





دانشگاه مهندسی - گروه متالورژی و مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد - گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

بررسی تاثیر نسبت فیریت به آستنیت بر خوردگی حفره ای در محیط آبی اشباع از دی اکسید کربن و درجه بی حساس

شدن فولاد زنگ نزن دو فاز ۲۲۰۵

استاد راهنما:

دکتر محمد مادی مؤید

استاد مشاور:

دکتر علی داوودی

نخاستگاه:

مجتبی دهبان پور شرفضائی

زستان ۱۳۹۱

# اظهارنامه

اینجانب مجتبی دهقان پور شهرضائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد-شناسائی و انتخاب مواد مهندسی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده پایان نامه **بررسی تأثیر نسبت فریت به آستنیت بر خوردگی حفره‌ای در محیط آبی اشباع از دی‌اکسید کربن و درجه‌ی حساس شدن فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵** تحت راهنمایی دکتر محمد هادی مؤید متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه فردوسی مشهد » و یا « Ferdowsi University of Mashhad » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۱۳۹۱/۱۲/۲

امضای دانشجو

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله/پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.
- متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده وجود داشته باشد.

تقديم به:

آستان مقدس سلطان سير ارتضاء، حضرت شمس الشموس، انيس النفوس

الدفون به ارض طوس، الالام الرؤوف والغوث الملهوف

مولانا اباحسن علي بن موسى الرضا

عليه آلاف التحيت والثناء

که مديون و شرمنده الطاف و عنایات آن امام همام، هستم.

هديه به: گل نرجس، حضرت حجت بن الحسن العسكري (عجل الله تعالى فرجه الشريف)

(رب ادخلنی مدخل صدق و اخرجنی مخرج صدق و ابعثنی من لدنک سلطاناً نصیراً)

الهی چون تو حاضری چه جویم و چون تو ناظری چه گویم.

رسم ادب است که در آغاز نوشتار از ولی نعمتان سپاس کنند. چه انواری فحیم تر از ذوات مقدسه‌ی معصومین و هداة مهدیین علیم السلام که بسی زیاده‌معاشان

فرموده‌اند: این ذکر انخیر کنتم اوله و اصله و فرعه و معدنه و ماداه و متناه.

زبان از بیان عظمت و جلالت این اولیاء و اصنیاء، قاصر و عاجز است و چه زیبا و شیرین است اسماء شایا اولیاء الحق: فاعلمی انما کم و اکرم انفسکم و سپاس

مرخدای را که بر این بنده حقیر عاصی منت نهاد و توفیق ریزه خواری و آستان بوسی امام رؤف آقا با حسن علی بن موسی الرضا (ع) را عنایت فرمود.

سپاس ویژه خود را از پدر و مادر عزیزم و همچنین خانواده کران قدرم که زحمات بسیاری را در تمامی مراحل زندگی با لطف و مهربانی بر بنده مبذول داشته‌اند اهدا نموده و

خالصانه و دستار وجود مبارکشان، بستم.

و نیز بر خود لازم می‌دانم که صمیمانه از تمامی اساتید در مطلع مختلف تحصیلی علی‌الخصوص اساتید این مقطع، استاد راهنمای عزیزم جناب آقای دکتر محمد باودی مؤید

و استاد مشاور ارجمند جناب آقای دکتر داوودی و اساتید داور آقایان دکتر فرزینانی و دکتر کیانی رشید و همچنین از دیگر اساتید گرامی گروه مندی مواد دانشگاه فردوسی

مشهد به رسم ادب تشکر نمایم.

