بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده‌ی مهندسی
گروه مهندسی متالورژی و مواد

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، گرایش خوردگی و حفاظت از مواد

تأثیر عملیات ترمومکانیکی بر رفتار خوردگی حفره‌ای فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شونده‌ی ۴-۱۷

نگارش:

مژگان ابویی مهریزی

استاد راهنما:

دکتر محمد هادی مؤید

زمستان ۹۱

تقدیم به پدر و مادرم

که از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

واز صبرشان ایستادگی را آموختم

سپاس گزاری

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند، و سلام و دورد بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، والاتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما، از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق":

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر مؤید که در کمال سعه ی صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از استادان فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر مزینانی و جناب آقای دکتر داوودی که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند و از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوارم، که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

چکیده

در این پژوهش تأثیر عملیات ترمومکانیکی بر روی رفتار خوردگی حفره‌ای فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شونده‌ی ٤-١٧ در محیط سدیم کلراید مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا فولاد در دمای ١٢٠٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ١٠ دقیقه انحلال‌سازی شده و سپس عملیات ترمومکانیکی فشار داغ در دماهای ٩٥٠، ١٠٥٠ و ١١٥٠ درجه‌ی سانتی‌گراد، با دو مقدار کرنش متفاوت ٠/٢ و ٠/٥ و در نرخ کرنش ثابت s^{-1} ٠/١ بر روی فولاد اعمال شد. همچنین یک نمونه در شرایط انحلال‌سازی شده، بدون انجام عملیات ترمومکانیکی، نیز برای مقایسه در نظر گرفته شد. ریزساختار فولاد به کمک میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. بر روی تعدادی از نمونه‌ها عملیات پیرسازی در دو دمای ٤٨٠ و ٥٥٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ١ ساعت، در شرایط مختلف عملیات ترمومکانیکی انجام شد. مقاومت به خوردگی حفره‌ای نمونه‌های مختلف برای شرایط قبل و بعد از عملیات پیرسازی با انجام آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ‌های روبش ٥ و ٣٠ میلی‌ولت بر دقیقه در محلول ٣/٥٪ سدیم کلراید و در دمای محیط بررسی شد. از روش‌های آماری برای نشان دادن تأثیر عملیات ترمومکانیکی بر پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد استفاده شد. تاثیر عملیات ترمومکانیکی بر شروع خوردگی حفره‌ای با بهره‌گیری از روش‌های ارائه شده در پژوهش‌های دیگران، شامل شدت جریان، طول عمر، شعاع و حاصل‌ضرب پایداری حفرات ناپایدار به همراه نرخ جوانه‌زنی حفرات ناپایدار؛ مطالعه شد. ریزساختار فولاد در شرایط انحلال‌سازی شده شامل زمینه‌ی مارتنزیتی به همراه فاز فریت دلتا بود. نتایج آماری آزمون پتانسیودینامیک نشان داد که عملیات ترمومکانیکی تقریبا اثری بر روی پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد نداشته است. شدت جریان، طول عمر، شعاع و حاصل‌ضرب پایداری حفرات ناپایدار با انجام عملیات ترمومکانیکی و افزایش دمای این عملیات افزایش یافت. ازطرف دیگر، فرکانس وقوع حفرات ناپایدار در اثر عملیات ترمومکانیکی کاهش پیدا کرد. برآیند این عوامل منجر شده است که پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شونده‌ی ٤-١٧ در اثر عملیات ترمومکانیکی در شرایط قبل و بعد از عملیات پیرسازی ثابت باقی بماند.

فهرست مطالب

مقدمه ۱

۱-۱ معرفی ۲

۱-۲ هدف ۳

۱-۳ روش انجام پژوهش ٤

مروری بر منابع ٦

۲-۱ فولادهای زنگ‌نزن ۷

۲-۲ فولادهای زنگ‌نزن رسوب سخت شونده ۹

۲-۳ فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شونده‌ی ٤-۱۷ ..... ۱۰

۲-۳-۱ عملیات حرارتی فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شونده‌ی ٤-۱۷ ..... ۱٤

