را به یکی از فرآیندهای اساسی در این صنعت تبدیل

کرده است. آزمون‌های غیرمخرب (NDT) در صنعت هوافضا برای اطمینان از ایمنی، قابلیت اطمینان، و عملکرد قطعات هواپیما ضروری هستند. با استفاده از روش‌های مختلف NDT، متخصصان می‌توانند نقص‌ها را شناسایی کرده، مواد را ارزیابی نموده و یکپارچگی ساختاری اجزای حیاتی را تضمین کنند. این آزمون‌ها نقش مهمی در افزایش ایمنی، بهره‌وری و رعایت استانداردهای قانونی دارند. با پیشرفت فناوری، روش‌های NDT به تکامل خود ادامه داده و اثربخشی و قابلیت اطمینان این بازرسی‌ها در صنعت هوافضا را بیشتر بهبود می‌بخشند.

ترموگرافی دینامیک: تحریک با استفاده از نور، فراصوت، و جریان گردابی

ترموگرافی دینامیک یک روش قدرتمند آزمون غیرمخرب (NDT) است که شامل تحریک سطح یک ماده با استفاده از منابع مختلف انرژی مانند نور، فراصوت و جریان‌های گردابی می‌باشد. واکنش ماده به این تحریک مورد پایش و تحلیل قرار می‌گیرد تا نقص‌ها و ناهماهنگی‌های زیر سطح شناسایی شوند.

زمانی که این روش برای سازه‌های هوافضا اعمال می‌شود، ترموگرافی دینامیک می‌تواند به‌طور مؤثری نقص‌های زیر سطحی در اجزایی مانند بال‌های هواپیما، بدنه و قطعات حیاتی موتور را تشخیص دهد. این تکنیک به‌ویژه برای ارزیابی مواد کامپوزیتی که به‌طور گسترده در صنعت هوافضا به دلیل ویژگی‌های سبک‌وزنی و استحکام بالا استفاده می‌شوند، ارزشمند است.

تحولات جدید در اولتراسوند هوایی

اولتراسوند هوایی یک روش نوآورانه است که از آزمون غیرمخرب (NDT) برای بازرسی سازه‌های هوافضا از طریق هوا و بدون تماس مستقیم با ماده مورد بازرسی استفاده می‌کند. این روش مزایای قابل‌توجهی از جمله عدم تهاجم و زمان آماده‌سازی کم را ارائه می‌دهد. پیشرفت‌های اخیر در اولتراسوند هوایی حساسیت و دقت شناسایی نقص‌ها را بهبود بخشیده و آن را به ابزاری ارزشمند برای بازرسی‌های هوافضا تبدیل کرده است. در بخش هوافضا، اولتراسوند هوایی برای بازرسی سطوح حساس و هندسه‌های پیچیده به کار می‌رود و یکپارچگی قطعات حیاتی را تضمین می‌کند، در حالی که از هرگونه آسیب احتمالی که ممکن است روش‌های مبتنی بر تماس ایجاد کنند، جلوگیری می‌نماید.

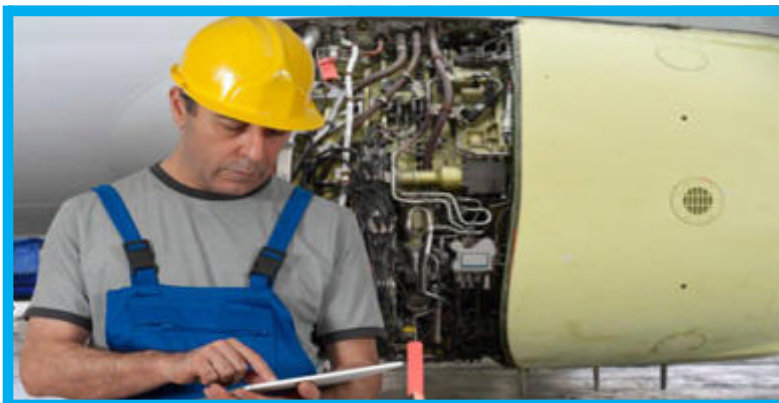
ویبرومتری غیرخطی

ویبرومتری غیرخطی یک روش پیشرفته آزمون غیرمخرب (NDT) است که به بررسی واکنش یک ماده به تنش‌های غیرخطی می‌پردازد. برخلاف تکنیک‌های سنتی خطی، این روش می‌تواند نقص‌های پنهان و نشانه‌های اولیه خستگی یا آسیب‌های ساختاری را حتی در غیاب ناهنجاری‌های قابل مشاهده سطحی آشکار کند.

در طول سال‌ها، آزمون‌های NDT در بازرسی‌های هوافضا به طور چشمگیری تکامل یافته و سفرهای هوایی را پایدارتر کرده است. پیشرفت‌های فناوری منجر به بازرسی دقیق‌تر و کارآمدتر روش‌های هوافضا شده است. تکنیک‌های سنتی مانند بازرسی چشمی با روش‌های پیشرفته‌ای مانند آزمون‌های فراصوتی، جریان گردابی، و ترموگرافی تکمیل شده‌اند. این تکنیک‌ها امکان شناسایی عیوب داخلی، خوردگی، و ناهنجاری‌های ساختاری را بدون آسیب رساندن به هواپیما فراهم می‌کنند. علاوه بر این، ادغام رباتیک و اتوماسیون، سرعت و دقت بازرسی‌ها را بهبود بخشیده است. با تحقیقات و توسعه مداوم، تکنیک‌های NDT در بازرسی‌های هوافضا همچنان تکامل می‌یابند و ایمنی و قابلیت اطمینان بیشتر هواپیماها را برای آینده تضمین می‌کنند.

روش‌های مدرن آزمون‌های غیرمخرب (NDT) برای بازرسی سازه‌های هوافضا

در صنعت همیشه در حال پیشرفت هوافضا، اطمینان از ایمنی و قابلیت اطمینان قطعات حیاتی از اهمیت بالایی برخوردار است. آزمون‌های غیرمخرب (NDT) نقش مهمی در بازرسی سازه‌های هوافضا ایفا می‌کنند، بدون اینکه آسیبی به آن‌ها وارد شود و امکان شناسایی زود هنگام نقص‌ها و ناهنجاری‌ها را فراهم می‌سازند. علاوه بر این، به مثال‌های خاصی از کاربرد این تکنیک‌ها در بازرسی قطعات هوافضا خواهیم پرداخت، از جمله شناسایی پرچ‌های شل، ارزیابی کیفیت اتصالات پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP)، بازرسی سازه‌های پلاستیک تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP)، و ادغام حسگرها در سازه‌های هوشمند.



یک موج مرجع پایدار با موجی که از سطح جسم مورد آزمایش بازتاب شده است، ترکیب می‌شود. الگوی تداخلی حاصل، اطلاعات ارزشمندی درباره ویژگی‌های سطح و نقص‌های احتمالی ارائه می‌دهد.

تداخل‌سنجی دینامیکی این اصل را یک گام فراتر می‌برد و با اعمال تحریک دینامیکی به ماده مورد آزمایش، اطلاعات بیشتری ارائه می‌دهد. این تحریک دینامیکی می‌تواند از طریق روش‌های مختلفی مانند ارتعاشات مکانیکی، امواج صوتی یا تحریک حرارتی اعمال شود. با تحریک دینامیکی ماده، اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی می‌توانند واکنش ماده به نیروهای خارجی را ثبت کرده و اطلاعاتی درباره ساختار داخلی و نقص‌های آن آشکار کنند. این یکی از روش‌های پیشرفته آزمایش غیرمخرب (NDT) برای بازرسی سازه‌های هوافضا است.

کاربردهای تداخل‌سنجی دینامیکی در صنعت هوافضا تداخل‌سنجی دینامیکی در صنعت هوافضا کاربردهای متعددی دارد، جایی که نیاز به روش‌های دقیق و قابل اعتماد آزمایش غیرمخرب (NDT) برای اطمینان از ایمنی و عملکرد اجزای حیاتی از اهمیت بالایی برخوردار است. برخی از کاربردهای کلیدی شامل موارد زیر است:

۱. بازرسی مواد کامپوزیتی

سازه‌های هوافضا به طور فزاینده‌ای از مواد کامپوزیتی مانند پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) و پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) استفاده می‌کنند، به دلیل نسبت استحکام به وزن بالای آن‌ها. با این حال، این مواد ممکن است به نقص‌هایی مانند لایه لایه شدن، حفره‌ها و جداشدگی‌ها حساس باشند که می‌تواند یکپارچگی ساختاری آن‌ها را به خطر بیندازد. تداخل‌سنجی دینامیکی بینش‌های ارزشمندی در مورد ساختار داخلی مواد کامپوزیتی ارائه می‌دهد و به مهندسان امکان می‌دهد نقص‌ها و ناهنجاری‌های پنهان را شناسایی کنند. با اعمال تحریک دینامیکی به قطعه کامپوزیتی و تحلیل الگوهای تداخلی حاصل، نقص‌ها و عیوب درون ماده با دقت بالا قابل شناسایی است.

۲. ارزیابی کیفیت اتصال‌دهی

در تولیدات هوافضا، اتصال‌دهی فرآیندی حیاتی برای پیوند دادن اجزای مختلف به یکدیگر است. کیفیت

در کاربردهای هوافضا، ویبرومتری غیرخطی به‌ویژه در پایش سلامت ساختاری قطعاتی که تحت تنش و ارتعاش مداوم قرار دارند، مانند چرخ‌های فرود هواپیما و تیغه‌های توربین، بسیار مفید است. شناسایی زود هنگام نقص‌ها می‌تواند از خرابی‌های فاجعه‌بار جلوگیری کرده و عمر مفید سازه‌های هوافضایی را افزایش دهد.



روش‌های تداخل‌سنجی دینامیک

تداخل‌سنجی دینامیکی اصول تداخل‌سنجی را با روش‌های تحریک دینامیکی ترکیب می‌کند تا تصویربرداری با وضوح بالا برای شناسایی نقص‌ها را امکان‌پذیر سازد. این تکنیک اندازه‌گیری‌های دقیق و نمایش عیوب سطحی و زیرسطحی را ممکن می‌سازد، که آن را برای بازرسی سازه‌های هوافضا بسیار ارزشمند می‌کند.

در صنعت هوافضا، تداخل‌سنجی دینامیکی برای کنترل کیفیت در حین تولید و ارزیابی قطعات جهت شناسایی علائم سایش، خستگی یا آسیب پس از استفاده طولانی‌مدت به کار می‌رود. تداخل‌سنجی دینامیکی یک روش قدرتمند و نوآورانه آزمایش غیرمخرب (NDT) است که اصول تداخل‌سنجی را با تکنیک‌های تحریک دینامیکی ترکیب می‌کند. این رویکرد پیشرفته امکان تصویربرداری با وضوح بالا و اندازه‌گیری‌های دقیق را فراهم کرده و به ابزاری ارزشمند برای بازرسی سازه‌های هوافضا تبدیل شده است.