## چکیده

فولادهای زنگ‌نزن دوفازی از جمله فولادهای مقاوم به خوردگی هستند که به دلیل خواص ویژه و کاربردهای فراوان در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، کاغذ سازی، سیستم های آب، آب شیرین کن ها و ... مورد توجه بسیاری از محققین، تولید کنندگان فولاد و مصرف کنندگان نهائی قرار گرفته است. خانواده فولادهای زنگ-نزن دوفازی فریتی-آستنیتی شامل فولاد مشهور ۲۲۰۵ که با اضافه کردن نیتروژن و بهینه کردن میزان مولیدن به خواص مطلوبی چون مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی خوب دست یافته‌اند. این فولادها عموماً شامل ۵۰٪ فریت و ۵۰٪ آستنیت در ساختار خود هستند. پژوهش گران مختلف نشان داده که ریزساختار و خواص این فولاد متأثر از دمای عملیات حرارتی آنیل اولیه بر روی آن است. با افزایش دمای آنیل اولیه کسر حجمی فریت نسبت به آستنیت افزایش می‌یابد. به علاوه به وسیله‌ی این عملیات حرارتی اندازه‌ی میانگین دانه و آستنیت و فریت بزرگ‌تر می‌شود. این عملیات حرارتی اندازه میانگین دانه‌ها در تحقیق حاضر تأثیر تغییر نسبت فریت به آستنیت بر خوردگی حفره‌ای در محیط آبی اشباع از دی‌اکسید کربن و همچنین درجه‌ی حساس شدن فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ مورد بررسی قرار گرفت. با بالا بردن دمای آنیل اولیه بر روی این فولاد، کسر حجمی فریت و مورفولوژی دانه‌ها بزرگ‌تر می‌شود.

در این تحقیق تأثیر عملیات حرارتی‌های آنیل مختلف که منجر به تغییر کسر فریت و آستنیت می‌شود بر خوردگی حفره‌ای فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ در محلول ۳/۵٪ NaCl اشباع شده با دی‌اکسید کربن مورد بررسی قرار گرفته است. به علاوه تأثیر دمای عملیات حرارتی آنیل اولیه و حساس سازی پس از آن در دمای ۸۵۰°C درجه‌ی بررسی شد.

در محلول  $\text{NaCl}$  ۳/۵٪ اشباع شده با دی‌اکسید کربن، آزمون‌های مختلف الکتروشیمیایی بر روی فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ بر روی نمونه‌های مورد آنبیل قرار گرفته در ۱۰۵۰، ۱۱۰۰، ۱۱۵۰، ۱۲۰۰ و ۱۲۵۰°C انجام شدند. تمام آزمون‌ها در دماهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰°C انجام شدند. نتایج حاصل از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان می‌دهد که نمونه‌ی عملیات حرارتی شده در دمای ۱۲۵۰°C به دلیل وجود ذرات نیتريد کروم در ساختار در داخل دانه‌ها فریت دارای بیش‌ترین دانسیته‌ی جریان و بیشترین افت پتانسیل حفره‌دار شدن نسبت به دیگر نمونه‌ها بود. نتایج حاصل از آزمون‌های پتانسیواستاتیک نشان می‌دهد که دی‌اکسید کربن دارای خاصیت محافظت‌کنندگی بر حفرات ناپایدار در دمای ۵۰°C و  $\text{pH}=4$  می‌باشد.

اندازه‌گیری درجه‌ی حساس شدن با استفاده از روش DL-EPR و به وسیله‌ی محلول  $\text{HCl} + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  بر روی نمونه‌های دماهای آنبیل اولیه‌ی ۱۰۵۰°C، ۱۱۵۰°C، ۱۲۵۰°C و ۱۳۵۰°C و سپس پیرسازی شده در دمای ۸۵۰°C برای زمان‌های ۱۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه انجام شدند. نتایج نشان دادند که در نمونه‌های آنبیل به جز نمونه‌ی ۱۳۵۰°C هیچ‌گونه حساسیتی مشاهده نشد ولی نمونه‌ی ۱۳۵۰°C دارای ۸٪ حساسیت به دلیل ذرات بسیار زیاد نیتريد کروم در ساختار در داخل دانه‌های فریت بود. در زمان ۱۰ دقیقه پیرسازی، نمونه‌ی ۱۲۵۰°C دارای کمترین درجه‌ی حساس شدن نزدیک به صفر بود که علت این پدیده به سینتیک رشد فاز زیگما در زمان‌های اولیه‌ی رسوب‌گذاری نسبت داده می‌شود. با افزایش زمان پیرسازی درجه حساس شدن به دلیل رسوب بیش‌تر فازهای ثانویه افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ‌نزن دوفازی، دمای آنبیل اولیه، خوردگی دی‌اکسید کربن، نیتريد کروم، درجه‌ی حساس شدن فولاد زنگ‌نزن