۲-۳-۲ ریز ساختار فولاد زنگ‌نزن رسوب سخت شونده‌ی ٤-۱۷ ..... ۲۱

۲-٤ رویینگی فولادهای زنگ‌نزن ۲۵

۲-۵ خوردگی حفره‌ای ۲٦

۲-۵-۱ عوامل مؤثر بر خوردگی حفره‌ای فولادهای زنگ‌نزن ۲۷

۲-۵-۲ پتانسیل حفره‌دار شدن ۲۸

۲-۵-۳ حفرات ناپایدار ۲۸

۲-٦ معیار پایداری حفرات ۳۲

۲-۷ احتمال رخ‌دادن خوردگی حفره‌ای ۳٤

۲-۸ آخال‌های غیر فلزی ۳۷

۲-۹ عملیات ترمومکانیکی ٤٠

مواد و روش پژوهش ٤٤

۳-۱ مواد ٤٥

۳-۲ عملیات ترمومکانیکی ٤٦

۳-۳ عملیات حرارتی پیرسازی ٤٨

۳-٤ بررسی ریزساختار ٤٩

۳-٤-۱ آماده‌سازی نمونه ٥٠

۳-٤-۲ حکاکی ٥٠

۳-٥ آزمون‌های خوردگی موضعی ٥١

۳-٥-۱ نمونه‌سازی ٥١

۳-٥-۲ محلول‌ها ٥٢

۳-٥-۳ تجهیزات و دستگاه‌ها ٥٢

۳-٥-٤ تعیین پتانسیل خوردگی حفره‌ای ٥٣

۳-٥-٥ اندازه‌گیری و مطالعه‌ی حفرات ناپایدار و تعیین فرکانس وقوع ٥٣

نتایج، بحث و بررسی ٥٥

٤-۱ بررسی نمودارهای تنش- کرنش ٥٦

٤-۲ بررسی ریزساختار ٥٧

٤-۳ سختی سنجی ٦٣

٤-٤ آزمون‌های خوردگی ٦٤

٤-٤-۱ شدت‌جریان رویینگی ٦٥

٤-٤-۲ پتانسیل حفره‌دار شدن ٦٧

٤-٤-٣ بررسی حفرات ناپایدار ٨٩
٤-٤-٤ شدت جریان حفره، شعاع حفره و حاصل‌ضرب پایداری ٩٣
٢-٩-١ بیشینه‌ی جریان، طول عمر، شعاع و حاصل‌ضرب پایداری حفرات ناپایدار ٩٧
٤-٤-٥ فرکانس وقوع حفرات ناپایدار ١٥٣

نتیجه‌گیری ١٦٤

مراجع ١٦٧

پیوست الف)تعیین فاصله اطمینان برای یک پارامتر ..... أ

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱، ارتباط میان ترکیب شیمیایی و خواص گروه‌های مختلف فولادهای زنگ‌نزن..... ۸

شکل ۲-۲، نمودار شفلر–دلانگ برای پیش‌بینی ریزساختار فولادهای زنگ‌نزن..... ۸

شکل ۲-۳، نمای عمودی نمودار فازی آهن–کروم، خط‌های ممتد معادل ۰/۰۵ درصد کربن و خط‌چین‌ها معادل ۰/۲ درصد کربن یا ٤ و ۱۰ درصد نیکل می‌باشد..... ۱۲

شکل ۲-٤، تصویر زمینه‌ی روشن میکروسکوپ الکترونی عبوری تهیه شده از فولاد 17-4 PH پس از پیرسازی در دمای ٦۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ٤ ساعت..... ۱۷

شکل ۲-۵، تأثیر دما و زمان پیرسازی بر سختی فولاد 17-4 PH..... ۱۸

شکل ۲-٦، تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری فولاد 17-4 PH در شرایط پیرسازی در دمای ٦۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ٤ ساعت، کلونی آستنیت برگشتی به همراه چندین رسوب مس دیده می‌شود..... ۲۰

شکل ۲-۷، ریزساختار زمینه‌ی روشن میکروسکوپ الکترونی عبوری تهیه شده از فولاد 17-4 PH در شرایط انحلال‌سازی شده. فاز اصلی مارتنزیت لایه‌ای است. یک رسوب کاربید نایوبیوم و دانه‌های فریت دلتا نیز نشان داده شده است..... ۲۲

شکل ۲-۸، ریزساختار فولاد 17-4 PH موازی با جهت نورد، حکاکی شده در محلول فِرای. فاز کشیده شده در جهت نورد، فریت دلتا است..... ۲۳

شکل ۲-۹، ریزساختار زمینه‌ی روشن میکروسکوپ الکترونی عبوری فریت دلتا در فـولاد 17-4 PH در شرایط انحلال‌سازی شده. ذرات رسوبی مس دیده می‌شوند. برخی از رسـوبات بـر روی نابجـایی‌هـا تشکیل شده‌اند. ۲٤