اصول تداخل‌سنجی دینامیک

تداخل‌سنجی یک تکنیک است که الگوهای تداخلی حاصل از ترکیب دو یا چند موج هم فاز، مانند امواج نور یا صدا، را اندازه‌گیری می‌کند. در تداخل‌سنجی سنتی،

ساختاری با استفاده از آزمایش غیرمخرب (NDT) برای بازرسی سازه‌های هوافضا تبدیل می‌کند. در بازرسی‌های هوافضا، تصویربرداری انتخابی نقص‌ها می‌تواند برای شناسایی نقص‌ها در اجزایی مانند پره‌های توربین، پوسته‌های موتور و دیگر قطعات تحت فشار زیاد به کار رود، که امکان تعمیرات به‌موقع و کاهش زمان خرابی را فراهم می‌آورد.

نمونه‌هایی از بازرسی سازه‌های هوافضا

۱. شناسایی پرچ‌های شل

پرچ‌ها اتصالات ضروری هستند که در سازه‌های هوافضا برای پیوند اجزای مختلف به یکدیگر استفاده می‌شوند تا یکپارچگی ساختاری حفظ شود. با گذشت زمان، این پرچ‌ها ممکن است به دلیل عواملی مانند خستگی، ارتعاشات یا سایش شل شوند. شناسایی پرچ‌های شل برای جلوگیری از شکست‌های فاجعه‌آمیز و حوادث احتمالی بسیار مهم است. روش‌های آزمایش غیرمخرب (NDT) برای بازرسی سازه‌های هوافضا، مانند آزمایش جریان گردابی و ترموگرافی، معمولاً برای بازرسی اتصالات پرچ‌دار به کار می‌روند. آزمایش جریان گردابی در شناسایی تغییرات در هدایت الکتریکی ناشی از پرچ‌های شل یا گم‌شده مؤثر است.

از طرف دیگر، ترموگرافی می‌تواند ناهنجاری‌های دما را در اطراف پرچ‌های شل آشکار کند که ناشی از افزایش اصطکاک در حین بارگذاری است. این تکنیک‌ها ارزیابی سریع و قابل اعتمادی ارائه می‌دهند بدون اینکه نیازی به جداسازی قطعات باشد و باعث کاهش زمان خرابی و هزینه‌های نگهداری می‌شوند.

۲. کیفیت اتصال دهی GFRP

پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) به دلیل ویژگی‌های سبک و مقاومتی بالای خود در صنعت هوافضا به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. کیفیت اتصال بین لایه‌های GFRP برای اطمینان از یکپارچگی ساختاری و طول عمر اجزایی مانند پوشش‌های هواپیما و رادوم‌ها (وشش رادار) بسیار حیاتی است. آزمایش اولتراسونیک و ترموگرافی روش‌های پیشرفته آزمایش غیرمخرب (NDT) هستند که برای بازرسی اتصال‌دهی

اتصال‌دهی تأثیر مستقیمی بر عملکرد و قابلیت اطمینان هواپیما یا فضاپیما دارد. تداخل‌سنجی دینامیکی می‌تواند با تحلیل الگوهای تداخلی حاصل از تحریک دینامیکی، کیفیت اتصال‌دهی را ارزیابی کند. با بررسی سطح اتصال‌دهی، این روش قادر است اتصال‌های ضعیف یا ناقص، جداسازی یا نقص‌های موجود در اتصال‌دهی را شناسایی کرده و اطمینان حاصل کند که اجزا در شرایط دشوار عملیات هوافضا به طور ایمن به یکدیگر متصل باقی می‌مانند.

۳. پایش سلامت سازه (SHM)

تداخل‌سنجی دینامیکی برای پایش سلامت سازه (SHM) اجزای هوافضا نیز بسیار مفید است. SHM شامل نظارت مستمر بر یکپارچگی سازه در طول عمر عملیاتی یک هواپیما یا فضاپیما است که امکان تعمیرات به‌موقع و پیشگیری از خرابی‌های غیرمنتظره را فراهم می‌کند. با اعمال تحریک دینامیکی به طور منظم و اندازه‌گیری الگوهای تداخلی حاصل، هرگونه تغییر در خواص ماده یا وجود نقص‌های جدید می‌تواند به طور زود هنگام شناسایی شود. این امر انجام تعمیرات پیشگیرانه را آسان‌تر کرده و ایمنی و قابلیت اطمینان سازه‌های هوافضا را بهبود می‌بخشد.



تصویربرداری انتخابی نقص‌ها

تصویربرداری انتخابی نقص‌ها شامل الگوریتم‌های پردازش سیگنال پیشرفته‌ای است که نقص‌های خاص در مواد را جدا کرده و برجسته می‌کند. این تکنیک، شناسایی نقص‌های بحرانی در اجزای هوافضا را تقویت می‌کند و آن را به ابزاری ضروری برای اطمینان از یکپارچگی

توزیع شده، برای ارزیابی قابلیت اطمینان حسگرهای یکپارچه در سازه‌های هوشمند استفاده می‌شود. آزمایش امواج هدایت شده امواج اولتراسونیک با فرکانس پایین را برای نظارت بر نواحی وسیع منتشر می‌کند و نقص‌ها و عملکرد حسگرها را شناسایی می‌کند.

حسگری فیبر نوری توزیع شده از فیبرهای نوری برای اندازه‌گیری کشش، دما و پارامترهای دیگر استفاده می‌کند و اطلاعات دقیقی از سلامت ساختاری ارائه می‌دهد. این روش‌های آزمایش غیرمخرب (NDT) عملکرد و دقت حسگرهای یکپارچه در سازه‌های هوشمند هوافضا را تضمین می‌کنند.



سوالات متداول (FAQs)

۱. NDT چیست و چرا در صنعت هوافضا مهم است؟
آزمایش غیرمخرب (NDT) به مجموعه‌ای از تکنیک‌ها گفته می‌شود که برای ارزیابی یکپارچگی و کیفیت مواد و سازه‌ها بدون وارد کردن آسیب به آن‌ها استفاده می‌شود. این روش در صنعت هوافضا برای اطمینان از ایمنی، قابلیت اطمینان و عملکرد اجزای حیاتی ضروری است. NDT به شناسایی نقص‌هایی مانند ترک‌ها، خوردگی یا ناسازگاری‌های مواد که می‌توانند یکپارچگی ساختاری و عملکرد قطعات هوافضا را به خطر بیندازند، کمک می‌کند.

۲. NDT چگونه به یکپارچگی ساختاری اجزای هوافضا کمک می‌کند؟

بازرسی NDT نقش حیاتی در ارزیابی یکپارچگی ساختاری اجزای هوافضا ایفا می‌کند با شناسایی و شبیه‌سازی نقص‌ها. با شناسایی ایرادات یا ناهنجاری‌ها، NDT امکان بازرسی‌ها، نگهداری و تعمیرات به موقع را فراهم می‌آورد و اطمینان حاصل می‌کند که سازه‌های هوافضا استانداردهای ایمنی را رعایت کرده و در طول عمر عملیاتی خود به طور بهینه

GFRP استفاده می‌شوند. آزمایش اولتراسونیک زمان لازم برای عبور امواج اولتراسونیک از ماده را اندازه‌گیری کرده و نقص‌های اتصال‌دهی مانند لایه‌لایه شدن و حفره‌ها را شناسایی می‌کند.

از سوی دیگر، ترموگرافی ناهنجاری‌های دمایی را در حین تحریک شناسایی کرده و مشکلات اتصال‌دهی زیر سطح را نشان می‌دهد. این تکنیک‌های آزمایش غیرمخرب (NDT) امکان ارزیابی دقیق و کنترل کیفیت اتصال‌دهی GFRP را فراهم می‌کنند و از قابلیت اطمینان اجزای هوافضا اطمینان حاصل می‌نمایند.

۳. بازرسی سازه‌های CFRP

سازه‌های پلاستیک تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن خود به طور گسترده در صنعت هوافضا استفاده می‌شوند. با این حال، در طول فرایند ساخت یا عمر بهره‌برداری، نقص‌هایی مانند لایه‌لایه شدن، شکستن الیاف و حفره‌ها ممکن است به وجود آید که یکپارچگی ساختاری را به خطر می‌اندازد.

روش‌های بازرسی آزمایش غیرمخرب (NDT) مانند آزمایش اولتراسونیک، ترموگرافی و آزمایش انتشار صوتی نقش حیاتی در بازرسی سازه‌های CFRP دارند. آزمایش اولتراسونیک با اندازه‌گیری زمانی که امواج اولتراسونیک برای عبور از ماده لازم دارند، نقص‌های داخلی را شناسایی می‌کند. ترموگرافی تغییرات در واکنش حرارتی را شناسایی کرده و نقص‌های پنهان را نشان می‌دهد. آزمایش انتشار صوتی با نظارت بر امواج صوتی منتشر شده در حین تغییر شکل، آسیب‌های احتمالی را شناسایی می‌کند. این تکنیک‌های بازرسی آزمایش غیرمخرب (NDT) به حفظ سلامت ساختاری و ایمنی اجزای CFRP در کاربردهای هوافضا کمک می‌کنند.

۴. حسگرهای یکپارچه و سازه‌های هوشمند

ادغام حسگرها در سازه‌های هوافضا، سازه‌های هوشمندی ایجاد می‌کند که امکان نظارت لحظه‌ای بر اجزای حیاتی را فراهم می‌آورد. این نظارت مستمر به مهندسان این امکان را می‌دهد که سلامت و عملکرد سازه‌های هوافضا را ارزیابی کرده و داده‌های ارزشمندی برای تعمیرات پیش‌بینی شده فراهم کنند، که در نتیجه ایمنی را بهبود می‌بخشد.

آزمایش غیرمخرب (NDT) سازه‌های هوافضا، مانند آزمایش امواج هدایت شده و حسگری فیبر نوری

عمل می‌کنند.

۳. روش‌های سنتی NDT که در بازرسی‌های هوافضا استفاده می‌شوند کدامند؟

روش‌های سنتی بازرسی NDT که در بازرسی‌های هوافضا استفاده می‌شوند شامل بازرسی بصری، آزمون نفوذ رنگ، آزمون ذرات مغناطیسی، آزمون اولتراسونیک، آزمون رادیوگرافی و آزمون جریان گردابی هستند. این تکنیک‌ها امکان شناسایی و ارزیابی نقص‌ها را به طور قابل اعتماد فراهم می‌کنند، هرچند که حساسیت و قابلیت‌های آن‌ها متفاوت است.

۴. مزایای استفاده از تکنیک‌های پیشرفته NDT در بازرسی‌های هوافضا چیست؟

بازرسی‌های پیشرفته NDT مزایای زیادی برای بازرسی‌های هوافضا به همراه دارند، از جمله حساسیت بیشتر، دقت بهتر، زمان‌های بازرسی سریع‌تر، تصاویر و تجسم بهتر، قابلیت‌های تحلیل داده پیشرفته و توانایی بازرسی هندسه‌های پیچیده یا نواحی غیرقابل دسترسی. این پیشرفت‌ها منجر به بازرسی‌های جامع‌تر و کارآمدتر می‌شوند و یکپارچگی سازه‌های هوافضا را تضمین می‌کنند.