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- فصل اول: مقدمه
۵	۲- فصل دوم: مروری بر منابع
۶	۱-۲ انواع فولادهای زنگ نزن و کاربرد آن
۷	۱-۲-۱ فولادهای زنگ نزن دوفازی
۸	۱-۲-۲ نقش عناصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۳	۱-۲-۳ تعادل فازی آستنیت
۱۶	۱-۲-۴ واکنش های رسوبی:
۱۶	۱-۲-۵ آستنیت ثانویه
۱۸	۱-۲-۶ خوردگی فولادهای زنگ نزن
۲۸	۱-۲-۲ خوردگی در محیط $CO_2$
۲۸	۱-۲-۲ مقدمه
۲۹	۱-۲-۲ مکانیزم خوردگی $CO_2$





۳۲	..... عوامل مؤثر بر خوردگی CO <sub>2</sub>
۳۸	..... انواع خوردگی CO <sub>2</sub>
۴۱	..... تعریف حساس شدن
۴۲	..... حساس شدن در فولادهای زنگ نزن
۴۸	..... روش های اندازه گیری درجه حساسیت (DOS)
۶۴	..... اثر ترکیب شیمیایی بر حساس شدن
۷۳	..... نمودارهای فازي فولاد ۲۲۰۵
۷۶	..... فصل سوم: روش انجام آزمون ها
۷۷	..... ۱-۳ مواد اولیه
۷۷	..... ۱-۱-۳ ترکیب شیمیایی فولاد مورد آزمایش
۷۸	..... ۲-۱-۳ آماده سازی نمونه های میله ای
۷۹	..... ۳-۱-۳ آماده سازی نمونه های تخت
۸۰	..... ۲-۳ مراحل عملیات حرارتی مختلف بر روی فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵
۸۰	..... ۱-۲-۳ مراحل عملیات حرارتی فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ برای آزمون ها در محیط CO <sub>2</sub>



- ۲-۲-۳ مراحل عملیات حرارتی برای آزمون های حساس شدن فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ ... ۸۰
- ۳-۳ آزمون سختی سنجی ..... ۸۱
- ۴-۳ بررسی های متالوگرافی ..... ۸۱
- ۴-۳-۱ آماده سازی نمونه ها برای انجام بررسی های متالوگرافی ..... ۸۱
- ۴-۳-۲ بررسی ریزساختار ..... ۸۱
- ۴-۳-۳ تعیین درصد فازهای موجود در ساختار فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ ..... ۸۲
- ۵-۳ تهیه محلول های مورد استفاده در آزمایش های خوردگی ..... ۸۳
- ۳-۵-۱ تهیه محلول مورد استفاده برای آزمون های خوردگی در محیط CO<sub>2</sub> (آزمون های پتانسیوداینامیک) ..... ۸۳
- ۳-۵-۲ تهیه محلول برای آزمونهای خوردگی در محیط CO<sub>2</sub> (آزمون های پتانسیواستاتیک) ..... ۸۳
- ۳-۵-۳ محلول تهیه شده برای آزمون های DL-EPR (آزمون های حساس شدن) ..... ۸۴
- ۳-۶ مواد شیمیایی استفاده شده در آزمون ها ..... ۸۴
- ۳-۷ آماده سازی نمونه ها برای آزمون های خوردگی ..... ۸۵
- ۳-۸ تجهیزات مورد استفاده در آزمون های خوردگی ..... ۸۵
- ۳-۸-۱ پتانسیواستات ..... ۸۵



