



دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد

بررسی خوردگی فولاد زنگ نزن رسوب سختی شونده  
PH 17-4 ترمیم شده به روش جوشکاری

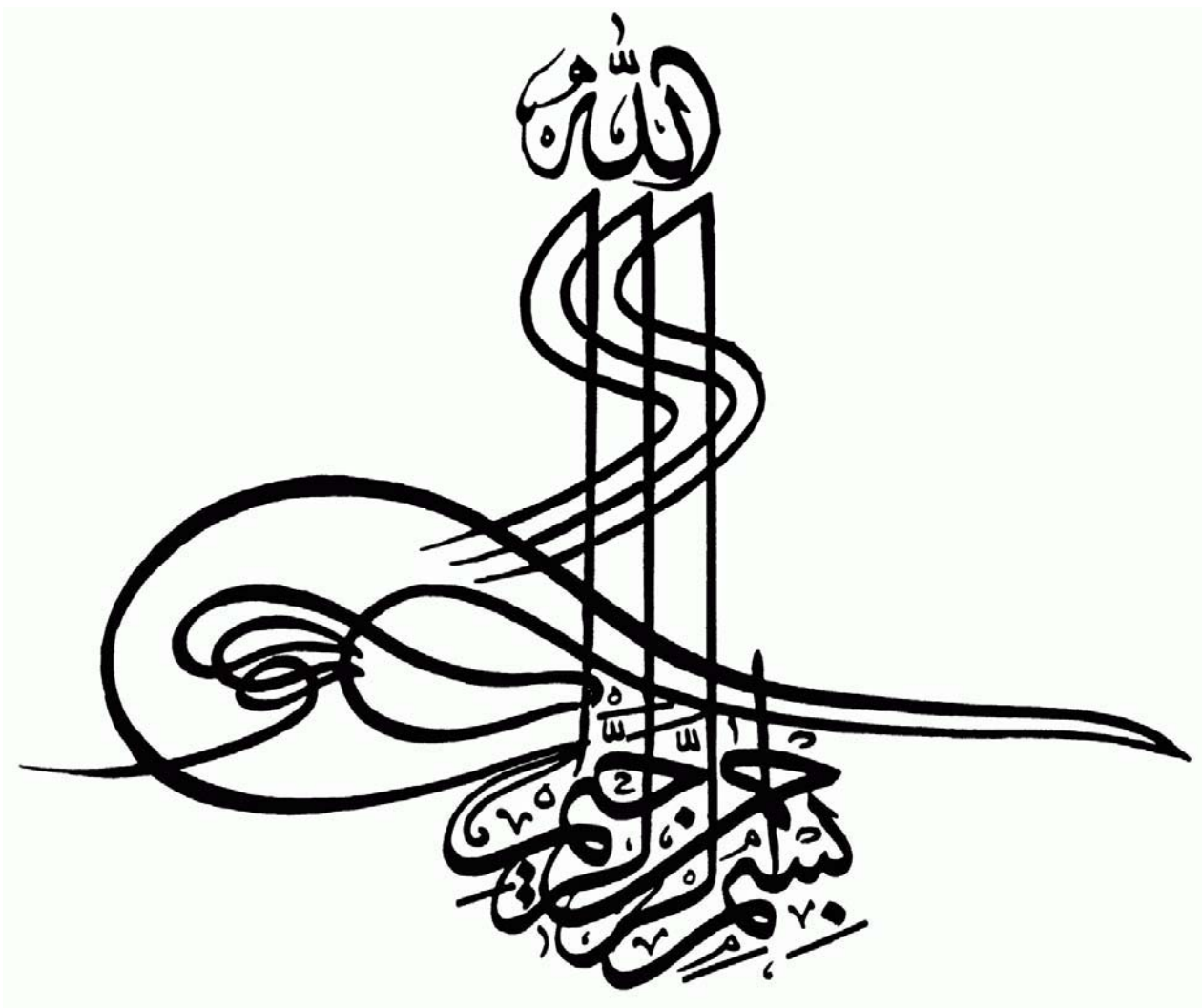
توسط

محمدرضا توکلی شوشتری

استاد راهنما:

دکتر محمدهادی موید

تابستان ۱۳۸۷



## تقدیم به مادر و پدر عزیزم که معلمین حقیقی زندگیم هستند.

تقدیم به جناب دکتر محمد هادی مؤید که تجربیات ارزشمندی را به من منتقل کردند و انجام این پروژه بدون

راهنمایی و هدایت ایشان ممکن نبود و همواره با صبر و حوصله، ایرادات پر شمار کارم را به من گوشزد نمودند.

و تقدیم به تمام آموزگاران زندگیم که هرگز فراموششان نخواهم کرد.

...

و تقدیم به همه کسانی که در راه آگاهی و دانش انسان ها گام برمی دارند و خوشی را در این مسیر متعدد و مسئول می

دانند.

## پاسکزاری

حد و پاس ایند منان راکه به بنده حقیر توفیق داد تا قادر باشم اطلاعاتی جمع آوری و آن ها را بصورت این رساله ارائه دهم. اکنون که این رساله به پایان رسیده است بر خود فرض می دانم که از استاد ارجمند و کرانقدر، جناب آقای دکتر مؤید، که در طی انجام و پیشبرد این پروژه همواره حامی، مشوق و راهنمای من بوده اند، پاسکزاری نمایم. نیز از راهنمایی ها و زحمات بی دریغ جناب آقای دکتر علی داودی، استادیار دانشگاه تربیت معلم سنوار، کمال شکر را دارم.

از جناب آقای مهندس گلپانی در شرکت طراحی مهندسی مهام توس، که آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق و همچنین بعضی اطلاعات مفید در زمینه این آلیاژ را در اختیار من قرار دادند، شکر می نمایم.