شکل ۲-۱۰، الف) نمودار تغییرات جریان تعدادی حفره‌ی ناپایدار تشکیل شده در اثـر پلاریزاسـیون فولاد AISI 304 در پتانسیل ۰/۱ ولت در محلول دارای ۱ مولار یـون کلرایـد. ب) یـک حفـره ناپایـدار تشکیل شده در پلاریزاسیون در پتانسیل ۰/۱ ولت در همان محلول..... ۲۹

شکل ۲-۱۱، شکل شمایی حفره‌ی ناپایدار، پوشش تشکیل شده بر روی آن و روزنه‌ی پوشش بـرای یک فولاد زنگ‌نزن، a عمق یا شعاع حفره و a° شعاع روزنه است..... ۳۰

شکل ۲-۱۲، a) تغییرات فرکانس رخ‌دادن حفرات ناپایدار با پتانسیل اعمالی: خطوط AB و CD بـه ترتیب بازه‌ی تغییرات مشاهده شده بـرای فـولاد تجـاری AISI 304 در محلـول $۲/۸\times۱۰^{-۲}$ و $۲/۸\times۱۰^{-۳}$ مولار سدیم کلراید است. خط E برای فولاد AISI 316، خط F برای فولاد پـر گـوگرد و خـط G بـرای فولاد کم گوگرد، همگی در محلول $۲/۸\times۱۰^{-۲}$ مولار سـدیم کلرایـد و نـرخ روبـش پتانسـیل ۵. µV/s b) تغییرات فرکانس رخ‌دادن حفرات پایدار با پتانسیل اعمالی: (○) فولاد AISI 316، (Δ) فولاد AISI 304 L و (□) فولاد پر گوگرد..... ۳۷

شکل ۲-۱۳، نمودار پتانسیل–زمان فولاد زنگ‌نزن 18/8 در پتانسیل مدار بـاز در محلـول ۰/۱ مـولار سدیم کلراید..... ۴۰

شکل ۳-۱، نمای شمایی تهیه‌ی استوانه‌ها و آماده‌سازی نمونه برای عملیات فشار گرم: ۱) میـل‌گـرد اولیه، ۲) استوانه تهیه شده برای عملیات فشار گرم (به جهت استخراج نمونه‌ها توجه شود)..... ٤۵

شکل ۳-۲، نمای شمایی الگوی حرارتی اعمال شده بر روی نمونه‌ها..... ٤٦

شکل ۳-۳، نمای شمایی چگونگی بشکه‌ای شدن در نمونه‌ی تغییر شکل یافته: ۱) نمونه‌ی اولیه ۲) نمونه‌ی تغییرشکل یافته..... ٤٧

شکل ۳-٤، نمای شمایی صفحه‌ی برش در نمونه‌های تغییر شکل یافته..... ٤٨

شکل ٤-۱، نمودار تنش- کرنش نمونه‌های تغییر شکل یافته در دماهای مختلف برای دو مقدار کرنش ۰/۲ و ۰/۵..... ٥٦

شکل ٤-۲،نمودار فازی برای پیش‌بینی ریزساختار فولاد PH 17-4 برمبنای درصد کروم معادل و نیکل معادل. علامت + در نمودار موقعیت فولاد مورد مطالعه را نشان می‌دهد..... ٥٨

شکل ٤-۳، ریزساختار فولاد PH 17-4 الف) نمونه‌ی کارگرم نشده (انحلال سازی شده) و نمونه‌های عملیات ترمومکانیکی شده پس از انحلال سازی ابتدایی با کرنش ۰/۲ و دمای ب) $950^{\circ}C$ پ) $1050^{\circ}C$ ت) $1150^{\circ}C$، حکاکی شده در محلول فرای بهینه..... ٥٩

شکل ٤-٤، ریزساختار فولاد PH 17-4 الف) نمونه‌ی کارگرم نشده (انحلال سازی شده) و نمونه‌های عملیات ترمومکانیکی شده پس از انحلال سازی ابتدایی با کرنش ۰/۵ و دمای ب) $950^{\circ}C$ پ) $1050^{\circ}C$ ت) $1150^{\circ}C$، حکاکی شده در محلول فرای بهینه..... ٦٠