- ۸۵ ..... ۲-۸-۳ الکتروود مرجع
- ۸۶ ..... ۳-۸-۳ الکتروود شمارنده
- ۸۶ ..... ۴-۸-۳ حمام آب
- ۸۶ ..... ۵-۸-۳ دستگاه مورد استفاده برای الکترواچ
- ۸۷ ..... ۶-۸-۳ میکروسکوپ نوری متالوگرافی
- ۸۷ ..... ۷-۸-۳ دستگاه اکسیژن متر
- ۸۷ ..... ۹-۳ آزمون های خوردگی
- ۸۷ ..... ۱-۹-۳ آزمون اندازه گیری پتانسیل خوردگی
- ۸۸ ..... ۲-۹-۳ آزمون پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک
- ۸۹ ..... ۳-۹-۳ آزمون پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک
- ۹۰ ..... ۱۰-۳ طراحی پیل آزمون
- ۹۲ ..... ۴- فصل چهارم: نتایج و بحث
- ۹۳ ..... ۱-۴ بخش اول:
- ۹۳ ..... ۱-۱-۴ ارزیابی ریزساختاری



- ۴-۱-۲ نتایج آزمون های سختی سنجی: ..... ۹۷
- ۴-۱-۳ آزمون های پلاریزاسیون پتانسیو داینامیک ..... ۹۸
- ۴-۱-۴ آزمون های پلاریزاسیون پتانسیو استاتیک در محیط  $CO_2$  ..... ۱۰۹
- ۴-۱-۵ بررسی تأثیر دی اکسید کربن بر تعداد حفرات ناپایدار ..... ۱۱۱
- ۴-۲ بخش دوم ..... ۱۱۴
- ۴-۲-۱ نتایج بررسی های ریز ساختاری ..... ۱۱۴
- ۴-۲-۲ نتایج به دست آمده از آزمون های DL-EPR ..... ۱۲۳
- ۵- فصل پنجم: نتیجه گیری ..... ۱۳۸
- ۶- مراجع ..... ۱۴۱

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ حلالیت نیتروژن در فریت و آستنیت [۱]. ..... ۱۰
- شکل ۲-۲ منطقه درجه حرارت بالا از یک دیاگرام فازی دوتایی شماتیک برای ترکیبات شیمیایی فولادهای زنگ نزن دوفازی، ناحیه هاشور خورده نشان دهنده محدوده آلیاژهای تجاری می‌باشد [۱]. ..... ۱۵
- شکل ۳-۲ آستنیت ثانویه در یک منطقه HAZ شبیه‌سازی شده در آلیاژ ۲۲۰۵؛ آستنیت ثانویه فاز ریز روشن در اچ در مرکز یک دانه‌ی فریت اولیه می‌باشد. عملیات حرارتی شامل حرارت‌دهی در  $1350^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ ثانیه، سرد کردن و حرارت‌دهی مجدد  $1100^{\circ}\text{C}$  برای مدت ۱۰ ثانیه بود [۱]. ..... ۱۷
- شکل ۴-۲ شماتیک منحنی پلاریزاسیون آندی فلزی که مستعد برای خوردگی حفره‌ای می‌باشد [۱۰]. .. ۲۱
- شکل ۵-۲ تأثیر دما بر منحنی پلاریزاسیون فولادهای زنگ نزن آستنیتی در محلول ۳/۵ درصد  $\text{NaCl}$  [۵]. ۲۱
- شکل ۶-۲ ارتباط پتانسیل خوردگی (پتانسیلی که در آن جریان  $100 \text{ mA/m}^2$  برسد) با دما [۶]. ..... ۲۲
- شکل ۷-۲ الف) نمودار تغییرات جریان تعدادی حفره‌ی ناپایدار تشکیل شده در پلاریزاسیون فولاد AISI ۳۰۴ در پتانسیل ۰/۱ ولت در محلول دارای ۱ مولار یون کلراید. ب) یک حفره ناپایدار تشکیل شده در پلاریزاسیون در پتانسیل ۰/۱ ولت در همان محلول [۷۶]. ..... ۲۴
- شکل ۸-۲ شکل شمایی حفره‌ی، ناپایدار پوشش تشکیل شده بر روی آن و روزنه‌ی پوشش برای یک فولاد زنگ‌نزن،  $a$  عمق یا شعاع حفره و  $a^{\circ}$  شعاع روزنه است [۷۷]. ..... ۲۵