پاس فراوان از جناب آقای دکتر خلیل رنجبر، دانشیار دانشگاه شهید چمران اهواز، که این امکان را فراهم نمودند تا از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی در آزمایشگاه مرکزی آن مؤسسه بهره مند شوم.

و در آخر، پاس از تمامی دوستانی که بسیار مراد انجام این پروژه یاری نمودند.

## چکیده

ضرورت استفاده از فولادهای زنگ نزن رسوب سختی شونده 17-4PH در صنایع مختلف از یک طرف و گرانتتر بودن ساخت این فولادها از سایر فولادهای زنگ نزن از طرف دیگر، باعث شده تا در صورت معیوب بودن قطعه، هزینه جایگزینی کاملاً مشابه مقرون به صرفه نباشد. با استفاده از جوشکاری، مکان های معیوب و ترک خورده ترمیم می شوند و با توجه به کاهش زمان توقف و رفع نیاز خرید قطعه جدید، هزینه تعمیرات کاهش می یابد. برای این منظور به کمک شبیه سازی ابتدا شیاری در قطعه ایجاد و سپس جوشکاری شد. جوشکاری به روش GTAW و به صورت دستی با گاز محافظ آرگون و با سیم جوش ER630 انجام گرفت. بعد از عملیات جوشکاری، عملیات حرارتی پس گرم (PWHT) ابتدا در دمای حل سازی  $1040^{\circ}\text{C}$  به مدت یک ساعت و پس از آن در دماهای پیرسازی  $480^{\circ}\text{C}$  (یک ساعت)،  $550^{\circ}\text{C}$  (۴ ساعت) و  $620^{\circ}\text{C}$  (۴ ساعت) صورت گرفت. پس از متالوگرافی و مشاهده ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) و همچنین سختی سنجی در نمونه ها در نواحی فلز پایه، HAZ و جوش، آزمایشات خوردگی نیز انجام پذیرفت. تست های پتانسیل مدار باز (OCP)، پتانسیودینامیک و پتانسیواستاتیک بر روی هر یک از نمونه های جوش و فلز پایه به منظور تعیین پتانسیل خوردگی و پتانسیل حفره دار شدن و همچنین تست آمپر متر با مقاومت صفر (Zero Resistance Ammeter/ZRA) بمنظور اندازه گیری تمایل به خوردگی گالوانیک در زمان های کوتاه و بلند مدت بین نمونه جوش و فلز پایه در محلول  $\text{NaCl}$  ۳/۵٪ انجام گرفت. نتایج نشان داد که از لحاظ خصوصیات خوردگی، جوش تعمیراتی فولاد زنگ نزن 17-4 PH با استفاده از سیم جوش ER630 و روش جوشکاری توضیح داده شده، با توجه به دانسیته جریان های بسیار کم در همه اندازه گیری ها در محدوده چند ده  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ، رضایت بخش است. مهمترین مزیت PWHT، حذف HAZ بود که باعث گردید خطرناک ترین کوپل به لحاظ کینتیکی یعنی کوپل گالوانیک HAZ/weld از بین رود. همچنین نتایج اندازه گیری ۴۲ ساعت خوردگی گالوانیک اندازه گیری شده به روش ZRA، نشان داد که PWHT مقاومت به خوردگی گالوانیک را بهبود می بخشد. پیرسازی در  $620^{\circ}\text{C}$  بیشترین خطر را در میان سه کوپل عملیات حرارتی با بیشترین دانسیته جریان گالوانیک دارد.

## فهرست مطالب:

صفحه	عنوان
	فصل ۱ مروری بر تحقیقات انجام شده
۱-۱	تعریف یک فولاد زنگ نزن
۲-۱	خوردگی فولادهای زنگ نزن
۳-۱	متالورژی فیزیکی انواع فولادهای زنگ نزن رسوب سختی شونده
۴-۱	فولاد زنگ نزن رسوب سختی شونده 17-4PH
۵-۱	بررسی میکروساختاری فولاد 17-4PH
۱-۵-۱	آنیل انحلالی
۲-۵-۱	عملیات پیرسازی
۱-۲-۵-۱	مکانیزم فرآیند رسوب گذاری مس
۲-۲-۵-۱	مطالعه کینتیک رسوب گذاری
۳-۲-۵-۱	پیرسازی در $480^{\circ}\text{C}$ برای یک ساعت
۴-۲-۵-۱	پیرسازی در $620^{\circ}\text{C}$
۵-۲-۵-۱	تفاوت تصاویر SEM از میکروساختار در شرایط مختلف
۶-۱	متالورژی جوشکاری
۱-۶-۱	ارزیابی میکروساختار
۲-۶-۱	شرایط فلز پایه برای جوشکاری
۳-۶-۱	عملیات حرارتی قبل از جوش و پس از جوش
۷-۱	خوردگی فولادهای زنگ نزن 17-4PH
۱-۷-۱	کلیات
۲-۷-۱	مطالعه جوش پذیری فولاد زنگ نزن 17-4PH بکار رفته در پروانه (ایمپلر)
۳-۷-۱	بررسی رفتار خوردگی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۰ مقاطع نازک جوشکاری شده به روش GTAW در محلول های کلریدی
۴-۷-۱	خوردگی تعدادی از فولادهای زنگ نزن معمول و پرآلیاژ
۵-۷-۱	بررسی خوردگی گالوانیک
۱-۵-۷-۱	بررسی خوردگی گالوانیک با منحنی پلاریزاسیون