شکل ٤-۵، ریزساختار فولاد PH 17-4 در مقطع موازی با جهت نورد اولیه. دانه‌های کشیده شده‌ی فریت دلتا موازی با جهت نورد در ناحیه مرده و دانه‌های تبلور مجددیافته قابل مشاهده می‌باشند. خط تیره رنگ ناحیه مرده را از ناحیه تبلور مجدد یافته جدا می‌کند. سمت چپ خط تیره ناحیه مرده و سمت راست آن ناحیه تبلور مجدد شده است..... ٦١

شکل ٤-٦، ریزساختار فولاد PH 17-4 کارگرم شده در دمای ۹۵۰°C و کرنش ۰/۲ حکاکی شده در محلول ۲۰٪ وزنی NaOH.. فاز تیره رنگ فریت دلتا می‌باشد..... ٦٢

شکل ٤-٧، نمودار سختی در شرایط قبل از پیرسازی، پیرسازی شده در دمای ٤٨٠°C. و پیرسازی شده در دمای ۵۵۰°C برای نمونه‌های مختلف. منظور از حرف S نمونه‌ی کارگرم نشده می‌باشد. در نامگذاری نمونه‌های کارگرم شده عدد اول دما وعدد دوم کرنش در عملیات ترمومکانیکی است..... ٦٣

شکل ٤-٨، نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ روبش پتانسیل ۳۰ میلی‌ولت بر دقیقه در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید در دمای محیط برای شرایط مختلف عملیات ترمومکانیکی. در نامگذاری نمونه‌ها عدد اول دما و عدد دوم کرنش در عملیات ترمومکانیکی می‌باشد. منظور از solution anneal نمونه‌ی انحلال‌سازی شده (بدون انجام عملیات ترمومکانیکی) است..... ٦٥

شکل ٤-٩، نمودار توزیع تجمعی پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد PH 17-4 برای دماهای مختلف عملیات ترمومکانیکی در کرنش ۰/۲، به دست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط..... ٦٩

شکل ٤-١٠، نمودار توزیع تجمعی پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد PH 17-4 برای دماهای مختلف عملیات ترمومکانیکی در کرنش ۰/۵، به دست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط..... ٧٢

شکل ٤-١١، نمودار فاصله‌ی اطمینان ۹۵ درصد پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد PH 17-4 کارگرم شده در دماهای مختلف برای دو کرنش ۰/۲ و ۰/۵ به دست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط. منظور از اعداد در محور افقی دمای عملیات ترمومکانیکی انجام شده برروی هر نمونه برحسب درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد..... ٧٤

شکل ٤-١٢، نمودار توزیع تجمعی پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤٨٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. پتانسیل حفره‌دار شدن از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است..... ٧٦

شکل ٤-١٣، نمودار توزیع تجمعی پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤٨٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. پتانسیل حفره‌دار شدن از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است..... ٧٨

شکل ٤-١٤، نمودار فاصله‌ی اطمینان ۹۵ درصد پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد 17-4 PH کارگرم شده در دماهای مختلف برای دو کرنش ۰/۲ و ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤٨٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. منظور از اعداد در محور افقی دمای عملیات ترمومکانیکی انجام گرفته بر روی هر نمونه برحسب درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد..... ٨٠

شکل ٤-١٥، نمودار توزیع تجمعی پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های مختلف کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. پتانسیل حفره‌دار شدن از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است..... ٨١

شکل ٤-١٦، نمودار توزیع تجمعی پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت

۱ ساعت. پتانسیل حفره‌دار شدن از آزمون پتانسیودینامیک در محلـول ۳/۵٪ سـدیم کلرایـد و در دمـای محیط به دست آمده است..... ۸۵

شکل ٤-۱۷، نمودار فاصله‌ی اطمینان ۹۵ درصد پتانسیل حفره‌دار شدن فولاد 17-4 PH کارگرم شده در دماهای مختلف برای دو کرنش ۰/۲ و ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گـراد به مدت ۱ ساعت. منظور از اعداد در محور افقی دمای عملیات ترمومکانیکی هر نمونه برحسب درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد..... ۸۸

شکل ٤-۱۸، یکی از نمودارهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ روبش ۵پتانسیل میلی‌ولـت بـر دقیقه در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید در دمای محیط..... ۹۰

شکل ٤-۱۹، تغییرات جریان یک حفره‌ی ناپایـدار در نمونـه‌ی انحـلال سـازی شـده(بـدون انجـام عملیات ترمومکانیکی) در آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ روبـش پتانسـیل ۵ میلـی‌ولـت بـر دقیقه در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید در دمای محیط..... ۹۱