- شکل ۲-۹ نمودار پتانسیل - زمان فولاد زنگ‌نزن ۱۸/۸ در پتانسیل مدار باز در محلول ۰/۱ مولار سدیم کلراید [۸۱]. ..... ۲۸
- شکل ۲-۱۰ مقایسه مدل‌های پیش‌بینی کننده اثرات افزایش  $P_{CO_2}$  بر نرخ خوردگی در pH برابر ۴ و دمای  $20^{\circ}C$  [۹۵]. ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۱ شماتیک فرایند خوردگی برای فولادهای فریتی - پرلیتی. سمت چپ: سطح قبل از خوردگی. سمت راست: فولاد خورده شده [۱۰۴، ۱۰۶]. ..... ۳۷
- شکل ۲-۱۲ شماتیک مکانیزم شروع و رشد Mesa attack مطابق مدل پیشنهادی نایبرگ [۱۱۵]. ..... ۳۹
- شکل ۲-۱۳ (الف) شماتیک پروفیل غلظت کروم در اطراف مرزدانه در فولاد حساس شده و (ب) رسوبات شکل گرفته در مرزدانه و نواحی خالی از کروم اطراف آن‌ها [۱۸]. ..... ۴۲
- شکل ۲-۱۴ نمودار TTP برای فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ [۲]. ..... ۴۳
- شکل ۲-۱۵ نمودار دوتایی آلیاژ Fe-۱۸Cr-۸Ni و کربن [۲]. ..... ۴۴
- شکل ۲-۱۶ نمودار ساده شده دوتایی آلیاژ Fe-۱۸Cr-۸Ni و کربن [۲]. ..... ۴۶
- شکل ۲-۱۷ طرح‌واره‌ی تغییرات غلظت کروم در فصل مشترک آستنیت - فریت با حضور کاربید [۲]. ... ۴۷
- شکل ۲-۱۸ نمودار TTP برای فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ [۲]. ..... ۴۸
- شکل ۲-۱۹ ساختار پله‌ای براساس استاندارد ASTM A262 [۲۴]. ..... ۵۰

- شکل ۲-۲۰ ساختار دوگانه براساس استاندارد ASTM A262 [۲۴]. ۵۱
- شکل ۲-۲۱ ساختار شیاری براساس استاندارد ASTM A262 [۲۴]. ۵۱
- شکل ۲-۲۲ نتیجه‌ی اعمال آزمون Practive E بر نمونه‌ی حساس نشده [۲۴]. ۵۶
- شکل ۲-۲۳ نتیجه‌ی اعمال آزمون Practive E بر نمونه‌ی حساس شده [۲۴]. ۵۶
- شکل ۲-۲۴ طرح‌واره‌ی آزمون‌های (الف) SL-EPR و (ب) DL-EPR [۲۸]. ۵۹
- شکل ۲-۲۵ طرح‌واره‌ی شرایط سطح در آزمون EPR (الف) مرحله‌ی غیرفعال‌سازی و (ب) پس از مرحله-  
ی دوباره فعال‌سازی [۷۱]. ۶۱
- شکل ۲-۲۶ نتایج آزمون ERT بر روی نمونه فولاد ۳۰۴ حساس شده به مدت ۶۰۰۰ min در دمای ۷۰۰°C  
[۴۴]. ۶۴
- شکل ۲-۲۷ نمودار TTS براساس آزمون استروس برای فولاد ۱۸Cr-۸Ni [۴۹]. ۶۵
- شکل ۲-۲۸ نمودار TTS براساس آزمون استروس برای فولاد ۱۸Cr-۸Ni-۲/۵Mo [۴۹]. ۶۶
- شکل ۲-۲۹ اثر عناصر مختلف بر روی رسوب‌گذاری فاز کاربید و خوردگی مرزدانه‌ای [۵۰]. ۶۷
- شکل ۲-۳۰ وابستگی مقدار کروم و نیکل آلیاژ روی مقدار کربن برای جلوگیری از ایجاد حساسیت در ۱  
ساعت عملیات حرارتی در دمای ۶۵۰°C [۲]. ۶۸