۱-۷-۵-۲ بررسی خوردگی حفره ای و گالوانیک فولاد های زنگ نزن که با لیزر	
جوشکاری شده اند.....	۵۴
<b>فصل ۲ روش انجام کار</b>	
۱-۲ بررسی کمی و کیفی آلیاژ.....	۵۹
۲-۲ عملیات جوشکاری ترمیمی.....	۶۰
۳-۲ عملیات حرارتی بعد از جوشکاری <b>Post Weld Heat Treatment</b> .....	۶۵
۴-۲ متالوگرافی و بررسی SEM.....	۶۵
۵-۲ آزمایشات خوردگی الکتروشیمیایی.....	۶۶
<b>فصل ۳ نتایج و بحث</b>	
۱-۳ ارزیابی ریزساختار با میکروسکوپ نوری.....	۷۰
۱-۱-۳ نمونه شماره ۱.....	۷۰
۲-۱-۳ نمونه شماره ۲.....	۷۴
۳-۱-۳ نمونه شماره ۳.....	۷۵
۴-۱-۳ نمونه شماره ۴.....	۷۵
۲-۳ بررسی ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).....	۷۷
۱-۲-۳ نمونه شماره ۱، نمونه as-received.....	۷۷
۲-۲-۳ نمونه شماره ۲.....	۷۹
۳-۲-۳ نمونه شماره ۳.....	۸۰
۴-۲-۳ نمونه شماره ۴.....	۸۰
۳-۳ سختی سنجی.....	۸۲
۴-۳ بررسی رفتار خوردگی در نمونه as-weld در محلول NaCl ۳/۵٪.....	۸۴
۱-۴-۳ آزمون پتانسیل مدار باز (OCP).....	۸۴
۲-۴-۳ اندازه گیری پتانسیودینامیک و پتانسیواستاتیک.....	۸۶
۳-۴-۳ اندازه گیری های ZRA.....	۹۱
۵-۳ بررسی تاثیر PWHT بر رفتار خوردگی فولاد جوشکاری شده در محلول NaCl	
۳/۵٪.....	۱۰۲
۱-۵-۳ اندازه گیری های پتانسیودینامیک و پتانسیواستاتیک.....	۱۰۲
۲-۵-۳ اندازه گیری های ZRA.....	۱۱۰
نتیجه گیری.....	۱۲۴

۱۲۵.....	پیشنهادات
۱۲۶.....	فهرست منابع



## فهرست جداول:

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول</b>
۳	جدول ۱-۱. ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن.....
۱۰	جدول ۲-۱ ترکیب شیمیایی فولاد 17-4PH.....
۱۰	جدول ۳-۱ شرایط مختلف عملیات حرارتی.....
۱۱	جدول ۴-۱ خواص مکانیکی.....
۱۱	جدول ۵-۱ خواص فیزیکی.....
	جدول ۶-۱ اثر ترکیب بر نوع انجماد اولیه و میکروساختار نهایی جوش در فولادهای PH
۲۸	.....
۳۲	جدول ۷-۱ نرخ های خوردگی برای آلیاژ 17-4PH در محیط های مختلف.....
۳۴	جدول ۸-۱ خوردگی تنشی فولاد 17-4PH.....
	جدول ۹-۱ شرایط عملیات حرارتی بعد از جوشکاری و خواص مکانیکی اتصالات، فلز
۳۶	پرکننده-الکتروود روکش دار.....
	جدول ۱۰-۱ شرایط عملیات حرارتی بعد از جوشکاری و خواص مکانیکی اتصالات، فلز
۳۶	پرکننده-سیم مغزدار.....
	جدول ۱۱-۱ مقایسه کاهش جرم اتصالات جوشکاری شده در $HNO_3$ ۵۰٪، دمای ۳۸۸K
۳۹	به مدت ۱۴۴ ساعت، $mg/cm^2$ .....
	جدول ۱۲-۱. زمان شروع تشکیل حفره ( $t_i$ ) برای فولادهای مختلف در آب دریا در $50^\circ C$
۴۵	.....
	جدول ۱۳-۱ نرخ خوردگی، پتانسیل خوردگی و حفره دار شدن آلیاژها در غلظت های
۴۷	مختلف کلر و در آب دریا در $50^\circ C$ .....
	جدول ۱۴-۱ پارامترهای خوردگی فولادهای زنگ نزن جوشکاری نشده (AR) و با لیزر
۵۶	جوشکاری شده (LW) در محلول ۳/۵٪ نمک طعام در $23^\circ C$ .....
	جدول ۱۵-۱ مقادیر حالت پایدار $E_G$ و $I_G$ کوپل های گالوانیک بین فولادهای زنگ نزن
۵۸	جوشکاری نشده و منطقه جوش آنها.....
	<b>فصل دوم</b>

- جدول ۱-۲ ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این تحقیق..... ۶۰
- جدول ۲-۲. تاریخچه قبلی عملیات حرارتی و همچنین خواص مکانیکی اندازه گیری شده فولاد مورد استفاده در این تحقیق..... ۶۰
- جدول ۳-۲ پارامترهای جوشکاری به کار رفته برای جوشکاری GTAW..... ۶۳
- جدول ۴-۲. ترکیب شیمیایی سیم جوش..... ۶۴
- جدول ۵-۲. PWHT استفاده شده در این تحقیق..... ۶۵

### فصل سوم

- جدول ۱-۳. مقادیر OCP (برای یک ساعت غوطه وری)، پتانسیل حفره دار شدن ( $E_{pit}$ ) و جریان پسیویتهی ( $i_{pass}$ )..... ۱۰۵