نتیجه‌گیری

آزمایش غیرمخرب (NDT) نقش حیاتی در تضمین ایمنی، قابلیت اطمینان و عملکرد اجزای هوافضا ایفا می‌کند. با شناسایی و ارزیابی نقص‌ها و ناهنجاری‌ها بدون وارد کردن آسیب، تکنیک‌های NDT امکان بازرسی‌های جامع و نگهداری پیشگیرانه را فراهم می‌آورند و به یکپارچگی کلی سازه‌های هوافضا کمک می‌کنند. در طول سال‌ها، پیشرفت‌های قابل توجهی در NDT برای بازرسی‌های هوافضا حاصل شده است که قابلیت‌ها و کارایی‌های بهبودیافته‌ای ارائه می‌دهند. این پیشرفت‌ها به افزایش اثرگذاری و دقت بازرسی‌ها کمک کرده و راه را برای توسعه‌های آینده در این حوزه هموار کرده‌اند.

به طور کلی، آزمایش غیرمخرب (NDT) ابزاری ضروری در صنعت هوافضا است که ایمنی و قابلیت اطمینان اجزای حیاتی را تضمین می‌کند. پیشرفت‌ها در بازرسی‌های NDT برای سازه‌های هوافضا به طور قابل توجهی توانایی‌های شناسایی و ارزیابی نقص‌ها را بهبود بخشیده است. همانطور که تکنولوژی به تکامل خود ادامه می‌دهد، حوزه NDT برای بازرسی‌های هوافضا شاهد پیشرفت‌های بیشتری خواهد بود که امکان انجام بازرسی‌های دقیق‌تر و کارآمدتر، راهبردهای نگهداری پیشگیرانه و استانداردهای ایمنی بهبود یافته را فراهم می‌آورد. آینده، وعده‌های بزرگی برای NDT دارد و اطمینان می‌دهد که سازه‌های هوافضا همچنان بالاترین استانداردهای ایمنی و قابلیت اطمینان را برآورده خواهند کرد.

منبع:

<https://www.onestopndt.com/ndt-articles/ndt-methods-for-aerospace-inspection#:~:text=Traditional%20techniques%20such%20as%20visual,causing%20damage%20to%20the%20aircraft>



پوشش‌های دما بالا

مروری بر انواع روش‌های حذف پوشش‌های دما بالا به منظور ترمیم اجزای آسیب دیده مورد استفاده در صنایع نفت و گاز

نغمه برزجان^{۱*}، امیر مهدی شبانی^۲، مجید محمدی^۳

^۱ شرکت ریخته گری دقیق پارس (کارشناسی ارشد مهندسی مواد)

^۲ دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود (دکتری مهندسی مواد)

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: N_barzjan@parscasting.com

چکیده:

مقاله حاضر به مطالعه، بررسی و دسته بندی انواع روش‌های حذف پوشش‌های دما بالا اعمال شده بر اجزای توربین‌های گازی می‌پردازد. اجزای مورد استفاده (پره‌ها، سپرهای حرارتی و ...) در توربین‌های گازی با اعمال پوشش‌های MCrAlY و پوشش‌های TBC در برابر خوردگی داغ و اکسیداسیون محافظت می‌شوند. این پوشش‌ها عمدتاً توسط روش‌های پاشش حرارتی روی اجزای دما بالا اعمال می‌شوند. در طول عملیات کارکرد توربین گازی، مکانیزم‌های تخریب مانند اکسیداسیون، خوردگی داغ، سایش ناشی از برخورد گازهای داغ و تنش‌های حرارتی - مکانیکی منجر به آسیب جدی در سیستم پوشش محافظ می‌شوند. با توجه به هزینه بالای تولید اجزای دما بالا معمولاً جایگزینی آن‌ها خیلی مورد قبول نمی‌باشد و معمولاً تمایل زیادی به بازسازی و اعمال پوشش جدید در این سیستم‌ها وجود دارد. به همین دلیل یکی از مراحل اصلی ترمیم و بازسازی قطعات فرآیند حذف پوشش، Stripping یا Decoating می‌باشد. در این مقاله انواع روش‌های حذف پوشش شامل روش‌های شیمیایی (Chemical Stripping)، روش‌های جت آب (Water jet Stripping)، و روش‌های غوطه وری در حمام نمک (Salt bath Stripping) مورد بررسی قرار گرفته و مزایا و معایب هر تکنیک مقایسه و ارزیابی می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که یک روش جهانی قابل اجرا برای همه سیستم‌های پوشش وجود ندارد. نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که روش‌های لایه برداری شیمیایی به شرط کنترل خوردگی موضعی در زیر لایه برای حذف پوشش‌های MCrAlY مناسب می‌باشد جداسازی توسط روش Water jet می‌تواند با موفقیت برای حذف سیستم MCrAlY/TBC مورد استفاده قرار گیرد اگرچه برای جلوگیری از آسیب پذیری زیرلایه نیاز به مراقبت است و روش حمام نمک برای حذف TBC نسبت به حذف MCrAlY موثرتر است.

کلمات کلیدی:

سوپر آلیاژ، خوردگی داغ، اکسیداسیون، پوشش MCrAlY، حذف شیمیایی پوشش، واتر جت، سند بلاست

۱- مقدمه

اجزای مورد استفاده در دمای بالا و به ویژه پره‌های توربین گازی باید تنش‌های حرارتی بالایی به همراه پدیده‌های خوردگی داغ و اکسیداسیون ناشی از محیط عملیاتی را تحمل کنند. شرایط کاری توربین‌های گازی در دمای بالا منجر به تخریب سریع اجزای ساخته شده از جنس سوپرآلیاژها می‌شود. اجزای سوپرآلیاژی مورد استفاده در ساخت توربین‌های گازی برای محافظت از فلزات پایه در برابر محیط‌های اکسیدی و خورنده، به سیستم‌های پوششی خاصی نیاز دارند. [۱]. به منظور کاهش این پدیده‌ها، سطوح مسیر گاز داغ به خصوص تیغه‌ها و پره‌ها باید با مواد مقاوم در برابر خوردگی و اکسیداسیون دمای بالا پوشش داده شوند. انواع پوشش‌های مقاوم در دمای بالا شامل پوشش‌های نفوذی (آلومینایدی و یا کرومایدی) و پوشش‌های روکشی (MCrAlY) می‌باشند که با توجه به دما و شدت محیط کاری توربین روی اجزای دما بالا اعمال می‌شوند. انواع پوشش‌های دما بالا می‌توانند ویژگی سطحی زیرلایه را با تشکیل ترکیبات اکسیدی چسبنده و پایدار در دمای بالا بهبود بخشند. دو نوع ماده مورد استفاده در اجزای اصلی توربین‌های گازی شامل MCrAlY (M به معنای Ni یا Co ترکیبی از هر دو، Cr عنصر کروم، Al عنصر آلومینیوم و Y عنصر ایتريوم) و مواد پوشش سد حرارتی (TBC)، مانند زیرکونیای نیمه پایدار شده با ایتريا (YSZ) می‌باشند، [۲].

پرمکاربردترین پوشش‌هایی که روی اجزا و پره‌های توربین گازی استفاده می‌شوند، پوشش‌هایی هستند که به دلیل ترکیب شیمیایی پایه‌شان به NiCoCrAlY معروف هستند که توسط روشهای پاشش حرارتی روی اجزا پوشش داده می‌شوند. آلومینیوم و کروم موجود در این پوشش‌ها در دمای بالا اکسید سطحی چسبنده‌ای موسوم به لایه اکسیدی توسعه یافته با حرارت (TGO^۱) ایجاد می‌کند که این لایه نقش مهمی در حفاظت و کاهش میزان اکسیداسیون و خوردگی داغ در این سیستم پوششی ایفا می‌کند. عمده تخریب اتفاق افتاده در این سیستم پوششی در اثر پدیده جدایش لایه اکسیدی (Spallation) محافظت تحت شرایط مخرب خوردگی داغ و تنش‌های حرارتی می‌باشد. پوشش مناسب MCrAlY باید توانایی ترمیم لایه جدا شده را توسط جایگزینی با لایه

اکسیدی جدید آلومینیوم و کروم داشته باشد. هرگاه در اثر تکرار پدیده جدا شدن لایه اکسیدی و ترمیم مجدد آن درصد عناصر اکسید ساز (آلومینیوم و کروم) در پوشش به زیر مقدار بحرانی برسد پوشش نقش حفاظتی خود را از دست داده و در آن نواحی سرعت اکسیداسیون و خوردگی داغ شدیداً افزایش می‌یابد. این پدیده‌ها نهایتاً ممکن است منجر به حذف پوشش شوند و بستر پره‌های توربین تحت تاثیر پدیده‌های تخریب قرار گیرد. در این شرایط برای جلوگیری از تخریب بستر اصلی پره نیاز است که پره از سرویس خارج و با پره جدید جایگزین شود و عملیات ترمیم سطحی پره قدیم توسط تکنیک‌های لایه برداری و پوشش‌دهی مجدد صورت گیرد، [۳].

در سیستم MCrAlY/YSZ، لایه MCrAlY تحت عنوان پوشش پیوندی و لایه سرامیکی آن تحت عنوان پوشش فوقانی و یا پوشش سد حرارتی (TBC) نامیده می‌شود، در این سیستم لایه MCrAlY به عنوان یک لایه پیوند بین پوشش سرامیکی YSZ و زیرلایه عمل می‌کند. پوشش‌های MCrAlY معمولاً با استفاده از فناوری‌های اسپری حرارتی مانند پاشش پلاسما تحت خلاء، پاشش پلاسما تحت هوا و سوخت اکسیژن با سرعت بالا (HVOF) بسته به تخریب و محتوای اکسید مشخص شده تولید می‌شوند. پوشش‌های YSZ تقریباً همواره توسط پاشش پلاسما در اتمسفر معمولی (APS) تولید می‌شوند. بیشتر پوشش‌های مورد اعمال بر اجزای مورد استفاده در مسیر گاز داغ، شامل یک پوشش سد حرارتی سرامیکی (TBC) در سطح بیرونی و یک پوشش پیوندی بین لایه TBC و فلز پایه می‌باشد، [۴]. پوشش‌های دما بالا هنگامی که در حین کار به صورت موضعی از بین می‌روند و قطعات نیاز به ترمیم دارند در برابر حذف نیز شدیداً مقاومت می‌کنند و فرایند حذف کامل پوشش از روی قطعات کارکرده یکی از چالش‌های اصلی در صنایع محسوب می‌شود. با توجه به ارزش بالای تیغه‌ها و پره‌های روتور به دلیل هزینه آلیاژهای مورد استفاده، ماشین‌کاری، فرآیندهای پوشش‌دهی، عملیات حرارتی و غیره، تعمیر پوشش تخریب شده با تکنیک‌های قابل اعتماد بسیار مهم است. طول عمر طراحی پره‌های توربین و مواد پایه پره‌ها بسیار بیشتر از عمر پوشش است. بنابراین، بازسازی آنها به جای جایگزینی

1-Thermally grown oxides (TGO)

اسید در شرایط مختلف دما و غلظت اسیدی مشخص انجام می‌شود.