- شکل ۲-۳۱ نیتریدهای کروم در زمینه‌ی فریت (ذرات سوزنی شکل سیاه‌رنگ) فولاد ۲۲۰۵ عملیات حرارتی آنیل انحلالی شده در دمای ۱۲۵۰ درجه‌ی سانتیگراد [۱۱۶]. ..... ۷۲
- شکل ۲-۳۲ تصاویر گرفته‌شده به وسیله‌ی میکروسکپ الکترونی از فاز  $Cr_2N$  در فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ در نمونه‌های جوشکاری شده الف) رسوب  $Cr_2N$  به شکل شش‌وجهی ب) رسوب  $Cr_2N$  به شکل صفحه‌ای [۱۱۵]. ..... ۷۳
- شکل ۲-۳۳ دیاگرام‌فازی ترموکلک فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵، که تأثیر اضافه کردن نیتروژن را نشان می‌دهد. [۱]. ..... ۷۴
- شکل ۲-۳۴ کسر حجمی فازها به صورت تابعی از دما برای فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ [۱]. ..... ۷۴
- شکل ۲-۳۵ نمودار فازهای تعادلی در فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ در دمای زیر  $1000^{\circ}C$  [۱]. ..... ۷۵
- شکل ۳-۱ نمای شماتیک از نمونه‌ی میله‌ای ..... ۷۸
- شکل ۳-۲ نمای شماتیک از نمونه‌ی تخت ..... ۷۹
- شکل ۳-۳ نحوه‌ی تعیین درصد فازها در نرم‌افزار MIP ..... ۸۲
- شکل ۳-۴ شمائی از پیل و سیستم سه‌الکترودی مورد استفاده در آزمون‌های خوردگی در محیط اشباع از دی‌اکسید کربن. ..... ۹۱



- شکل ۴-۱ تصاویر متالوگرافی فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ در دماهای عملیات حرارتی مختلف، الف)  $1050^{\circ}\text{C}$  - ۵۵٪ فریت ب)  $1100^{\circ}\text{C}$  - ۵۶٪ فریت پ)  $1150^{\circ}\text{C}$  - ۶۲٪ فریت ت)  $1200^{\circ}\text{C}$  - ۶۵٪ فریت ث)  $1250^{\circ}\text{C}$  - ۷۲٪ فریت. .... ۹۴
- شکل ۴-۲ نمودار درصد فاز فریت در فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ در دماهای عملیات حرارتی مختلف. .... ۹۵
- شکل ۴-۳ نمونه‌ی فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ آنبیل شده در دمای  $1250^{\circ}\text{C}$ ، ذرات نیتريد کروم به خوبی در ساختار، درون دانه‌های فریت مشخص است. .... ۹۶
- شکل ۴-۴ نمودار پتانسیوداینامیک و معرفی پارامترهای اصلی آن. .... ۹۹
- شکل ۴-۵ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک فولاد DSS۲۲۰۵ در محلول  $3/5\% \text{NaCl}$  اشباع از  $\text{CO}_2$  در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  در دماهای عملیات حرارتی مختلف با سرعت روبش  $0.5 \text{ mV/s}$ . .... ۱۰۰
- شکل ۴-۶ پتانسیل‌های شکست استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک در محلول  $3/5\% \text{NaCl}$  اشباع از  $\text{CO}_2$  در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  مربوط به شدت جریان  $1 \text{ mA/cm}^2$ . .... ۱۰۰
- شکل ۴-۷ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک فولاد DSS۲۲۰۵ در محلول  $3/5\% \text{NaCl}$  اشباع از  $\text{CO}_2$  در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  در دماهای عملیات حرارتی مختلف با سرعت روبش  $0.5 \text{ mV/s}$ . .... ۱۰۲
- شکل ۴-۸ پتانسیل‌های شکست استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک در محلول  $3/5\% \text{NaCl}$  اشباع از  $\text{CO}_2$  در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  مربوط به شدت جریان  $1 \text{ mA/cm}^2$ . .... ۱۰۲