## فهرست اشکال:

صفحه	عنوان
	فصل اول
۵	شکل ۱-۱. دیاگرام فازی تعادلی Fe-Cr
۸	شکل ۲-۱ دیاگرام دوتایی کاذب ThermoCalc برای Fe-0.05% C-16% Cr-1% Ni، Ti-0.3% 0-25% متغیر
۱۲	شکل ۳-۱ تصویر TEM از نمونه آنیل انحلالی که مارتنزیت لایه ای و میکرو دوقلویی را نشان می دهد.
۱۴	شکل ۴-۱ تصاویر TEM و مدل های تفرق از نمونه آنیل انحلالی که نشاندهنده ساختار میکرو دوقلویی می باشد.
۱۵	شکل ۵-۱ تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه آنیل انحلالی، زمینه مارتنزیت تیغه ای ...
۱۶	شکل ۶-۱ دیاگرام فازی آهن-مس
۱۷	شکل ۷-۱ تاثیر زمان پیرسازی بر روی سختی نمونه های آنیل انحلالی شده
۱۸	شکل ۸-۱ تصویر TEM از نمونه پیرشده در $480^{\circ}C$ برای یک ساعت.
۱۹	شکل ۹-۱ تصویر زمینه روشن FEG-TEM برای رسوب مس بدست آمده از نمونه پیرشده در $480^{\circ}C$ برای یک ساعت.
۱۹	شکل ۱۰-۱ تصویر HREM از یک رسوب مس
۲۰	شکل ۱۱-۱ تصویر TEM از نمونه پیرشده در $620^{\circ}C$ .
۲۱	شکل ۱۲-۱ تصویر TEM از رسوبات مس و آستنیت برگشتی در نمونه پیرشده در $620^{\circ}C$ برای ۴ ساعت.
۲۲	شکل ۱۳-۱ آستنیت برگشتی. نمونه پیرشده در $620^{\circ}C$ برای ۸ ساعت (a) تصویر زمینه روشن؛ (b) تصویر زمینه تاریک؛ (c) مدل های تفرق؛ (d) تفسیر تصویر (c)
۲۳	شکل ۱۴-۱ (a) و (b) تصاویر زمینه روشن و زمینه تاریک از نمونه پیرشده در $500^{\circ}C$ برای ۶۴ ساعت.
۲۳	شکل ۱۵-۱ (a) و (b) تصاویر زمینه روشن و زمینه تاریک از نمونه پیرشده در $600^{\circ}C$ برای ۶۴ ساعت.

شکل ۱-۱۶ تصویر زمینه روشن از نمونه پیرشده در  $700^{\circ}C$  برای ۶۴ ساعت که رسوبات  
 کرووی شکل مس را نشان می دهد. .... ۲۴

شکل ۱-۱۷ تصاویر SEM از میکروساختار در شرایط A ، (a) شرایط H1150 (b) و H900 (c) .  
 ..... ۲۵

شکل ۱-۱۸ (a) تصویر زمینه روشن TEM از زمینه در شرایط H1150 ؛ (b) مدل تفرق  
 از شکل (a) . .... ۲۶

شکل ۱-۱۹ میکروساختار فلز جوش GTA در شرایط as-weld ، دلتا فریت در زمینه  
 مارتنزیت تمپر نشده ، 440X ..... ۲۹

شکل ۱-۲۰ سختی سنجی در فلز پایه، HAZ و فلز جوش در شرایط مختلف عملیات  
 حرارتی بعد از جوشکاری (الکتروود روکش دار) . .... ۳۷

شکل ۱-۲۱ سختی سنجی در فلز پایه، HAZ و فلز جوش در شرایط مختلف عملیات  
 حرارتی بعد از جوشکاری (سیم مغزدار) . .... ۳۷

شکل ۱-۲۲ میکروساختار SEM از HAZ برای نمونه جوشکاری شده با سیم مغزدار و  
 شرایط عملیات حرارتی B، ساختار مارتنزیتی با رسوبات کاربیدی. .... ۳۸

شکل ۱-۲۳ میکروساختار SEM از HAZ برای نمونه جوشکاری شده با سیم مغزدار و  
 شرایط عملیات حرارتی A، ساختار مارتنزیتی با رسوبات کاربیدی. .... ۳۸

شکل ۱-۲۴ SEM از مقطع نمونه جوشکاری شده با سیم مغزدار و عملیات حرارتی  
 شرایط A- حفره خیلی عمیق. .... ۳۹

شکل ۱-۲۵ سطح HAZ نمونه جوشکاری شده با سیم مغزدار و عملیات حرارتی شده در  
 شرایط B ..... ۳۹

شکل ۱-۲۶ سطح جوش و HAZ نمونه جوشکاری شده با سیم مغزدار و عملیات حرارتی  
 شده در شرایط C بعد از ۱۴۴ ساعت تست خوردگی، بهترین مقاومت به خوردگی،  
 پیرشده در  $620^{\circ}C$  بعد از عملیات حل سازی (SEM) . .... ۴۰

شکل ۱-۲۷ سطح جوش و HAZ نمونه جوشکاری شده با سیم مغزدار و عملیات حرارتی  
 شده در شرایط B بعد از ۱۴۴ ساعت تست خوردگی، کمترین مقاومت به خوردگی،  
 پیرشده در  $550^{\circ}C$  بعد از عملیات حل سازی (SEM) . .... ۴۰

شکل ۱-۲۸ سطح جوش و HAZ نمونه جوشکاری شده با سیم مغزدار و عملیات حرارتی  
 شده در شرایط A بعد از ۱۴۴ ساعت تست خوردگی، حفره زیاد نزدیک به جوش مشاهده  
 شده است (SEM) . .... ۴۱