۲- استریپینگ الکتروشیمیایی یا حمام نمک: شامل غوطه‌وری نمونه‌های پوشش‌دار در نمک‌های مذاب و در شرایط کنترل شده می‌باشد.

۳- استریپینگ واتر جت: استفاده از جریان پر انرژی آب و حذف پوشش در اثر برخورد با زاویه مناسب جت آب و پوشش.

۴- استریپینگ توسط لیزر: استفاده از اشعه پر انرژی لیزر به منظور لایه برداری و حذف قسمت آسیب خورده پوشش.

۵- استریپینگ به روش دمش با ذرات ساینده، [۶].

۲- مروری بر تحقیقات انجام شده استریپینگ شیمیایی:

یکی دیگر از روش‌های حذف پوشش، جداسازی شیمیایی قسمتی از توربین در حمام اسیدی مانند اسید نیتریک و فسفریک است. با این حال، کنترل دقیق حذف پوشش برای جلوگیری از تأثیرگذاری بر ضخامت دیواره مواد پایه تیغه دشوار است. این فرآیندهای اسید زدایی نسبت به فرآیندهای دیگر زمان بر هستند و معمولاً ۲ تا ۸ ساعت طول می‌کشند. برای برداشتن پوشش‌ها بدون کاهش ضخامت دیواره، به روشی سریع و مطمئن نیاز است، [۷].

حذف پوشش با استفاده از فرآیند اتوکلاو:

در فرآیند اتوکلاو، سطح سرامیکی و یا فلزی پوشش محافظ تحت تأثیر محیط شیمیایی مناسب در دما و فشار بالا برداشته می‌شود. یکی از معایب تکنیک‌های حذف پوشش با روش دمش ذرات ساینده این است که می‌تواند از بستر لایه برداری کند و دیواره قطعه را نازک کند، این موضوع به طور کلی در سطح قطعات بالک مشکلی ایجاد نمی‌کند ولی در مقاطع نازک اجزا می‌تواند منجر به لایه‌برداری از آن نواحی و تخریب کلی قطعه شود. روش اتوکلاو یا غوطه‌ور کردن اجزا در محلول شیمیایی خورنده می‌تواند با کنترل خوردگی در بستر زیر لایه با بکارگیری ممانعت‌کننده‌های خوردگی مناسب، میزان لایه برداری از مقاطع نازک را با دقت مناسبی کنترل نمود. شکل ۱ شماتیکی از فرآیند حذف پوشش سرامیکی توسط فرآیند اتوکلاو را نشان می‌دهد.

حذف پوشش توسط فرآیندهای آبی:

جداسازی آبی با روش آمونیوم هیدروژن فلوراید^۲ برای حذف

اجزای جدید، یک روش مقرون به صرفه است، [۲]. جداسازی لایه‌های سرامیکی و MCrAlY همچنان یک مشکل حساس در تولید صنعتی است که هنوز راه‌حل کاملی برای آن پیدا نشده است. تعمیرات اساسی این پوشش‌ها معمولاً به صورت دوره‌ای انجام می‌شود. در طول تعمیرات اساسی، اجزا و پره‌های توربین که مقدار خزش ایجاد شده در آن از حد مجاز تجاوز نکرده باشد و میزان سایش و فرسایش آنها جزئی باشد، برای استفاده مجدد بازسازی می‌شوند. پوشش‌هایی مانند پوشش‌های سد حرارتی و پوشش‌های پیوندی توسط روش‌های مختلف از اجزاء جدا شده و سطح بستر اجزا در صورت لزوم تعمیر و آماده‌سازی شده و سپس توسط فرایندهای معمول مجدداً پوشش‌دهی شده و به سرویس باز می‌گردند. بازسازی عمدتاً بر اساس لایه برداری و پوشش مجدد است. این فناوری‌ها که به آنها «De-coating» و «Stripping» نیز گفته می‌شود، برای بازیافت قطعات پوشش‌داده‌شده ناموفق، ناقص و اغلب برای بازسازی قطعات کارکرده پس از سرویس‌دهی عملکردی استفاده می‌شوند. هدف از این تحقیق مرور، دسته‌بندی و مقایسه انواع روش‌های صنعتی مورد استفاده برای حذف پوشش‌های دما بالا می‌باشد، [۵].

فرآیند استریپینگ:

استریپینگ برای حذف پوشش‌های دما بالای آسیب‌دیده در حین حال کار استفاده می‌شود، در این فرآیند پوششی که به صورت موضعی دچار جدایش و یا آسیب شده است ابتدا به صورت کامل تا رسیدن به بستر حذف و سپس، در صورت لزوم، بستر قطعه ابتدا تعمیر و سپس با پوشش‌های جدید دما بالا مجدداً پوشش داده می‌شود. ویژگی اصلی روش استریپینگ، حذف کامل پوشش بدون آسیب رساندن به زیرلایه است. لایه برداری نباید باعث خوردگی یا زبری سطح زیرلایه شود و باید حداقل تغییر ابعادی و ویژگی‌های هندسی آن را تضمین کند.

انواع روش‌های استریپینگ:

در این مرحله روش‌های حذف بر اساس فرآیند دو مرحله‌ای ابتدا معرفی و سپس مورد بررسی قرار می‌گیرند. روش‌های معمول برای حذف YSZ و MCrAlY به شرح زیر می‌باشد:

۱- استریپینگ شیمیایی: جداسازی لایه‌ها به صورت شیمیایی و با غوطه‌وری در اسیدهایی مانند هیدروکلریک و سولفوریک

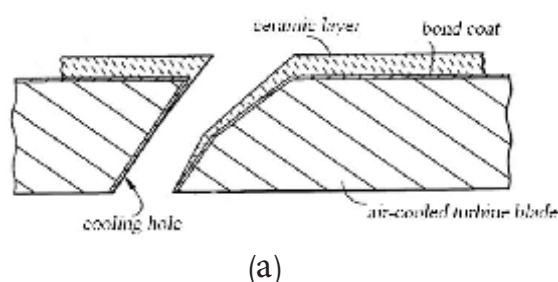
روش الکتروشیمیایی، پره توربین به عنوان آند در محلول الکترولیت غوطه ور شده و با اعمال ولتاژ و جریان مناسب بین تیغه توربین و کاتد (گرافیت یا فولاد زنگ‌نزن) لایه برداری از سطح پره انجام می‌شود. در این فرایند می‌توان با کنترل و اندازه‌گیری پتانسیل سل معیاری برای اتمام لایه برداری پوشش مشخص نمود به گونه‌ای که فلز بستر دچار خوردگی و لایه‌برداری نشود.

HCl ممکن است به عنوان محلول الکترولیت استفاده شود. غلظت HCl به عنوان یک پارامتر در لایه‌برداری می‌تواند بین ۶ تا ۲۰ درصد وزنی انتخاب شود. معمولاً در غلظت‌های بالاتر فرایند با سرعت بیشتری انجام می‌شود ولی کنترل فرایند جهت عدم لایه‌برداری از مجاری خنک‌کننده و مقاطع نازک دشوار می‌شود، به همین دلیل تمایل به کار در الکترولیت‌هایی با درصد کمتری از HCl بیشتر است. مرحله جداسازی اصلی و مرحله جداسازی ثانویه ممکن است با دمای محلول الکترولیت در محدوده ۱۵-۲۵ درجه سانتیگراد، به ویژه در محدوده ۱۸-۲۲ درجه سانتیگراد انجام شود. در این روش، نظارت بر غلظت یون فلز حل شده در محلول الکترولیت، به منظور جایگزینی محلول الکترولیت و جبران کاهش غلظت یون‌های H^+ ، امکان‌پذیر است. یکی از مزیت‌های روش الکتروشیمیایی این است که بخش‌هایی از پوشش فلزی را می‌توان به سرعت و بدون آسیب رساندن به تیغه توربین جدا کرد. مدت زمان مرحله استریپینگ الکتروشیمیایی وابسته به پارامترهایی چون، دانسیته جریان، اختلاف پتانسیل، غلظت محلول، دمای سل و ترکیب شیمیایی پوشش و ضخامت پوشش است ولی برای پوشش‌های معمول MCrAlY این زمان ممکن است حداکثر ۶۰ دقیقه باشد. مرحله استریپینگ الکتروشیمیایی ثانویه به منظور اطمینان از حذف کامل پوشش ممکن است حداکثر برای مدت زمان ۳۰ دقیقه در

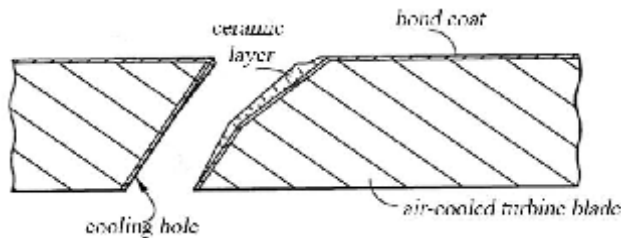
لایه سرامیکی، مانند زیرکونیای پایدار شده با یتریا (YSZ) بدون آسیب رساندن به پوشش پیوندی استفاده می‌شود. دمای کار حدود ۷۵-۶۰ درجه سانتیگراد و زمان جداسازی حدود ۵-۴ ساعت می‌باشد. برای بهبود بازدهی و افزایش سرعت لایه‌برداری، این فرایند می‌تواند با روش اولتراسونیک ترکیب شود. اولتراسونیک را می‌توان تا زمانی ادامه داد که TBC به طور کامل حذف شود یا حداقل به اندازه کافی شل شود به طوری که بتوان آن را با برس یا شستشو با اسپری فشار بالا حذف کرد. استفاده از امواج پر انرژی اولتراسونیک می‌تواند زمان فرایند را به ۲ الی ۴ ساعت کاهش دهد. استریپینگ شیمیایی نسبت به تکنیک‌های دمش با ذرات ساینده سازگاری کمتری با محیط زیست دارد. به منظور افزایش سرعت لایه‌برداری و بازدهی فرایند، جداسازی شیمیایی اغلب باید با یک روش دستی برس کاری سطح و یا روش‌های پاشش ذرات ساینده به سطح نمونه استریپ شده همراه باشد. لایه برداری شیمیایی اجازه هیچ گونه کنترلی بر روی مشخصات زبری سطح نهایی نمی‌دهد. به طور کلی، استفاده از محیط‌های ساینده برای تمیز کردن سطوح به مراتب کمتر از روش‌های تمیز کردن شیمیایی خطر سلامتی دارد، [۲].