- شکل ۴-۹ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک فولاد DSS۲۲۰۵ در محلول ۳/۵٪ NaCl اشباع از CO<sub>2</sub> در دمای ۴۰ °C در دماهای عملیات حرارتی مختلف با سرعت روبش ۰/۵mV/s..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۰ پتانسیل‌های شکست استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک در محلول NaCl اشباع ۳/۵٪ از CO<sub>2</sub> در دمای ۴۰ °C مربوط به شدت جریان ۱ mA/cm<sup>2</sup>..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۱ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک فولاد DSS۲۲۰۵ در محلول ۳/۵٪ NaCl اشباع از CO<sub>2</sub> در دمای ۵۰ °C در دماهای عملیات حرارتی مختلف با سرعت روبش ۰/۵mV/s..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۲ پتانسیل‌های شکست استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک در محلول اشباع از CO<sub>2</sub> در دماهای مختلف مربوط به جریان ۱ mA/cm<sup>2</sup>..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۳ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک فولاد DSS۲۲۰۵ در محلول ۳/۵٪ NaCl اشباع از CO<sub>2</sub> در دمای عملیات حرارتی ۱۰۵۰ °C در دماهای مختلف با سرعت روبش ۰/۵mV/s..... ۱۰۶
- شکل ۴-۱۴ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک فولاد DSS۲۲۰۵ در محلول ۳/۵٪ NaCl اشباع از CO<sub>2</sub> در دمای عملیات حرارتی ۱۱۰۰ °C در دماهای مختلف با سرعت روبش ۰/۵mV/s..... ۱۰۷
- شکل ۴-۱۵ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک فولاد DSS۲۲۰۵ در محلول ۳/۵٪ NaCl اشباع از CO<sub>2</sub> در دمای عملیات حرارتی ۱۱۵۰ °C در دماهای مختلف با سرعت روبش ۰/۵mV/s..... ۱۰۷
- شکل ۴-۱۶ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک فولاد DSS ۲۲۰۵ در محلول ۳/۵٪ NaCl اشباع از CO<sub>2</sub> در دمای عملیات حرارتی ۱۲۰۰ °C در دماهای مختلف با سرعت روبش ۰/۵mV/s..... ۱۰۸



- شکل ۴-۱۷ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک فولاد DSS۲۲۰۵ در محلول ۳/۵٪ NaCl اشباع از CO<sub>2</sub> در دمای عملیات حرارتی ۱۲۵۰ °C در دماهای مختلف با سرعت روبش ۰/۵ mV/s ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۱۸ پتانسیل‌های شکست استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیوداینامیک در محلول اشباع از CO<sub>2</sub> در دماهای عملیات حرارتی مختلف مربوط به جریان ۱ mA/cm<sup>2</sup> ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۱۹ نمونه‌ای از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیواستاتیک در محلول ۳/۵wt % NaCl اشباع از CO<sub>2</sub> در دمای ۵۰ °C و پتانسیل ۳۵۰ mV(SCE) نمونه‌ی عملیات حرارتی شده در دمای ۱۰۵۰ °C ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۲۰ نمودار تعداد حفرات ناپایدار برای نمونه‌های عملیات حرارتی مختلف و در دماهای کاری ۲۰ °C، ۳۰ °C، ۴۰ °C، ۵۰ °C در محلول ۳/۵٪ NaCl اشباع از CO<sub>2</sub> ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۲۱ نمودار پتانسیواستاتیک نمونه‌ی عملیات حرارتی شده در دمای ۱۰۵۰ °C در محلول ۳/۵٪ NaCl که با محلول ۱ مولار HCl، pH محلول به چهار رسانده شده است. دمای آزمون ۵۰ °C و پتانسیل ۳۵۰ mV می-باشد. .... ۱۱۲
- شکل ۴-۲۲ نمودار تعداد حفرات ناپایدار در محلول ۳/۵٪ NaCl که با محلول ۱ مولار HCl، pH محلول به چهار رسانده شده است. .... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۳ نمودار پتانسیواستاتیک نمونه‌ی عملیات حرارتی شده در دمای ۱۲۵۰ °C در محلول ۳/۵٪ NaCl که با محلول ۱ مولار HCl، pH محلول به چهار رسانده شده است. دمای آزمون ۵۰ °C و پتانسیل آن ۳۵۰ mV می‌باشد. .... ۱۱۳
- شکل ۴-۲۴ نمودار کسر حجمی فاز فریت در فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ در دماهای آنیل مختلف ... ۱۱۵