شکل ٤-۲۰، نمودار دوبار لگاریتمی جریان حفره‌ی ناپایدار نشان داده شده در شکل ٤-۱۹. رابطـه‌ی $I \propto t^{3/2}$ برای مقایسه آورده شده است..... ۹۲

شکل ٤-۲۱، تغییرات جریان و شدت جریان محاسبه شده بر حسب زمان برای حفـره‌ی ناپایـدار در نمونه‌ی انحلال سازی شده(بدون انجام عملیات ترمومکانیکی) در آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ روبش پتانسیل ۵ میلی‌ولت بر دقیقه در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط..... ٩٤

شکل ٤-۲۲، تغییرات جریان و شعاع نیم کره (حفره‌ی ناپایدار) محاسبه شده بر حسـب زمـان بـرای حفره‌ی ناپایدار نمونه‌ی انحلال سازی شده(بدون انجام عملیات ترمومکـانیکی) در آزمـون پلاریزاسـیون

پتانسیودینامیک با نرخ روبش پتانسیل ۵ میلی‌ولت بر دقیقه در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط..... ۹۵

شکل ٤-۲۳، تغییرات جریان و حاصل ضرب پایداری محاسبه شده بر حسب زمان برای حفره‌ی ناپایدار در نمونه‌ی انحلال‌سازی شده(بدون انجام عملیات ترمومکانیکی) در آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ روبش پتانسیل ۵ میلی‌ولت بر دقیقه در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط..... ۹٦

شکل ٤-۲٤، تغییرات جریان بر حسب زمان دو حفره‌ی دارای هم‌پوشانی نمونه‌ی انحلال سازی شده(بدون انجام عملیات ترمومکانیکی) در آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ روبش پتانسیل ۵ میلی‌ولت بر دقیقه در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط..... ۹۷

شکل ٤-۲۵، نمودار توزیع تجمعی جریان بیشینه‌ی حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ بدست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط..... ۹۸

شکل ٤-۲٦، نمودار توزیع تجمعی جریان بیشینه‌ی حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ بدست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط..... ۱۰۰

شکل ٤-۲۷، نمودار توزیع تجمعی جریان بیشینه‌ی حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر جریان بیشینه از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است..... ۱۰۲

شکل ٤-٢٨، نمودار توزیع تجمعی جریان بیشینه‌ی حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤٨٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر جریان بیشینه از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است..... ١٠٤

شکل ٤-٢٩، نمودار توزیع تجمعی جریان بیشینه‌ی حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر جریان بیشینه از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است..... ١٠٦

شکل ٤-٣٠، نمودار توزیع تجمعی جریان بیشینه‌ی حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر جریان بیشینه از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است..... ١٠٩

شکل ٤-٣١، نمودار توزیع تجمعی طول عمر حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ بدست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط..... ١١٢

شکل ٤-٣٢، نمودار توزیع تجمعی طول عمر حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ بدست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط..... ١١٤

شکل ٤-٣٣، نمودار توزیع تجمعی طول عمر حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤٨٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر طول عمر از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است. ١١٦

شکل ٤-٣٤، نمودار توزیع تجمعی طول عمر حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤٨٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر طول عمر از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است. ١١٨

شکل ٤-٣٥، نمودار توزیع تجمعی طول عمر حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر طول عمر از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است. ١٢٠

شکل ٤-٣٦، نمودار توزیع تجمعی طول عمر حفرات ناپایدار فولاد 17-4 PH برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر طول عمر از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است. ١٢٣

شکل ٤-٣٧، نمودار توزیع تجمعی شعاع حفرات ناپایدار محاسبه شده با استفاده از قانون فارادی برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ بدست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط. ١٢٧

شکل ٤-٣٨، نمودار توزیع تجمعی شعاع حفرات ناپایدار محاسبه شده با استفاده از قانون فارادی برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ بدست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط.....۱۲۸

شکل ٤-٣٩، نمودار توزیع تجمعی شعاع حفرات ناپایدار محاسبه شده با استفاده از قانون فارادی برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤٨٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر شعاع از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است.....۱۳۰

شکل ٤-٤٠، نمودار توزیع تجمعی شعاع حفرات ناپایدار محاسبه شده با استفاده از قانون فارادی برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤٨٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر شعاع از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است.....۱۳۲

شکل ٤-٤١، نمودار توزیع تجمعی شعاع حفرات ناپایدار محاسبه شده با استفاده از قانون فارادی برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ٥٥٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر شعاع از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است.....۱۳۳