روش الکتروشیمیایی:

قطعه در محلول الکترولیت خورنده غوطه‌ور می‌شود و جریانی از قطعه و الکتروود ثانویه (کاتد) که با الکترولیت در تماس است عبور می‌کند. برای اینکه بتوان یک پره توربین مربوطه را در محدوده بازسازی مجدداً پوشش داد، لایه سد حرارتی سرامیکی بالایی ابتدا در مرحله اول به صورت مکانیکی برداشته می‌شود، به عنوان مثال با کمک سنبلاست. در مرحله بعدی، لایه چسبنده فلزی از سطح قطعه جدا شود. برای حذف پوشش پیوندی MCrAlY در



(a)



(b)

شکل ۱: شماتیک حذف لایه سرامیکی با استفاده از فرآیند اتوکلاو با قرار دادن پوشش‌ها در معرض محلول سوزاننده در دما و فشار بالا. (a) قبل از فرآیند، (b) پس از فرآیند، [۶].

روش سند بلاست:

دمش با مواد ساینده

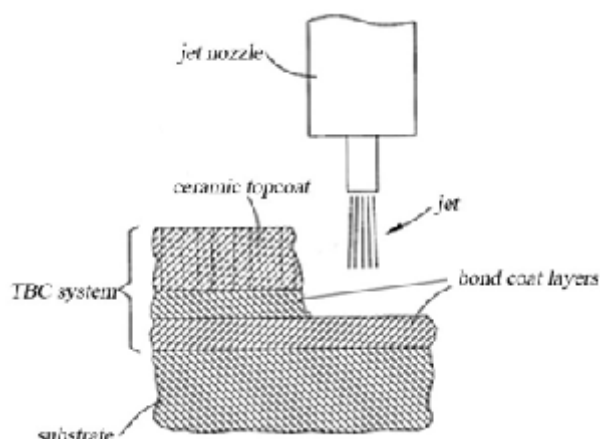
دمش با ذرات ساینده یک روش مکانیکی است که در آن جریانی از مواد ساینده، مانند اکسید آلومینیوم، کاربید سیلیسیوم یا ماسه، به سمت سطحی، تحت فشار هوای بالا هدایت می شوند تا آلاینده های سطح و پوشش سرامیکی YSZ و پوشش لایه ای $MCrAlY$ را حذف کنند. در حین دمش ذرات ساینده، ذرات فرورفته تأثیر زیادی بر ریزساختارهای زیرسطحی، هم ماتریس و هم رسوبات دارند. در عمل، باید احتیاط شود تا آسیب به پوشش باند و آلیاژ زیرلایه در هنگام انفجار شدن به حداقل برسد. روکش باند و آلیاژ زیرلایه هر دو به رنگ خاکستری - فلزی هستند که تشخیص روکش باند از زیرلایه را دشوار می کند. در نتیجه، بلستینگ ممکن است منجر به حذف ناهموار مواد و نازک شدن پوشش باند و آلیاژ بستر شود. علاوه بر این، نتایج حاصل از بلستینگ می تواند منجر به حذف ناهموار و اعوجاج هندسه پوشش و همچنین آلودگی سطحی با اکسید آلومینیوم شود، [۱۱].

دمش با ذرات CO_2 جامد

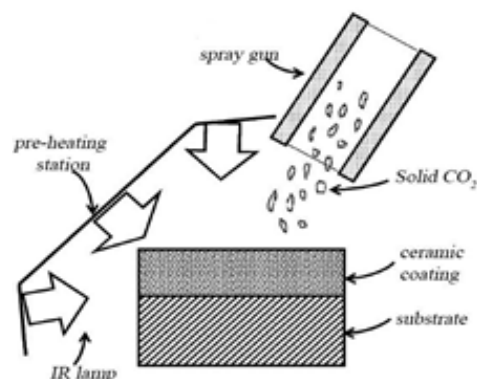
در این روش، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، از دی اکسید کربن جامد (CO_2) خارج شده از یک تفنگ پاششی برای سنگ زنی و لایه برداری پوشش سرامیکی YSZ استفاده می شود. در طول فرآیند، CO_2 جامد پس از برخورد به سطح پوشش به صورت گاز تصعید می شود و در اثر این فرایند حجم گاز به شدت افزایش می یابد. این افزایش حجم گازی می تواند امواج ضربه ای قوی ایجاد کند و منجر به جدا شدن پوشش سرامیکی شود، [۶]. انرژی جنبشی توسط تفنگ پاششی و به علت افزایش سرعت ذرات CO_2 جامد تامین می شود و انرژی حرارتی نیز ناشی از فرآیند گرمایش و تابش اشعه با انرژی بالا می باشد. موج ضربه ایجاد شده در سطح پوشش، ترک های موجود و ذراتی را که منفجر شده اند یا چسبندگی ضعیفی به پوشش دارند، جدا نموده و نهایتاً منجر به حذف کامل پوشش می شود، [۱۲]. در این فرایند می توان انرژی ناشی از موج ضربه ای با افزایش درجه تصعید ذرات جامد CO_2 افزایش داد. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، می توان پوشش را با یک لامپ IR از قبل گرم کرد تا اثر تصعید افزایش یابد.

پتانسیل های کمتر، روی قطعات انجام شود. محلول اسیدی مورد استفاده در این فرایند می تواند نیتریک اسید، هیدروکلریک اسید، سولفوریک اسید، فسفریک اسید و یا ترکیبی از اسیدهایی باشد که برای جدا کردن یک پوشش خاص از یک فلز پایه خاص طراحی شده اند. نمک هایی مانند NaCl و KCl را نیز می توان برای غلبه بر مقاومت الکتریکی سل و بهبود هدایت الکتریکی سل اضافه نمود. جریان برای مدت زمان از پیش تعیین شده به تیغه اعمال می شود تا تمام پوشش از ناحیه موضعی حذف شود، [۹].

به منظور بررسی اثرات حمله اسیدی بر سطح بستر قطعات توربین در حین لایه برداری، آزمونی با غوطه ور کردن زیرلایه های مختلف در محلول اسیدی HCl انجام گردیده است. دو سوپر آلیاژ مبتنی بر نیکل برای آزمایش انتخاب شده اند: MAR M247 به شکل معمولی ریخته گری و MK4 به صورت تک کریستال. لایه برداری در محلول مبتنی بر HCl در حضور یک بازدارنده خوردگی انجام شد. استریپینگ شامل غوطه ور شدن متناوب در محلول اسید و سپس جریانی از انفجار شدن پر انرژی روی سطح سوپر آلیاژها بود، عملیات مذکور در ۷ سیکل به منظور فعال سازی مجدد سطح نمونه و تسریع فرایند لایه برداری انجام شد. برای هر چرخه زمان غوطه وری یک ساعت بود. نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ نوری و بررسی مورفولوژی سطح با تعیین پارامترهای زبری سه بعدی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بررسی نشان داد که می توان سرعت جداسازی را با فعال کردن مجدد سطح، توسط سند بلاست افزایش داد. تجزیه و تحلیل آنالیز سطحی XPS بر روی لایه تیره به منظور بررسی ترکیب شیمیایی نشان داد که این لایه ناشی از تجمع ترکیبات بازدارنده خوردگی آلی است که با حضور مقادیر زیادی کربن آلی مشهود است. مشاهده گردید که حتی با استفاده از این روش فعال سازی مجدد، سرعت حذف پوشش با برداشتن تدریجی از حدود ۱۵۰ میکرومتر در ساعت به حدود ۱۰۰ میکرومتر در ساعت برای دوره هایی تا ۵ ساعت کاهش می یابد. این می تواند به دلیل تغییر غلظت اسید باشد زیرا اسید مورد استفاده در طول فرآیند جایگزین نگردید، [۱۰].



شکل ۳: شماییک فرآیند جت آب [۶].



شکل ۲: شماییک حذف پوشش با استفاده از روش دمش با ذرات CO₂ جامد.

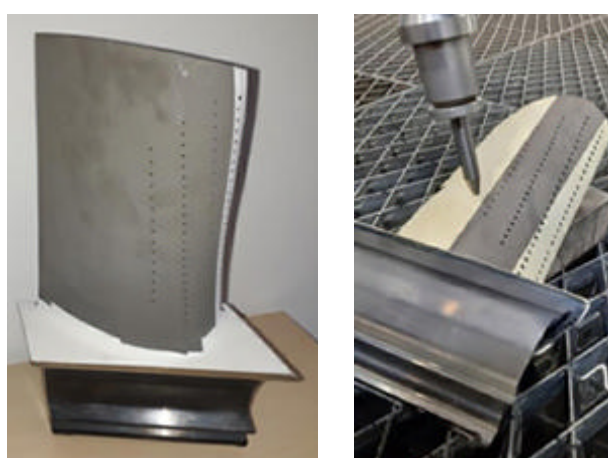
واتر جت:

واتر جت غیر ساینده

روش واتر جت یک روش غیر ساینده است که از آب با فشار بالا برای حذف لایه سرامیکی از هر دو سطح داخلی و خارجی اجزای توربین استفاده می شود. واتر جت نسبت به سطح لایه TBC و سطح زیرلایه در زاویه کم قرار می گیرد، بنابراین جت این روش می تواند لایه پوشش سرامیکی را بدون تخریب قسمت زیرین بستر اصلی حذف کند. از مزایای استفاده از جت فشار بالای آب این است که انرژی برخورد زیاد این روش می تواند روی زبری سطح تأثیر گذار باشد به نحوی که زبری سطح افزایش یابد. این موضوع می تواند چسبندگی لایه های پوشش سرامیکی جدید را تقویت کند.

فرآیند واتر جت ساینده دقیق

فرآیند واتر جت ساینده دقیق (PAWJ) به کمک ذرات ساینده با همراه کنترل های دقیق کامپیوتری منجر به ایجاد یک فرآیند سازگار با محیط زیست می شود که بدون آسیب رساندن به بستر اصلی اجزای توربین، پوشش ها را حذف می کند. این روش بازدهی بالایی دارد و می تواند هزینه های فرایند لایه برداری پوشش های TBC را تا حد زیادی کاهش دهد. در این فرآیند، یک کامپیوتر پنج محوره با کنترل عددی (CNC) AWJ پوشش را در مراحل تکراری با دقت بالایی حذف می کند (شکل ۴). فرآیند CNC مزایای خاصی را ارائه می دهد. این روش یک فرآیند حذف مکانیکی کنترل شده است. ضخامت پوشش آسیب دیده قبل و بعد از AWJ اندازه گیری می شود تا از حذف کامل پوشش باند و لایه انتشار و همچنین هرگونه آلودگی یا خوردگی در زیر پوشش سرامیکی اطمینان حاصل شود.



شکل ۴: حذف پوشش TBC توسط فرآیند واتر جت روی پره توربین [۱۳].

۳- نتایج و بحث

خصوصیات روش های لایه برداری:

۱ - جداسازی شیمیایی در محلول آبی قادر به حذف لایه MCrAlY می باشد اما تاثیری روی لایه سرامیکی YSZ ندارد. همچنین این روش ها با انتخاب مناسب ترکیب شیمیایی حمام می توانند به صورت خود محدودکننده عمل کنند، یعنی در حضور بازدارنده های مناسب، می توانند تنها به لایه MCrAlY حمله کنند، و تاثیری روی بستر سوپر آلیاژ ایجاد نکنند. این مهمترین مزیت این روش به خصوص برای اجزای با ضخامت کم و اجزای دارای مجاری خنک کاری می باشد.