شکل ۴-۲۵ تصاویر متالوگرافی نمونه‌های آنیل شده به مدت ۴۵ دقیقه و کوئنچ شده در آب در دماهای مختلف، محلول حکاکی استفاده شده NaOH ۲۰٪ بوده است، الف)  $105^{\circ}\text{C}$  - ۵۵٪ فریت ب)  $115^{\circ}\text{C}$  - ۶۲٪ فریت پ)  $125^{\circ}\text{C}$  - ۷۲٪ فریت ت)  $135^{\circ}\text{C}$  - ۸۱٪ فریت. ۱۱۶.....

شکل ۴-۲۶ تصاویر متالوگرافی نمونه‌های آنیل شده به مدت ۴۵ دقیقه و کوئنچ شده در آب در دماهای مختلف، محلول حکاکی استفاده شده Glyceregia بوده است الف)  $105^{\circ}\text{C}$  ب)  $115^{\circ}\text{C}$  پ)  $125^{\circ}\text{C}$  ت)  $135^{\circ}\text{C}$  در نمونه‌های  $125^{\circ}\text{C}$  و  $135^{\circ}\text{C}$  ذرات نیتريد کروم به خوبی دیده می‌شوند. ۱۱۷.....

شکل ۴-۲۷ تصاویر متالوگرافی نمونه‌های آنیل شده در در دماهای مختلف به مدت ۴۵ دقیقه و کوئنچ شده در آب، سپس پیرسازی شده در دمای  $85^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه، محلول حکاکی استفاده شده NaOH ۲۰٪ بوده است، الف)  $105^{\circ}\text{C}$  ب)  $115^{\circ}\text{C}$  پ)  $125^{\circ}\text{C}$  ت)  $135^{\circ}\text{C}$ . ۱۱۸.....

شکل ۴-۲۸ تصاویر متالوگرافی نمونه‌های آنیل شده در در دماهای مختلف به مدت ۴۵ دقیقه و کوئنچ شده در آب، سپس پیرسازی شده در دمای  $85^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳۰ دقیقه، محلول حکاکی استفاده شده NaOH ۲۰٪ بوده است، الف)  $105^{\circ}\text{C}$  ب)  $115^{\circ}\text{C}$  پ)  $125^{\circ}\text{C}$  ت)  $135^{\circ}\text{C}$ . ۱۱۹.....

شکل ۴-۲۹ تصاویر متالوگرافی نمونه‌های آنیل شده در در دماهای مختلف به مدت ۴۵ دقیقه و کوئنچ شده در آب، سپس پیرسازی شده در دمای  $85^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت، محلول حکاکی استفاده شده NaOH wt% ۲۰ بوده است، الف)  $105^{\circ}\text{C}$  ب)  $115^{\circ}\text{C}$  پ)  $125^{\circ}\text{C}$  ت)  $135^{\circ}\text{C}$ . ۱۲۰.....

شکل ۴-۳۰ منحنی‌های شدت جریان - زمان و پلاریزاسیون به دست آمده از آزمون DL-EPR برای نمونه های آنیل شده در دماهای عملیات حرارتی مختلف. ۱۲۴.....