- شکل ۱-۲۹ خوردگی اتصالات جوش (برای الکتروود روکش دار) برای عملیات حرارتی ها و مدت زمان های مختلف. ..... ۴۱
- شکل ۱-۳۰ رفتار پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فلز پایه و فلز جوش / HAZ در محلول های کلریدی. .... ۴۴
- شکل ۱-۳۱ نمودار های OCP بر حسب زمان برای فولادها در آب دریا در  $50^{\circ}C$  ..... ۴۵
- شکل ۱-۳۲ منحنی های مقاومت پلاریزاسیون برای انواع فولادهای زنگ نزن در آب دریا در  $50^{\circ}C$  ..... ۴۷
- شکل ۱-۳۳ منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای انواع فولادهای زنگ نزن در آب دریا در  $50^{\circ}C$  ..... ۴۸
- شکل ۱-۳۴ وابستگی نرخ خوردگی به میزان (Cr+Ni) و مقادیر  $PRE_N$  برای فولادهای مختلف در آب دریا در  $50^{\circ}C$  ..... ۴۹
- شکل ۱-۳۵ منحنی نرخ خوردگی بر حسب میزان کروم که نشاندهنده کاهش نرخ خوردگی با افزایش میزان کروم می باشد ..... ۵۰
- شکل ۱-۳۶ نمودار  $t_i$  و  $PRE_N$  در فولادهای زنگ نزن ..... ۵۰
- شکل ۱-۳۷ منحنی پلاریزاسیون برای فولاد کربنی و مس در محلول ۳/۵٪ نمک طعام که نشاندهنده اثر کوپل های گالوانیک است. .... ۵۲
- شکل ۱-۳۸ پتانسیل خوردگی بر حسب زمان برای فولادهای زنگ نزن as-received و منطقه جوش آنها: (a) ۳۰۴ (b) ۳۱۶ (c) ۳۱۸ (d) ۳۲۷ در محلول ۳/۵٪ نمک طعام ..... ۵۴
- شکل ۱-۳۹ منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای فولادهای زنگ نزن as-received و منطقه جوش آنها: (a) 304 (b) 316 (c) 318 (d) 327 در محلول ۳/۵٪ نمک طعام ..... ۵۵
- شکل ۱-۴۰ منحنی های  $E_G$  (a) و  $I_G$  (b) برای کوپل های گالوانیک مختلف در محلول ۳/۵٪ نمک طعام. .... ۵۷

## فصل دوم

- شکل ۱-۲. طراحی شماتیک شیار ایجاد شده جهت انجام عملیات جوشکاری ترمیمی. ..... ۶۱
- شکل ۲-۲. سطح مقطع نمونه برش خورده جهت انجام آزمایشات. .... ۶۴
- شکل ۲-۳. طراحی شماتیک جهت استخراج نمونه از (a) مناطق فلز پایه، HAZ و جوش در نمونه as-weld و (b) مناطق فلز پایه و جوش در نمونه های PWHT شده. .... ۶۷

شکل ۲-۴ نحوه نصب و قرار گیری الکترودها در پیل الکتروشیمیایی مربوط به آزمون های (a) پتانسیودینامیک و پتانسیواستاتیک و (b) ZRA ..... ۶۹

## فصل سوم

شکل ۳-۱. تصویر نوری از ریزساختار فلز پایه در نمونه As-received، تیغه های مارتنزیت تمپر شده در داخل دانه های آستنیت اولیه به همراه دندریت های فریت اولیه. ۷۰

شکل ۳-۲. تصویر نوری از ریزساختار ناحیه فلز جوش as-weld، تیغه های بلند و کشیده مارتنزیت تمپر نشده. ۷۱

شکل ۳-۳. ماکروگرافی از جوش GTA که نشاندهنده (a) ناحیه جوش، (b, c, d, e) مناطق HAZ و (f) فلز پایه می باشد. همه تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی یکسان هستند که در (b) نشان داده شده است. ۷۲

شکل ۳-۴. ماکروگرافی از جوش GTA در نمونه های (a) ۱ و (b) ۴ که نشاندهنده از بین رفتن HAZ می باشد. ۷۴

شکل ۳-۵. تصاویر نوری از مناطق (a) فلز پایه و (b) جوش در نمونه ۲. ۷۴

شکل ۳-۶. تصاویر نوری از مناطق (a) فلز پایه و (b) جوش در نمونه ۳. ۷۵

شکل ۳-۷. تصاویر نوری از مناطق (a) فلز پایه و (b) جوش در نمونه ۴. ۷۶

شکل ۳-۸. تصاویر SEM در بزرگنمایی های مختلف از میکروساختار ناحیه فلز پایه در نمونه ۱. ۷۷

شکل ۳-۹. تصویر SEM از میکروساختار ناحیه جوش فولاد 17-4PH جوشکاری با GTAW، مارتنزیت تمپر نشده (M) و دلتا فریت (F). ۷۸

شکل ۳-۱۰. تصاویر SEM از ناحیه (a) فلز پایه و (b) جوش در نمونه ۲، مارتنزیت تمپر شده و دلتا فریت. ۷۹

شکل ۳-۱۱. تصاویر SEM در بزرگنمایی های مختلف از میکروساختار ناحیه فلز پایه در نمونه ۳، لایه های سفید رنگ فریت آلفا در مارتنزیت تمپر شده. ۸۰

شکل ۳-۱۲. تصاویر SEM از ناحیه (a) فلز پایه و (b) جوش در نمونه ۴، لایه های سفید رنگ فریت آلفا در مارتنزیت تمپر شده. ۸۱

شکل ۳-۱۳. سختی سنجی مناطق فلز پایه، HAZ و جوش در نمونه های ۱، ۲، ۳ و ۴. ۸۳

شکل ۳-۱۴. تغییرات OCP برای نواحی فلز پایه، HAZ و جوش در منطقه جوشکاری ترمیمی فولاد زنگ نزن 17-4PH، غوطه ور شده برای یک ساعت در محلول ۳/۵٪ نمک طعام. ۸۴

شکل ۳-۱۵. منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای نواحی فلز پایه، HAZ و جوش در منطقه جوشکاری ترمیمی فولاد زنگ نزن 17-4PH، غوطه ور شده در محلول ۳/۵٪ نمک طعام. سرعت روبش ۳ mV/min ..... ۸۷

شکل ۳-۱۶. نمودار دانسیته جریان پسیویته از شروع پتانسیل آندی تا پتانسیل حفره دار شدن نسبت به زمان برای نواحی فلز پایه، HAZ و جوش در منطقه جوشکاری ترمیمی فولاد زنگ نزن 17-4PH، غوطه ور شده در محلول ۳/۵٪ نمک طعام ..... ۸۸