مزایا

۱ - در این فرآیند، حذف پوشش سرامیکی و پیوندی به صورت کنترل شده بدون آسیب زدن به مجاری خنک کننده و مقاطع نازک در اجزا صورت می گیرد.

۲ - این فرآیند نسبت به زمانی که از واتر جت برای برداشتن

لایه سرامیکی از بستر استفاده شود، هزینه و زمان کمتری دارد.

معایب

۱ - نیاز به استفاده از اتوکلاو است که در دما و فشار بالا کار می کند.

۲ - تجهیزات این فرایند نسبتاً گران قیمت است، [۱۴].

۲ - با استفاده از روش لایه برداری الکتروشیمیایی در الکترولیت های اسیدی و بکارگیری ممانعت کننده مناسب، می توان پوشش MCrAlY را در پره های توربین با کیفیت مناسبی حذف نمود بدون اینکه تاثیری در زیر لایه و مجاری خنک کننده ایجاد شود. در مقایسه با فرایند پوشش دهی که با یک مایع فعال شیمیایی کار می کند (مانند اسید یا قلیا، که می تواند به دلیل خواص شیمیایی بدون اعمال ولتاژ الکتریکی بیشتر به پوشش حمله کند)، فرایند الکتروشیمیایی این مزیت را دارد که معمولاً تهاجم کمتری دارد و بنابراین، از یک سو، کمتر به زیر لایه حمله می کند و از سوی دیگر، خطرات کمتری را برای افرادی که روی دستگاه مربوطه کار می کنند، به همراه دارد.

مزایا

۱ - سازگار با محیط زیست است.

۲ - پوشش ها را بدون آسیب رساندن به اجزا از بین می برد.

۳ - سطح تولید شده عاری از آلودگی باشد.

معایب

۱ - به دلیل تجهیزات خاص و تعمیر و نگهداری تجهیزات هزینه فرایند کمی بالا است، [۹].

۳ - روش های مکانیکی (سند بلاست و واتر جت) قادر به حذف هر دو نوع پوشش پیوندی و سرامیکی می باشند. با این حال، بدیهی است که این روش ها امکان کنترل فرایند به صورت خود محدود کننده وجود ندارد و در حین فرایند احتمال لایه برداری از سطح بستر سوپر آلیاژ نیز وجود دارد. این موضوع می تواند در لایه برداری مقاطع نازک مشکلات ابعادی ایجاد کند.

نتیجه گیری

نتایج نشان می دهد که لایه برداری شیمیایی قادر به حذف پوشش MCrAlY بدون تأثیر بر مواد زیر لایه است. اما این روش قادر به حذف پوشش زیر کونینایی نیست و به همین دلیل باید در ترکیب با روش های دیگر استفاده شود. همچنین روش واتر جت تنها روشی است که می تواند برای حذف کامل سیستم MCrAlY/TBC با بازدهی مناسب استفاده شود. با این حال، ممکن است باعث

قابل ذکر است که هر کدام از روش های جداسازی شیمیایی در محلول آبی و در حمام نمک به تنهایی برای حذف پوشش کامل تیغه ها مناسب نمی باشد و روش های مکانیکی هم با توجه به عدم کنترل ضخامت قسمت لایه برداری شده و افزایش زمان لایه برداری پوشش به تنهایی رضایت بخش نمی باشند. در روش های مکانیکی استفاده از روش سند بلاست برای حذف پوشش خیلی قابل کنترل نمی باشد و فرایند نسبتاً زمان بر است در حالی که در فرایندهای بر پایه واتر جت، لایه برداری نسبتاً سریع است ولی کنترل حذف پوشش به گونه ای که به بستر سوپر آلیاژ آسیب نرسد، نسبتاً دشوار می باشد. با توجه به مطالب مطرح شده در مورد مزیت و محدودیت روش های ذکر شده همواره سعی می شود ترکیبی از دور روش شیمیایی/مکانیکی مورد استفاده قرار گیرد. در فرایندهای شیمیایی می توان با ایجاد خوردگی در سطح پوشش چسبندگی لایه های سطحی روی یکدیگر را کاهش داد و سپس توسط عملیات مکانیکی و با کنترل انرژی ذرات برخورد کننده لایه اکسید شده سطحی را حذف نمود. تکرار این فرایند در چند مرحله می تواند حذف پوشش را بدون آسیب زدن به زیر لایه تا حد زیادی تضمین کند. علاوه بر این پیشنهاد می شود یک عملیات سند بلاست قبل از استریپینگ روی سطح پوشش انجام شود تا سطح از آلودگی های احتمالی (گريس، روغن و غیره)، که می تواند منجر به کاهش حمله شیمیایی سطح شود، آماده سازد.

مزایا

۱ - روش لایه برداری نسبتاً راحت نسبتاً اقتصادی است.

۲ - به مواد شیمیایی مضر نیاز نیست.

۳ - سطحی تمیز با زبری مناسب جهت اعمال مجدد پوشش می کند.

معایب

۱ - می تواند منجر به سطوح ناهموار ناشی از حذف مواد ناهموار شود.

۲ - معمولاً یک فرایند کنترل نشده است که به نتایج متفاوتی منجر می شود.

۳ - به طور بالقوه می تواند هندسه قطعه را تحریف کند، [۶].

آسیب قابل توجهی به بستر شود. روش‌های نمک مذاب نیز برای حذف پوشش سرامیکی YSZ مناسب هستند و تاثیر چندانی بر روی پوشش‌های پیوندی MCrAlY ندارد. روش مناسب جهت حذف کامل و همزمان هر دو نوع پوشش پیشنهاد نشده است، اما ترکیبی از سند بلاست (یا واتر جت) و لایه‌برداری شیمیایی در حال حاضر می‌تواند موثر باشد.

تشکر و قدردانی

با تشکر و سپاس بیکران از مدیر عامل محترم مجموعه شرکت ریخته‌گری دقیق پارس، جناب آقای مهندس علی مخدومی که با راهنمایی‌های ارزنده خود در تمامی مراحل تهیه و تدوین این مقاله، ما را یاری نمودند. همچنین از مدیر محترم واحد کنترل کیفیت سرکار خانم مهندس مژده نیکجو که در این مسیر گروه را همراهی نمودند، قدردانی به عمل می‌آید.

مراجع:

- [1] T. Bergs, J.P. Borrmann, Pure waterjet controlled depth machining for stripping ceramic thermal barrier coatings on turbine blades, 2nd CIRP Conference on Composite Material Parts Manufacturing (CIRP-CCMPM 2019), CIRP 85 (2019) 261–265
- [2] A. Scrivani, U. Bardi, G. Ballerini, Removal of thermal barrier coatings from turbine blades: a comparison of mechanical and chemical methods, Proceedings of the International Thermal Spray Conference, 207-210.
- [3] S. Corcorano, U. Guerreschi, Coating stripping method for refurbishing of gas turbine blade and vanes, The American society of mechanical engineers three park avenue, New York, N.Y. 10016-5990.
- [4] A. Scrivani, G. Rizzi, On the Stripping of Turbine Blades and Vanes: Mechanisms and Performances of Chemical Stripping for the Removal of NiCrAlY Thermal Spray Coatings, Proceedings from the International Thermal Spray Conference 05 May 2003–08 May 2003, ITSC 2003, Orlando, Florida, USA.
- [5] A. Scrivani, G. Rizzi, U. Bardi, Chemical stripping methods for the removal of NiCrAlY thermal spray coatings, Kovove Mater. 43 2005 382–387.
- [6] X. Yang, J. Zhang, H. Park, R. Sinatra, A Review of Removal and Repair Techniques for Thermal Barrier Coatings, The International Journal of Surface Engineering and Coatings, May 2020.
- [7] U. Kruger, R. Reiche, Method for removing a coating from a component, United States Patent Application Publication, US 2008/0277288 A1, Nov. 13, 2008.
- [8] W. C. Brooks, "Method of selectively stripping an engine-run ceramic coating," US Patent US20080121623A1.
- [9] J. D. Jensen, U. Kruger, D. Kortvelyessy, Method for Electrochemical removal of metal coating from a component, United States Patent Application Publication, US 2010/0089768 A1, Apr. 15, 2010.
- [10] R. H. Hayes, M. O. Miller, and W. R. Thompson, "Removing turbine component coatings without damage," Power Engineering, vol. 113, pp. 56-59, 2009.
- [11] C. Kilburn, "Method and apparatus for removing a thermal barrier coating from a power generation component," US Patent US20050224474A1.
- [12] A. Scrivani, C. Giolli, and B. A. Allegrini, "Method and equipment for removal of ceramic coatings by CO2 coatings," US Patent US20130040538A1.
- [13] W. Thompson, Coating removal for turbine components, <https://www.mmsonline.com/articles/coating-removal-for-turbine-components>, 2011.
- [14] A. Scrivani, G. Rizzi, On the Stripping of Turbine Blades and Vanes: Mechanisms and Performances of Chemical Stripping for the Removal of NiCrAlY Thermal Spray Coatings, International Thermal Spray Conference 05 May 2003–08 May 2003, ITSC 2003, Orlando, Florida, USA.

اخبار انجمن

- آموزش
- اخبار انجمن
- فهرست کتاب‌های موجود

■ اخبار انجمن

معرفی دوره‌های آفلاین



Greek Ship Corrosion
خوردگی با احتشام زاده

به اطلاع تمامی کارشناسان صنایع، بازرسان فنی، مدیران میانی و ارشد صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، صنایع استخراج فلزات، نیروگاه‌ها، صنایع آهن و فولاد و پژوهشگران، دانشجویان و سایر علاقه‌مندان می‌رساند که انجمن خوردگی ایران ارائه برخی از دوره‌های آموزشی فراگیر خود را به صورت مجموعه ویدئوهای ضبط و منتشر شده در پلتفرم یوتیوب، که با عنوان دوره‌های آفلاین یا الکترونیکی غیرهمزمان (عدم نیاز به حضور همزمان مدرس و متقاضی) نیز شناخته می‌شوند، آغاز نموده است:

۱- دوره اصول مهندسی خوردگی

به زبان فارسی و با صدور گواهی فارسی از سوی انجمن خوردگی؛

۲- دوره اصول مهندسی خوردگی دو زبانه فارسی و انگلیسی با صدور گواهی فارسی و انگلیسی توسط انجمن خوردگی ایران.

۳- دوره چارچوب مدیریت خوردگی دو زبانه فارسی و انگلیسی (پیش نیاز: اصول مهندسی خوردگی).

۴- دوره ارزیابی بر مبنای ریسک به دو زبان فارسی و انگلیسی با صدور گواهی فارسی و انگلیسی توسط انجمن خوردگی ایران.

یوتیوب این قابلیت را دارد که زیرنویس فارسی برای ویدئوهای انگلیسی در صورت مشاهده با کامپیوتر فعال شود.

۵- ترمودینامیک و سینتیک خوردگی دوزبانه فارسی و انگلیسی با دریافت گواهی به زبان فارسی و انگلیسی از سوی انجمن خوردگی ایران.

