دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

جوشکاری غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی UNS S۳۲۷۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۱۶L و ارزیابی ریزساختار و رفتار خوردگی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش شناسایی و انتخاب و روش ساخت مواد

مهدی امینی

اساتید راهنما

دکتر مرتضی شمعانیان **دکتر احمد ساعتچی**

۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم
إنه من سليمان وإنه

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش شناسایی و انتخاب و روش ساخت مواد آقای مهدی امینی
تحت عنوان:

جوشکاری غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی UNS S۳۲۷۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۱۶L و ارزیابی خواص اتصال

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۱۴ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مرتضی شمعانیان
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر احمد ساعتچی
۳- استاد داور	دکتر فخرالدین اشرفی‌زاده
۴- استاد داور	دکتر مسعود عطاپور
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود پنجه‌پور

الحمدلله الذی جعلنا من المتمسکین بولایة علی ابن ابیطالب علیه السلام . . .

پس از حمد خدا بر خود لازم می دانم از زحمات اساتید راهنما **جناب آقای دکتر شمعانیان** و **جناب آقای دکتر ساعت چی** که در طول انجام این تحقیق از رهنمودهای ارزشمندشان بهره مند شدم کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

از **جناب آقای دکتر شمعانیان**، معلمی که حسن خلق و تواضعش مثال زدنی است، صمیمانه تشکر کرده و بر خود می بالم که چندین سال افتخار شاگردی ایشان را داشته ام.

از تمام پرسنل زحمت کش دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان بویژه آقایان خردمندفر، صادقی، رسولی، صفری، عربیان و خانم مهندس کرباسی به دلیل مساعدت ها و همکاری های مداومشان کمال تشکر را دارم.

در پایان از تمامی دوستان و همراهان زندگیم که تشویق هایشان انگیزه بخش و تجربه هایشان راهگشای راه زندگیم بوده است تشکر می نمایم.

تقدیم به روح پاک و ملکوتی افسر جوان جبهه جهاد علمی

شهید مصطفی احمدی روشن

و تقدیم به اسوه‌های استقامت، ایثار و مهربانی

پدر، مادر و خواهرم

این تحقیق با همکاری و پشتیبانی شرکت
نفت و گاز پارس انجام شده است.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