شکل ۳-۱۷. تصاویر SEM از مورفولوژی حفره های مشاهده شده در نواحی (a) فلز پایه، (b) جوش و (c) و (d) HAZ بعد از پلاریزاسیون آندی نزدیک به پتانسیل حفره دار شدن نشان داده شده در شکل ۳-۱۵. .... ۸۹

شکل ۳-۱۸. منحنی پتانسیواستاتیک برای نواحی فلز پایه، HAZ و جوش در منطقه جوشکاری ترمیمی فولاد زنگ نزن 17-4PH، غوطه ور شده در محلول ۳/۵٪ نمک طعام برای ۹۰۰ ثانیه. پتانسیل آندی ۱۵۰ mV نسبت به پتانسیل خوردگی است. .... ۹۱

شکل ۳-۱۹. (a) دانسیته جریان کوپل گالوانیک و (b) پتانسیل کوپل در سه کوپل در طی یک ساعت غوطه وری در محلول ۳/۵٪ نمک طعام اندازه گیری شده به روش ZRA ... ۹۲

شکل ۳-۲۰. اطلاعات (a) دانسیته جریان کوپل گالوانیک و (b) پتانسیل کوپل در کوپل weld/HAZ برای ۱۰ دقیقه در هر ۶ ساعت در طی ۴۲ ساعت غوطه وری در محلول ۳/۵٪ نمک طعام اندازه گیری شده به روش ZRA ..... ۹۵

شکل ۳-۲۱. شکل شماتیک برای نمایش دی پلاریزاسیون شاخه آندی. .... ۹۶

شکل ۳-۲۲. (a) دانسیته جریان گالوانیک میانگین و (b) پتانسیل کوپل میانگین در سه کوپل گالوانیک ایجاد شده طی ۴۲ ساعت غوطه وری در محلول ۳/۵٪ نمک طعام اندازه گیری شده به روش ZRA. مقادیر میانگین اطلاعات برای اندازه گیری های ۱۰ دقیقه انجام گرفت. .... ۹۸

شکل ۳-۲۳. شکل شماتیک برای بیان بهتر ضخیم شدن لایه پسیویته در اثر پلاریزاسیون آندی. .... ۹۹

شکل ۳-۲۴. منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای نواحی فلز پایه و جوش در منطقه جوشکاری ترمیمی فولاد زنگ نزن 17-4PH، در نمونه های ۲، ۳ و ۴ غوطه ور شده در محلول ۳/۵٪ نمک طعام. سرعت روبش ۳ mV/min ..... ۱۰۴

شکل ۳-۲۵. نمودار دانسیته جریان پسیویته از شروع پتانسیل آندی تا پتانسیل حفره دار شدن نسبت به زمان برای نواحی (a) فلز پایه و (b) جوش در منطقه جوشکاری ترمیمی

فولاد زنگ نزن 17-4PH، در نمونه های ۲، ۳ و ۴، غوطه ور شده در محلول ۳/۵٪ نمک طعام..... ۱۰۷

شکل ۳-۲۶. مورفولوژی حفره های پایدار و ناپایدار در نواحی (a,b,c) جوش و (d,e,f) فلز پایه در نمونه های ۲، ۳ و ۴ بعد از پلاریزاسیون آندی نزدیک به پتانسیل حفره دار شدن. .... ۱۰۸

شکل ۳-۲۷. منحنی پتانسیواستاتیک برای نواحی فلز پایه و جوش در منطقه جوشکاری ترمیمی فولاد زنگ نزن 17-4PH در نمونه های ۲، ۳ و ۴ غوطه ور شده در محلول ۳/۵٪ نمک طعام برای ۹۰۰ ثانیه. پتانسیل آندی  $200 \text{ mV}$  نسبت به پتانسیل خوردگی است. ۱۰۹

شکل ۳-۲۸. (a) دانسیته جریان کوپل گالوانیک و (b) پتانسیل کوپل در ۲، ۳ و ۴ در طی یک ساعت غوطه وری در محلول ۳/۵٪ نمک طعام اندازه گیری شده به روش ZRA... ۱۱۲

شکل ۳-۲۹. اطلاعات (a) دانسیته جریان کوپل گالوانیک و (b) پتانسیل کوپل در کوپل weld/base در نمونه ۲ برای ۱۰ دقیقه در هر ۶ ساعت در طی ۴۲ ساعت غوطه وری در محلول ۳/۵٪ نمک طعام اندازه گیری شده به روش ZRA..... ۱۱۳

شکل ۳-۳۰. اطلاعات (a) دانسیته جریان کوپل گالوانیک و (b) پتانسیل کوپل در کوپل weld/base در نمونه ۳ برای ۱۰ دقیقه در هر ۶ ساعت در طی ۴۲ ساعت غوطه وری در محلول ۳/۵٪ نمک طعام اندازه گیری شده به روش ZRA..... ۱۱۴

شکل ۳-۳۱. اطلاعات (a) دانسیته جریان کوپل گالوانیک و (b) پتانسیل کوپل در کوپل weld/base در نمونه ۴ برای ۱۰ دقیقه در هر ۶ ساعت در طی ۴۲ ساعت غوطه وری در محلول ۳/۵٪ نمک طعام اندازه گیری شده به روش ZRA..... ۱۱۵



## فصل ۱ مروری بر تحقیقات انجام شده

فولادهای زنگ نزن، شاخه مهمی از مواد مهندسی هستند که به طور گسترده در صنایع و محیطهای مختلف استفاده شده‌اند. طبقه‌بندی شاخه‌های مختلف فولادهای زنگ‌نزن براساس ریزساختار آنها عبارتند از: مارتنزیتی، فریتی، آستنیتی، دوفازی (آستنیتی- فریتی) و رسوب سختی شونده که از پیش از دهه ی ۱۹۷۰ گسترش یافته‌اند.