۶- کاربرد طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در مدلسازی خوردگی، دو زبانه فارسی و انگلیسی با صدور گواهی به زبان فارسی و انگلیسی توسط انجمن خوردگی ایران.

۷- دوره مکانیزم‌های تخریب در خوردگی به دو زبان فارسی و انگلیسی (پیش نیاز: اصول مهندسی خوردگی) با صدور گواهی فارسی و انگلیسی توسط انجمن خوردگی ایران

- مخاطبان اصلی این کانال تخصصی، کارشناسان، مدیران و تصمیم‌گیرندگان صنایع مختلف هستند که فرصت شرکت در دوره‌های مورد نظرشان را به صورت حضوری و مجازی ندارند و می‌توان ویژگی‌های مفید ویدئوها و دوره‌های این کانال را برای شاغلان در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، نیروگاهی، شیمیایی، فولاد، استخراجی فلزات غیرآهنی و... به شرح زیر بیان نمود:

۱- نداشتن حد نصاب؛ به گونه ای که هر یک نفر متقاضی می‌تواند لینک دوره را دریافت و پس از مشاهده ی مجموعه ویدئوها و شرکت در آزمون پایان دوره، گواهی خود را دریافت نماید.

۲- فرا مکانی و فرا زمانی بودن؛ به گونه ای که دوره کاملاً در اختیار متقاضی است تا در هر زمان و هر مکانی صرفاً با دسترسی به اینترنت، ویدئوها را در بازه حداکثر یک هفته کاری از زمان دریافت لینک، مشاهده و سپس در آزمون شرکت کنند.

(لینک دوره بعد از آزمون نیز در اختیار متقاضی قرار دارد.)

۳- صفر شدن هزینه‌های جاری از جمله تردد و اسکان و همچنین عدم نیاز به گرفتن مرخصی.

نحوه ثبت نام و دریافت لینک پلی لیست دوره‌ها:

<https://t.me/GreekShipCorrosion/264>

ریز سرفصل هر دوره:

https://www.youtube.com/post/Ugkxc3wujI1YTtOeWj_1CvR2GXJSVx38lyV7

دوره‌های آموزشی این کانال، مورد تایید و حمایت انجمن خوردگی ایران بوده و بر اساس ضوابط مشخص؛ گواهینامه معتبر انجمن برای متقاضیان صادر می‌گردد.

- علاقمندان می‌توانند جهت ثبت نام و دریافت لینک دوره، درخواست خود را به ایمیل زیر نیز ارسال نمایند:

training@ica.ir

لینک ویدئوی معرفی دوره‌ها:

<https://youtu.be/KBysQ8VKV0?si=2UPQxO1cSYZggBhv>

فراخوان راهبری و عضویت در کارگروه شماره ۱۵ خوردگی

ISO/TC 156/WG 15-Corrosion rates of the embedded steel reinforcement in concrete

از شرکت‌های عضو انجمن با زمینه‌های تخصصی مرتبط که تمایل به فعالیت به عنوان راهبر کارگروه فوق‌الذکر را دارند خواهشمند است درخواست خود را همراه با معرفی نماینده/نمایندگان به انجمن خوردگی ایران اعلام نمایند.

همچنین اعضای حقیقی انجمن می‌توانند به عنوان عضو کارگروه مذکور مشارکت داشته باشند

مسئولیت‌های شرکت مسئول:

● دریافت و توزیع استانداردهای موضوع مرتبط با کارگروه و دریافت و جمع‌بندی نظرات فنی و ویرایشی و ارسال به دبیر کمیته ISO/TC 156

● معرفی افراد متخصص جهت همکاری در تدوین استانداردهای بین‌المللی جدید سازمان جهانی ISO

مزایا:

● امکان دریافت استانداردهای در حال تدوین و حضور در مراحل اولیه تدوین استانداردهای بین‌المللی ISO و امکان اظهار نظر و مشارکت در آنها

● همکاری با گروه‌های متخصص بین‌المللی

● دریافت گواهی همکاری با انجمن خوردگی ایران

علاقمندان لطفاً به پست الکترونیکی زیر پیام ارسال نمایند

insotc156@gmail.com

جهت کسب اطلاعات بیشتر با انجمن خوردگی ایران تماس حاصل نمایید ۸۸۳۴۴۲۸۸ - ۰۲۱

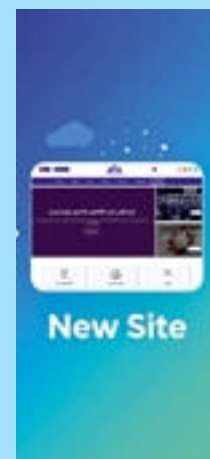
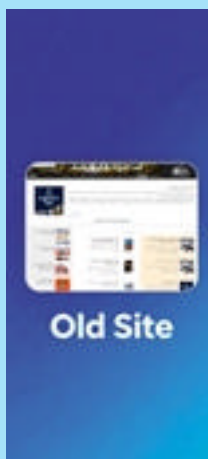
معرفی سایت جدید انجمن

سایت جدید انجمن خوردگی ایران

به آدرس موقت

new.ica.ir

در دست راهاندازی می‌باشد.



فهرست اعضا

علاقمندان می‌توانند جهت کسب اطلاعات بیشتر

در خصوص ارسال مطلب،

با انجمن خوردگی ایران تماس حاصل نمایند.

تلفن: ۸ - ۸۷ ۴۲ ۳۴ ۸۸

www.ica.ir

new.ica.ir





آشادات انجمن خوردگی ایران

فهرست کتاب‌های موجود در انجمن خوردگی ایران



انجمن خوردگی ایران

ردیف	موضوع (الفبا)	نام کتاب	تألیف / ترجمه
۱	آب، فاضلاب، تصفیه و ضدعفونی آب	بررسی روش‌های ضدعفونی آبهای آشامیدنی و صنعتی	مهندس محمدرضا نفری
۲		پمپ و فرایند اصول و کارکرد	مهندس محمدرضا نفری
۳		راهکارهای عیب زدایی در راکتورهای ناپیوسته متوالی	مهندس مهدی سیف‌اللهی، مهندس سمانه رحمانی، مهندس اکرم کاوه
۴		اسمز معکوس	مهندس محمدرضا نفری
۵		بهسازی آب در صنعت	مهندس هادی چهره‌عالم
۶		کاربرد سامانه‌های غشایی در تصفیه فاضلاب	مهندس محمدرضا نفری
۷		تصفیه آب تولیدشده در صنایع نفت و گاز	دکتر منصور فرزام، مهندس یاسین نوروزی، مهندس امین توپچیان
۸		راهنمای علمی روش‌های پیشرفته تصفیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی (دوجلدی)	مهندس محمدرضا نفری
۹		راهنمای کار دستگاه‌های فرایندی (دوجلدی)	مهندس محمدرضا نفری
۱۰		تصفیه آبهای صنعتی به‌ویژه در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی	مهندس محمدرضا نفری
۱۱		راهنمای کاربرد آب در صنعت (دوجلدی)	مهندس محمدرضا نفری
۱۲		تصفیه آب تولیدشده در صنایع نفت و گاز	دکتر منصور فرزام، مهندس یاسین نوروزی، مهندس امین توپچیان
۱۳		مبانی تصفیه آب	دکتر محمود پیکری، دکتر ارجمند مهربانی
۱۴	آند فداشونده	جلوگیری از خوردگی فلزات توسط آند فداشونده	مهندس عباس آقاجانی، دکتر احمد ساعتچی
۱۵	انتخاب مواد	انتخاب مواد برای حداقل کردن خوردگی در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی	دکتر احمد ساعتچی، مهندس فاطمه اصغرزاده جاوید، مهندس محسن صمدی خوشخو
۱۶		انتخاب مواد برای کاربرد در دماهای بالا	مهندس آرام اسعدی
۱۷		گزینش مواد در صنعت به‌ویژه در صنایع نفت و تأسیسات وابسته	مهندس محمدرضا نفری
۱۸	اسیدشویی	راهنمای علمی شست‌وشوی شیمیایی و رسوب زدایی سامانه‌های صنعتی به‌ویژه در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و نیروگاه‌ها	مهندس محمدرضا نفری
۲۰	بازدارنده‌های خوردگی	اصول و کاربرد بازدارنده‌های خوردگی (سه جلد)	مهندس محمدرضا نفری
۲۱		بازدارنده‌های خوردگی	دکتر هادی عادل‌خانی
۲۲	بازرسی غیرمخرب	اصول آزمون ذرات مغناطیس	دکتر ابراهیم حشمت‌دهکردی
۲۳		آزمون‌های غیرمخرب (روش فراصوتی)	دکتر ابراهیم حشمت‌دهکردی
۲۴		پرتونگاری صنعتی (فنون تصویرسازی)	دکتر ابراهیم حشمت‌دهکردی
۲۶	بازرسی و مدیریت خوردگی	بازرسی، کنترل و مدیریت خوردگی در پالایشگاه‌ها	دکتر ابراهیم حشمت‌دهکردی، مرحوم مهندس رسول سپهرزاده، مهندس مصطفی هدایتی مرزبالی