شکل ٤-٤٢، نمودار توزیع تجمعی شعاع حفرات ناپایدار محاسبه شده با استفاده از قانون فارادی برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ٥٥٠ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر شعاع از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است.....۱۳٦

شکل ٤-٤٣، نمودار توزیع تجمعی حاصل ضرب پایداری حفرات ناپایدار برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ بدست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط. نوار مشکی رنگ محدوده‌ی پایداری حفرات را مشخص می‌کند. ۱۳۹

شکل ٤-٤٤، نمودار توزیع تجمعی حاصل ضرب پایداری حفرات ناپایدار برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ بدست آمده از آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط. نوار مشکی رنگ محدوده‌ی پایداری حفرات را مشخص می‌کند. ۱٤۱

شکل ٤-٤٥، نمودار توزیع تجمعی حاصل ضرب پایداری حفرات ناپایدار برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤٨۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر محاسبه شده از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است. نوار مشکی رنگ محدوده‌ی پایداری حفرات را مشخص می‌کند. ۱٤٤

شکل ٤-٤٦، نمودار توزیع تجمعی حاصل ضرب پایداری حفرات ناپایدار برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤٨۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر محاسبه شده از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است. نوار مشکی رنگ محدوده‌ی پایداری حفرات را مشخص می‌کند. ۱٤٥

شکل ٤-٤٧، نمودار توزیع تجمعی حاصل ضرب پایداری حفرات ناپایدار برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ٥٥۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر محاسبه شده از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است. نوار مشکی رنگ محدوده‌ی پایداری حفرات را مشخص می‌کند. ۱٤۸

شکل ٤-٤٨، نمودار توزیع تجمعی حاصل ضرب پایداری حفرات ناپایدار برای نمونه‌های کارگرم شده در دماهای مختلف و کرنش ۰/۵ و سپس پیرسازی شده در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت. مقادیر محاسبه شده از نتایج آزمون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید و در دمای محیط به دست آمده است. نوار مشکی رنگ محدوده‌ی پایداری حفرات را مشخص می‌کند.....۱۵۱

شکل ٤-٤٩، نمودار فرکانس تشکیل حفرات ناپایدار به عنوان تابعی از پتانسیل، به دست آمده از آزمون پتانسیودینامیک با نرخ روبش پتانسیل ۵ میلی‌ولت بر دقیقه در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید در دمای محیط برای نمونه‌های مختلف عملیات ترمومکانیکی شده با کرنش۰/۲ : الف) نمونه‌ی انحلال‌سازی شده، ب) نمونه‌ی کارگرم شده در دمای **۹۵۰°C**، پ) نمونه‌ی کارگرم شده در دمای **۱۰۵۰°C** ت) نمونه‌ی کارگرم شده در دمای **۱۱۵۰°C**. بازه‌ی خطا نشان‌دهنده‌ی اطمینان ۹۵٪ است..۱۵٦

شکل ٤-۵۰، نمودار فرکانس تشکیل حفرات ناپایدار به عنوان تابعی از پتانسیل، به دست آمده از آزمون پتانسیودینامیک با نرخ روبش پتانسیل ۵ میلی‌ولت بر دقیقه در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید در دمای محیط برای نمونه‌های مختلف عملیات ترمومکانیکی شده با کرنش۰/۵ : الف) نمونه‌ی انحلال-سازی شده، ب) نمونه‌ی کارگرم شده در دمای **۹۵۰°C**، پ) نمونه‌ی کارگرم شده در دمای **۱۰۵۰°C** ت) نمونه‌ی کارگرم شده در دمای **۱۱۵۰°C**. بازه‌ی خطا نشان‌دهنده‌ی اطمینان ۹۵٪ است.....۱۵۷

شکل ٤-۵۱، نمودار فرکانس تشکیل حفرات ناپایدار به عنوان تابعی از پتانسیل، به دست آمده از آزمون پتانسیودینامیک با نرخ روبش پتانسیل ۵ میلی‌ولت بر دقیقه در محلول ۳/۵٪ سدیم کلراید در دمای محیط برای نمونه‌های مختلف عملیات ترمومکانیکی شده با کرنش۰/۲ و سپس پیرسازی شده در دمای ٤۸۰°C: الف) نمونه‌ی انحلال‌سازی شده، ب) نمونه‌ی کارگرم شده در دمای **۹۵۰°C**، پ) نمونه‌ی