### ۱-۱ تعریف یک فولاد زنگ نزن

فولادهای زنگ‌نزن گروهی از فولادهای پرآلیاژ بر پایه سیستم های Fe-Cr و Fe-Cr-C و Fe-Cr-Ni می‌باشند. برای زنگ‌نزن شدن، این فولادها باید حاوی حداقل ۱۰/۵ درصد وزنی کرم باشند. این مقدار کرم اجازه شکل‌گیری یک اکسید سطحی پسیو، که از اکسیداسیون و خوردگی فلز زیر لایه تحت شرایط محیطی غیرخورنده جلوگیری می‌کند را می‌دهد. برخلاف سایر سیستمهای ماده که در آن به طور معمول طبقه‌بندی براساس ترکیب شیمیایی است، فولادهای زنگ‌نزن براساس فاز متالورژیکی (یا فازها)، که غالب می‌باشد، طبقه‌بندی می‌شوند. سه فاز امکانپذیر در فولادهای زنگ‌نزن: مارتنزیت، فریت و آستنیت می‌باشند. فولادهای زنگ‌نزن دو فازی حاوی تقریباً ۵۰ درصد آستنیت و ۵۰ درصد فریت می‌باشند و دارای خواص مطلوب هر دو فاز می‌باشند. دسته‌های رسوب‌سختی شونده<sup>۱</sup> به طور مشابه نامگذاری می‌شوند، زیرا آنها رسوبهای استحکام‌دهنده را تشکیل داده و به وسیله یک عملیات حرارتی پیرسازی سخت می‌شوند. بعلاوه فولادهای زنگ‌نزن PH به وسیله فاز یا زمینه که در آن رسوبات تشکیل می‌شوند، طبقه‌بندی خواهند شد؛ مارتنزیتی، نیمه آستنیتی و آستنیتی [۱].

---

<sup>۱</sup> Precipitation Hardening/PH

انواع فولاد زنگ‌نزن

- مارتنزیتی (۴XX) ،
- فریتی (۴XX) ،
- آستنیتی (۲XX, ۳XX) ،
- دوفازی (آستنیتی و فریتی) و
- رسوب سختی شده (PH) .

## ۲-۱ خوردگی فولادهای زنگ‌نزن [۲]

دلیل اصلی وجود فولادهای زنگ‌نزن مقاومت بالای آنها در برابر خوردگی است. کرم عنصر فعالی است ولی خود و آلیاژهایش غیر فعال شده و در بسیاری از محیطها مقاومت عالی از نظر خوردگی از خود نشان می‌دهند. فولادهای زنگ‌نزن دارای انواع مختلف می‌باشند و مقاومت خوردگی، خواص مکانیکی، و قیمت آنها در طیف وسیعی تغییر می‌کند. به همین دلیل، تعیین دقیق فولاد زنگ‌نزن برای یک کاربرد موردنظر ضروری است.

جدول ۱-۱ ترکیب متداول‌ترین فولادهای زنگ‌نزن را در چهار گروه مختلف این فولادها نشان می‌دهد. فولادهای گروه ۳ متداول‌ترین نوع بوده و گروه‌های ۲ و ۱ و ۴ به ترتیب بعد از آن قرار دارند. سیستم نامگذاری AISI نشان داده شده مربوط به حالت نوردی این فولادهاست.

جدول ۱-۱. ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن [۲]