ردیف	موضوع (القبا)	نام کتاب	تألیف / ترجمه
۳۷	خنگ های خنگ کننده	راهنمای علمی و ابایش شیمیایی برج های خنگ کننده	مهندس محمدرضا نفری
۳۹	پروشمی بلور / بسیار	نگرشی تحلیلی بر صنعت پتروشیمی	مهندس محمدحسن پیوندی دانی
۳۰	پوشش های مقاوم به خوردگی جوی در مهندسی سطح	تکنولوژی و علم بسیار (دو جلدی)	مهندس محمدرضا نفری
۳۱	پوشش های خودترمیم میکرو / نانوساختار	پوشش های مقاوم به خوردگی جوی در مهندسی سطح	دکتر کریم زنگنه مدار
۳۲	پوشش های آلی	پوشش های خودترمیم میکرو / نانوساختار	دکتر سعیدرضا اله کرم، مهندس علیرضا ابراهیمی صدرآبادی
۳۳	پوشش های آلی	کنترل خوردگی با استفاده از پوشش های آلی	دکتر مزدک ایزدی، دکتر محمدمهدی هادوی، مهندس مهدی طباطبایی مجد
۳۴	پیگمنت ها	پیگمنت ها (خواص فیزیکی - شیمیایی کاربرد)	مهندس شمس الدین استوار
۳۵	حفاظت کاتدی	حفاظت کاتدی خطوط لوله مخازن	دکتر تقی شهرابی فراهانی، دکتر محمود علی اف خضرای، مهندس طاهر شهرابی فراهانی
۳۶	حفاظت کاتدی	حفاظت کاتدی و دستورالعمل های ارزیابی آن	دکتر محمود علی اف خضرای، مهندس علی حیدری قادی
۳۷	حفاظت کاتدی	اصول طراحی حفاظت کاتدی	مهندس مسعود روشنی، دکتر محمود علی اف خضرای
۳۸	حفاظت کاتدی	حفاظت کاتدی شاورها با آندهای فداشونده	مهندس اردشیر پاکزاد، مهندس حسین سرنگ
۳۹	حفاظت کاتدی	اصول و مبانی پایش خوردگی در صنعت	مهندس محمدحسن رستگراز
۴۰	حفاظت کاتدی	کنترل خوردگی سازه کارها، علل و روش های پیشگیرانه	مهندس محمدرضا نفری
۴۱	حفاظت کاتدی	اصول و مبانی خوردگی	مهندس منوچهر مداحی
۴۲	حفاظت کاتدی	واژه های خوردگی	دکتر سید محمود سیدرضی
۴۳	خوردگی	کتاب جامع خوردگی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی (دو جلدی)	دکتر محمود علی اف خضرای
۴۴	خوردگی	کتاب جامع خوردگی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی	دکتر محمود علی اف خضرای
۴۵	خوردگی	کنترل خوردگی در صنایع (۳ جلد)	دکتر سیدمحمود سیدرضی
۴۶	خوردگی	کتاب جامع خوردگی (سه جلدی)	دکتر محمود پاکشیر، مهندس اسما مرادی
۴۷	خوردگی	خوردگی در پالایشگاه ها	مهندس حسین مستوری
۴۸	خوردگی	خوردگی و کنترل خوردگی مقدمه ای بر علم و مهندسی خوردگی	دکتر محمدعلی گلغدار، مهندس حمیدرضا رباضی، مهندس داود فریانی
۴۹	خوردگی	اصول و کاربرد مهندسی خوردگی	مهندس محمدرضا نفری
۵۰	خوردگی	مجموعه دو جلدی خوردگی راه های عملی پیشگیری و حفاظت	مهندس محمدرضا نفری
۵۱	خوردگی	مجموعه واژه های مهندسی خوردگی	فرهنگستان زبان و ادب فارسی
۵۲	خوردگی	مبانی خوردگی الکتروشیمیایی	دکتر برج مرادی قزاقی، دکتر احمد نورزاد گلی کند
۵۳	خوردگی	کنترل خوردگی خطوط لوله بی بادی	دکتر تقی شهرابی فراهانی، مهندس اشکان دانش مسک، دکتر محمود علی اف خضرای
۵۴	خوردگی	خوردگی فولاد در بتن	مهندس محمدرضا احمدی بشکانی، مهندس صادق دهقان

ردیف	موضوع (الفبا)	نام کتاب	تألیف / ترجمه
۵۵	خوردگی میکروبی	خوردگی میکروبی	دکتر محمدعلی گلنداز، مهندس مجتبی حبیبی‌راد
۵۷	دیگ‌های بخار	راهنمای نالکو برای: تجزیه و تحلیل از کار افتادن دیگ‌های بخار	مهندس سیدحسن رفیعی پور علوی، دکتر آناهیتا شعبی
۵۹	خوردگی و نقش آب در آن	نقش آب و کنترل خوردگی در صنایع با تحلیلی از نمونه‌های خوردگی	مرحومه مهندس سید احمد پشنامازی
۶۰	رنگ و پوشش	کتاب مرجع اطلاعات استاندارد رنگ‌های صنعتی	مهندس مهدی محمدی ثابت
۶۱		مدیریت بازاریابی در صنعت رنگ	مهندس سید محمود کثیرپناه، مهندس مهدی حسین‌زاده زندگانی
۶۲		استانداردها، آماده‌سازی سطوح و اعمال پوشش‌های حفاظتی	مهندس سید محمود کثیرپناه
۶۳		اصول رنگ‌آمیزی صنعتی	مهندس سارا حق‌طلب، دکتر ترگس اسماعیلی، مهندس امیر اعلم
۶۴		مفاهیم کاربردی در فناوری رنگ و پوشش	مهندس سید محمود کثیرپناه
۶۵		هوازدگی رنگ‌ها و پوشش‌ها	مهندس سید محمود کثیرپناه، دکتر فرشته رضایی
۶۶	رنگ یون‌زدایی	علوم و تکنولوژی رنگ رزین‌ها	مهندس حمید رقی
۶۷		یون‌زدایی از آب و فرایندهای شیمیایی با استفاده از رزین‌های تعویض یونی	مهندس ترگس اسماعیلی، مهندس فرهاد عبدالله فریدنی
۶۸	فرایند تبدیل گاز به مایع و سنتز قشر - ثروپش	فرایند تبدیل گاز به مایع و سنتز قشر - ثروپش	مهندس بیتا مهرروی
۶۹	شناسایی سریع و غیرتخریبی فزات با استفاده از آزمایش فشرده	شناسایی سریع و غیرتخریبی فزات با استفاده از آزمایش فشرده	مهندس مهدی اعتباری، دکتر محمدرضا باطنی، مهندس مجید خانی
۷۰	محورهای حرارتی و مهندسی سطح	محورهای حرارتی و مهندسی سطح	دکتر محمدعلی گلنداز
۷۱	مدیریت خوردگی	مدیریت خوردگی در صنعت نفت و گاز	دکتر عماد رعایایی، مهندس محمد حسن‌زاده
۷۲	شیمی سطح	شیمی سطح فرایندهای خوردگی آبی	مهندس امیرعلی فرمائی
جهت کسب اطلاعات بیشتر در خصوص تهیه کتاب با انجمن خوردگی ایران - بخش انتشارات، تماس حاصل نمایید. شماره تلفن: ۸ - ۸۷ ۴۲ ۳۴ ۸۸، داخلی ۲ و شماره همراه / واتساپ ۷۳۶۲ ۲۵۳ ۰۹۲۱ فهرست موجود در هر شماره از تشریه بروزرسانی می‌شود.			

Iranian Corrosion Association at a Glance

History: Founded in 1993, Iranian Corrosion Association (ICA) aimed at the propagation of metals corrosion and protection significance and has gathered corrosion scientists and engineers. It holds technical congresses, delivers one-day technical seminars and presents specific courses to improve public knowledge about this natural phenomenon. Today, the number of ICA's individual members reaches 4500 and that of corporate members exceeds 250. All researchers, students, professionals, workmen, technicians and everyone who deals with or is interested in the field of corrosion are welcomed to join this scientific community.

Goals: ICA on its way to acquire the bright depicted panorama tries to:

- * establish a reciprocal correlation with the Ministry of Science, Researches, and Technology as well as universities and industries
- * make an educational connection between the variety of industries coping with corrosion problems
- * set educational meetings, technical workshops, and scientific seminars
- * publish magazine, books, and proceedings
- * hold annual national corrosion congresses and accommodating international corrosion congresses.

Publications: Zang magazine (magazine of rust), first published in summer 2000, is the scientific, promotive and educational corrosion magazine published by ICA and has been going on quarterly since then. It prepares an opportune medium for researchers, artisans and university professors to contact each other and share the results of their experiences. From the beginning of 2012, ICA was also granted the permission to publish the sole corrosion-related scientific-research journal in the country. ICA publication has also published More Than 90 books in the field of corrosion and several congress proceedings during its short life span.

Educational Activities: As the education is a vital prerequisite to any other activity, ICA has planned to enhance the general and professional knowledge of corrosion among industries through organization of educational courses including: fundamentals of corrosion, mechanical aspects of corrosion, corrosion in cooling towers, microbiologically-induced corrosion, corrosion in weldments, failure analysis, technical inspection and corrosion control, corrosion inhibitors, cathodic and anodic protection, corrosion standards, internal and external corrosion of pipelines, paints and corrosion in oil & gas industries, material selection, Coating & etc.

National Corrosion Congress: National Corrosion Congresses have been held every other year ever since 1988 and are planned to be held annually since last year. ICA has honorably managed to deliver specific seminars and exhibit technical fairs besides such congresses and has made a discussion bed for university professors and experts.

The 19th National Corrosion Congress was held on June, 2023 & 22nd National Congress and the 2nd International Corrosion Congress was held on September, 2024.

The 23rd National Corrosion Congress will be held in November 2025, organized by the Iranian Corrosion Society and hosted by Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic).

Committees: ICA has recently organized two specific committees, one engaging in the field of suggestion and approval of suitable Persian words for corrosion-related terms, and the other cooperating with governmental parties to produce or translate corrosion-related standards.

In The Name of god

ZANG

License Holder: Iranian Corrosion Association (ICA)

Managing Director: E. Roayaei (Ph.D)

Editor-in-Chief: A. R. Bahrani (M.Sc)

Editorial Bord (In Persianal phabetical order):

H. Adelkhani (Ph.D)

M. Ehteshamzadeh (Ph.D)

M. A. Golozar (Ph.D)

A. Hatami Monfared (M.Sc)

K. Jafarzadeh (Ph.D)

S. M. Kasiriha (M.Sc)

M. Najmi (M.Sc)

R. Imanian (M.Sc)

A. Masoudi (Ph.D)

Executive colleagues:

Ica: H. Abassia, Z. Asef ,A. Karami

Students: Mohsen Jalali, Ahmad Reza Joukar

Publisher:

Iranian Corrosion Association, ICA

ZANG is a Persian word having different meaning, the first of which is an equivalent for "Rust", while others are equivalents for "Bell" and "to ring a bell, to warn". The word Zang seems to best clarify the objectives of the journal, which is mainly warning about the consequences of corrosion and rusting.

ZANG, the scientific, educational, promotive journal of Iranian corrosion Association (ICA) is quarterly published with the aim of the enhancement of the corrosion knowledge of those engaged in metal corrosion and protection, creating a dependable information database regarding internal & external corrosion event, provoking the corrosion students to set to research work as well as acting as a connection bridge between ICA & its members. Quotation and application of ZANG written material elsewhere is allowable only while expressing the reference.

The result of papers and analyses are not necessarily consistent with ZANG managers' viewpoints.

ZANG is free to edit & correct the received written material and will not return them. ZANG also highly welcomes and appreciates the readers' progressive opinions.

Iranian Corrosion Association

Unit 3, No.11, Oshana Alley.,

Forsat St., Ferdowsi Sq., Tehran, Iran

Tel: +982188827334, 88344287-8

Fax: +982188347749 , 88827334

P.O.BOX: 15815-3411

Website: www.ica.ir

Email: info@ica.ir

Price: Free digital version

ZANG

The Scientific, Educational, Promotive Quarterly

Journal of Iranian Corrosion Association (ICA)

19th Year, Issue 79

Jul. 2026



Content

Editorial	2
Introduction	3
Report of the 23 rd National Corrosion Congress	4
Articl	
Chemical resistance investigation of anti-corrosion coatings using surface energy approach	12
Investigation of Effective Parameters on Corrosion of Nickel Base Alloy (Ni 200) in Alkaline Medium	18
Increasing The Effectiveness of Corrosion Training For Utility and Offsite Process Engineers in Gas Plants and Other Energy Industries	36
The Word of Corrosion	
Corrosion Words	44
Corrosion Books Presentation	45
Corrosion Internet Sites	48
Tutorial	
Non-destructive testing	50
High temperature coatings	58
Association News	
Training	66
News ICA	67
Book List	68

ZANG



19 th Year, Issue 79, Jul 2026

Iranian Corrosion Association