فهرست اشکال ..... یازده

فهرست جداول ..... سیزده

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

فصل دوم: مطالعات مروری ۵

۲-۱ فولادهای زنگ‌نزن ۵

۲-۱-۱ معرفی فولادهای زنگ‌نزن ۵

۲-۱-۲ انواع فولادهای زنگ‌نزن ۶

۲-۲ فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۶

۲-۲-۱ مقدمه ۶

۲-۲-۲ متالورژی فیزیکی ۷

۲-۲-۳ معرفی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L ۸

۲-۳ فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ۱۰

۲-۳-۱ معرفی ۱۰

۲-۳-۲ متالورژی فیزیکی ۱۲

۲-۳-۳ معرفی فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ ..... ۱۴

۲-۴ متالورژی جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۱۶

۲-۴-۱ مقدمه ۱۶

۲-۴-۲ بررسی منطقه ذوب ۱۶

۲-۴-۳ منطقه متاثر از حرارت ۱۷

۲-۴-۴ حساس‌شدن ۱۸

۲-۵ متالورژی جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ۲۰

۲-۵-۱ رفتار انجمادی ۲۰

۲-۵-۲ بررسی نقش حرارت ورودی و نرخ سرد شدن ۲۰

۲-۵-۳ آستنیت ثانویه ۲۳

۲-۵-۴ بررسی تاثیر فازهای سیگما و نیتریدکروم ۲۶

۲-۵-۵ جوش‌پذیری ۲۹
۲-۶ مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ۳۰
۲-۷ عملیات حرارتی پس از جوشکاری ۳۳
۲-۸ پیش‌بینی ساختار فلز جوش ۳۴
۲-۹ جمع‌بندی و بیان اهداف تحقیق ۳۹
فصل سوم: مواد و روش تحقیق ۴۰
۳-۱ مواد مصرفی ۴۰
۳-۲ جوشکاری نمونه‌ها ۴۱
۳-۲-۱ طرح اتصال ۴۱
۳-۲-۲ جوشکاری با جریان ثابت ۴۱
۳-۲-۳ جوشکاری با جریان پالسی ۴۳
۳-۳ بررسی‌های ریزساختاری ۴۵
۳-۴ آنالیز فازی ۴۶
۳-۵ سختی‌سنجی ۴۶
۳-۶ بررسی رفتار خوردگی ۴۷
۳-۶-۱ آماده‌سازی نمونه‌ها ۴۷
۳-۶-۲ اندازه‌گیری پتانسیل آزاد خوردگی ۴۷
۳-۶-۳ آزمون پولاریزاسیون پتانسیودینامیک ۴۷
۳-۶-۴ آزمون پولاریزاسیون سیکلی ۴۸
۳-۷ عملیات حرارتی پس از جوشکاری ۴۸
فصل چهارم: نتایج و بحث ۴۹
۴-۱ مقدمه ۴۹
۴-۲ بررسی‌های ریزساختاری ۴۹
۴-۲-۱ بررسی ریزساختار فلز پایه آستنیتی ۳۱۶L ۴۹
۴-۲-۲ بررسی ریزساختار فلز پایه سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ ..... ۵۰
۴-۲-۳ بررسی ریزساختار فلز جوش و ارزیابی تاثیر حرارت ورودی ۵۲
۴-۲-۴ بررسی ریزساختار مرز ذوب فلز پایه ۳۱۶L/ فلز جوش ۵۹
۴-۲-۵ بررسی ریزساختار مرز ذوب فلز پایه ۳۲۷۵۰/ فلز جوش ۶۱
۴-۲-۶ بررسی جوش‌های پالسی ۶۳

۴-۳ سختی سنجی ۶۵
۴-۳-۱ ریزسختی سنجی ۶۵
۴-۳-۲ پروفیل سختی ۶۶
۴-۴ بررسی رفتار خوردگی ۶۷
۴-۴-۱ مقدمه ۶۷
۴-۴-۲ پتانسیل آزاد خوردگی ۶۸
۴-۴-۳ آزمون پولاریزاسیون پتانسیودینامیک ۶۹
۴-۴-۴ آزمون پولاریزاسیون سیکلی ۷۴
۴-۴-۵ بررسی رفتار گالوانیکی ۷۵
۴-۵ عملیات حرارتی پس از جوشکاری ۷۹
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۵
۵-۱ نتیجه‌گیری ۸۵
۵-۲ پیشنهادات ۸۷
مراجع: ۸۸