ستاره	AISI نوع	C	Cr	Ni	درصد عناصر دیگر %	توضیحات
UNS						
<b>گروه ۱ فولادهای مارتنزیتی کرم‌دار</b>						
S ۴۱۰۰۰	۴۱۰	۰/۱۵ max	۱۱/۵-۱۳/۵	-	-	تینه‌های توربین، زه‌های والو
S ۴۱۶۰۰	۴۱۶	۰/۱۵ max	۱۲.۱۴	-	Se,Mo,Or,Zr	خوش برش
S ۴۲۰۰۰	۴۲۰	۰/۳۵-۰/۴۵	۱۲.۱۴	-	-	کارد و چنگال
S ۴۳۱۰۰	۴۳۱	۰/۲ max	۱۵.۱۷	۱/۲۵-۲/۵	-	انعطاف پذیری بهتر
S ۴۳۰۰۲	۴۳۰۸	۰/۶۰-۰/۷۵	۱۶.۱۸	-	-	خیلی سخت، تینه‌ها
<b>گروه ۲ فولادهای فریتی که قابلیت سخت شدن بوسیله عملیات حرارتی را ندارند</b>						
S ۴۰۵۰۰	۴۰۵	۰/۰۸ max	۱۱/۵-۱۳/۵	۰/۵ max	۰/۱۰-۰/۳AL	AL از سخت شدن جلوگیری می‌کند زه‌های اتومبیل، فاشق و چنگال در درجه حرارت‌های بالا
S ۴۳۰۰۰	۴۳۰	۰/۱۲ max	۱۴.۱۸	۰/۵ max	-	در O و S مقاوم می‌باشد
S ۴۳۲۰۰	۴۳۲	۰/۲۵ max	۱۸.۲۳	۰/۵ max	-	
S ۴۳۶۰۰	۴۳۶	۰/۲۰ max	۲۳.۲۷	۰/۵ max	۰/۲۵ N max	
<b>گروه ۳ فولادهای آستنیتی کرم - نیکل</b>						
S ۲۰۱۰۰	۲۰۱	۰/۱۵ max	۱۶.۱۸	۳/۵-۵/۵	۵/۰.۷/۵ Mn ۰/۲۵ N max	Mn جایگزین Ni شده
S ۲۰۲۰۰	۲۰۲	۰/۵max	۱۷.۱۹	۴.۶	۷/۵.۱۰ Mn ۰/۲۵ N max	" " " "
S ۳۰۱۰۰	۳۰۱	۰/۱۵ Max	۱۶.۱۸	۶-۸	۲ Mn max	کار سخت می‌شود
S ۳۰۲۰۰	۳۰۲	۰/۱۵ max	۱۷.۱۹	۸-۱۰	۲ Mn max	مورد استفاده در معماری
S ۳۰۲۱۵	۳۰۲ B	۰/۱۵ max	۱۷.۱۹	۸-۱۰	۲.۲ Si	Si برای مقاومت اکسیداسیون در درجه حرارت‌های بالا
S ۳۰۴۰۰	۳۰۴	۰/۰۸ max	۱۸.۲۰	۸.۱۲	۱ Si max	۱۸۸ S پیوسته
S ۳۰۴۰۳	۳۰۴ L	۰/۰۳ max	۱۸.۲۰	۸.۱۲	۱ Si max	خیلی کم کربن
S ۳۰۸۰۰	۳۰۸	۰/۰۸ max	۱۹.۲۱	۱۰.۱۲	۱ Si max	۱۸۸ بالا
S ۳۰۹۰۰	۳۰۹	۰/۲ max	۲۲.۲۴	۱۲.۱۵	۱ Si max	۲۵.۱۲ مقاوم در برابر حرارت
S ۳۱۰۰۸	۳۱۰ S	۰/۰۸ max	۲۴.۲۶	۱۹.۲۲	۱/۵ Si max	کربن کمتر
S ۳۱۴۰۰	۳۱۴	۰/۲۵ max	۲۳.۲۶	۱۹.۲۲	۱/۵.۳/۰	Si برای مقاومت اکسیداسیون در درجه حرارت‌های بالا
S ۳۱۶۰۰	۳۱۶	۰/۱۰ max	۱۶.۱۸	۱۰.۱۴	۲.۳ MO	۱۸۸ SMO
S ۳۱۶۰۳	۳۱۶ L	۰/۰۳ max	۱۶.۱۸	۱۰.۱۴	۲.۳ MO	خیلی کم کربن
S ۳۱۷۰۰	۳۱۷	۰/۰۸ max	۱۸.۲۰	۱۱.۱۴	۳.۴ MO	MO بیشتر
S ۳۲۱۰۰	۳۲۱	۰/۰۸ max	۱۷.۱۹	۸.۱۱	Ti=C(min)	پایدار شده با Ti
S ۳۲۷۰۰	۳۲۷	۰/۰۸ max	۱۷.۱۹	۹.۱۳	Cb+Ta=C(min)	Cb " "
J ۹۵۱۵۰	Alloy ۲۰*	۰/۰۷ max	۲۹	۲۰	۳/۲۵ Cu ۲/۲۵ MO	مقاومترین از نظر خوردگی
<b>گروه ۴ فولادهای پیر سخت شونده</b>						
-	۳۲۲	۰/۰۷	۱۷	۷	۰/۰۷Ti, ۰/۲Al	
S ۱۷۷۰۰	۷-۱۷ PH <sup>+</sup>	۰/۰۷	۱۷	۷	۱/۰Al	
S ۱۷۴۰۰	۱۷.۴ PH <sup>+</sup>	۰/۰۵	۱۶/۵	۴/۲۵	۴/۰Cu	
S ۱۳۸۰۰	۱۴.۸ MOPH <sup>+</sup>	۰/۰۵	۱۴	۸/۵	۲/۵ Mo, ۱/۱ Al	
S ۳۵۰۰۰	AM ۳۵۰ <sup>+</sup>	۰/۱۰	۱۶/۵	۴/۳	۲/۷۵ MO	
	CD ۲ MCU*	۰/۰۳	۲۵	۵	۳/۰Cu, ۲/۰MO	

• ترکیب شیمیایی  
+ نامهای تجاری  
• تنها در حالت ریختگی

گروه ۱ فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی نام دارند زیرا آنها را میتوان مثل فولادهای ساده کربنی بوسیله عملیات حرارتی سخت نمود. با افزایش سختی و استحکام، انعطاف‌پذیری فولاد کم می‌-

شود. مقاومت خوردگی این گروه معمولاً کمتر از گروه ۲ و ۳ بوده و در حالت سخت شده معمولاً بیشتر از حالت آنیل یا نرم شده آنها می‌باشد. این فولادها در مواقعی که مقاومت خوردگی متوسط به همراه استحکام یا سختی بالا مورد نیاز باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

گروه ۲ فولادهای فریتی هستند که بوسیله عملیات حرارتی نمی‌توان آنها را سخت نمود. شکل ۱-۱ علت این مسئله را نشان می‌دهد. این فولادها خارج از حلقه آستنیت قرار دارند و در تمام درجه حرارتها تا نقطه ذوب بصورت فریت هستند. فولادهای کربنی معمولی بخاطر تغییرات فازی در هنگام سرد شدن قابلیت سخت شدن دارند. همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، این فولادها در بالاتر از خط  $A_3$  آستینیتی هستند. آستنیت یا آهن  $\gamma$  غیرمغناطیسی بوده و دارای شبکه مکعبی با سطوح مرکز دار می‌باشد. هنگام سرد شدن به آهن  $\alpha$  یا فریت تغییر حالت می‌دهد که مغناطیسی بوده و دارای شبکه مکعبی مرکزدار می‌باشد. هنگامی که فولادهای ساده کربنی از منطقه  $\gamma$  بسرعت سرد شوند، مارتنزیت سخت و شکننده بوجود می‌آید که مغناطیسی بوده ولی دارای شبکه تتراگونال مرکزدار می‌باشد. گروه ۱ فولادهای زنگ نزن، مغناطیسی بوده و چون ترکیب آنها در حلقه گاما قرار می‌گیرد، بوسیله عملیات حرارتی می‌توان آنها را سخت نمود.