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: مقاطعی از نمودار سه‌تایی Fe-Cr-Ni ۸
شکل ۲-۲: نمودار فازی سیستم Fe-10Ni-1.5Mn-0.5Si-0.04C-0.04N محاسبه شده به وسیله ترموکالک ۹
شکل ۲-۳: مقایسه بین حداقل استحکام تسلیم فولادهای زنگ‌نزن دوفازی و آستنیتی با مقاومت به خوردگی متشابه ۱۱
شکل ۲-۴: مقایسه‌ای بین مقاومت به حفره‌دار شدن فولادهای زنگ‌نزن مختلف ۱۲
شکل ۲-۵: قسمت دمای بالای نمودار فازی شبه‌دوتایی برای فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ۱۳
شکل ۲-۶: نمودار شبه‌دوتایی محاسبه شده بوسیله کامپیوتر برای دماهای بالای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ۱۴
شکل ۲-۷-الف: کسر حجمی آستنیت محاسبه شده با استفاده از محاسبات ترمودینامیکی ۱۵
شکل ۲-۷-ب: فازهای ثانویه در فولادهای زنگ‌نزن دوفازی و تاثیر عناصر آلیاژی بر نمودار TTT این فازها ۱۵
شکل ۲-۸: شماتیک چگونگی ایجاد ناحیه تخلیه شده از کرم در مرزدانه‌ها ۱۹
شکل ۲-۹: تاثیر میزان کربن فولاد بر زمان لازم برای شروع واکنش رسوب‌گذاری ۱۹
شکل ۲-۱۰: نمودار TTS فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L ۱۹
شکل ۲-۱۱: فلز جوش فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۳۲۷۵۰ و دو نوع آستنیت مرزدانه‌ای و ویدمن‌اشتاتن ۲۱
شکل ۲-۱۲: نمودار شبه دوفازی مربوط به فولادهای زنگ‌نزن دوفازی و سوپردوفازی ۲۳
شکل ۲-۱۳: آستنیت اولیه و دو نوع آستنیت ثانویه در نمونه فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۵
شکل ۲-۱۴: مکانیزم رسوب‌گذاری مشارکتی آستنیت ثانویه در فصل مشترک بین فازی ۲۵
شکل ۲-۱۵: نمودار زمان-دما-رسوب‌گذاری (TTP) مربوط به رسوبات ۲۶
شکل ۲-۱۶: نمودار کسر فازی تعادلی بر حسب دما برای فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ ..... ۲۷
شکل ۲-۱۷: مناطق تخلیه شده در اطراف فاز سیگما در یک فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۸
شکل ۲-۱۸: حساسیت به ترک خوردن انجمادی بر حسب تابعی از نسبت کرم معادل به نیکل معادل ۲۹
شکل ۲-۱۹: مقاومت به ترک خوردن خوردگی تنشی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ۳۱
شکل ۲-۲۰: تغییرات PREN فازها و دمای بحرانی حفره‌دار شدن بر حسب دمای آنیل ۳۱
شکل ۲-۲۱: نمودار گروبنر برای آلیاژ ۲۵Cr-۳/۵Mo ۳۳
شکل ۲-۲۲ : نمودار WRC-۱۹۹۲ ..... ۳۵
شکل ۲-۲۳ : تخمین زمان سرد شدن بین ۱۲۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ۳۷
شکل ۲-۲۴ : مقدار آستنیت فلز جوش برحسب تابعی از زمان سرد شدن بین ۱۲۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ۳۷
شکل ۲-۲۵ : ارتباط بین فاکتور Q (رابطه ۲-۶) و مقدارآستنیت فلز جوش ۳۸
شکل ۲-۲۶ : ارتباط بین فاکتور Q (رابطه ۲-۶) و مقدارآستنیت HAZ ۳۸
شکل ۳-۱: شماتیک طرح اتصال مورد استفاده ۴۱
شکل ۳-۲: نحوه تغییرات جریان در روش پالسی و پارامترهای مهم در این روش ۴۳
شکل ۳-۳: دستگاه کنترل پارامترها در روش جوشکاری پالسی ۴۴
شکل ۳-۴: فریتسکوپ استفاده شده برای اندازه‌گیری درصد فریت در هر نمونه ۴۶
شکل ۳-۵: دستگاه پتانسیواستات و سل مورد استفاده برای انجام آزمون الکتروشیمیایی ۴۸

شکل ۴-۱: ریزساختار فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L ۵۰
شکل ۴-۲: الگوی پراش پرتو ایکس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L ۵۰
شکل ۴-۳: ریزساختار فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ ..... ۵۱
شکل ۴-۴: الگوی پراش پرتو ایکس فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ ..... ۵۱
شکل ۴-۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی از ریزساختار فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ ..... ۵۲
شکل ۴-۶: تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار منطقه جوش ۵۳
شکل ۴-۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی از ریزساختار منطقه جوش ۵۳
شکل ۴-۸: درصد آستنیت فلز جوش برحسب تابعی از حرارت ورودی برای چهار نمونه جوشکاری شده ۵۵
شکل ۴-۹: تصویر میکروسکوپ نوری نشان‌دهنده افزایش آستنیت فلز جوش در اثر افزایش حرارت ورودی ۵۵
شکل ۴-۱۰: نمودار WRC- ۱۹۹۲ و کاربرد آن برای پیش‌بینی ریزساختار فلز جوش ۵۷
شکل ۴-۱۱: تغییرات درصد آستنیت فلز جوش برحسب تابعی از فاکتور Q ۵۸
شکل ۴-۱۲: فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی ۳۱۶L و فلز جوش ۵۹
شکل ۴-۱۳: فصل مشترک بین فلز پایه آستنیتی ۳۱۶L و فلز جوش در بزرگنمایی بالاتر ۵۹
شکل ۴-۱۴: الف) نمودار شبه دوتایی سیستم Fe-Cr-Ni ب) ارتباط نوع انجماد دوتایی ۶۰
شکل ۴-۱۵: فصل مشترک فلز پایه زنگ‌نزن دوفازی ۳۲۷۵۰ و فلز جوش ۶۲
شکل ۴-۱۶: مرز ذوب فلز پایه زنگ‌نزن دوفازی ۳۲۷۵۰ و فلز جوش در بزرگنمایی بالاتر ۶۲
شکل ۴-۱۷: تصویری شماتیک نشان‌دهنده تغییرات ریزساختاری منطقه متاثر از حرارت ۶۳
شکل ۴-۱۸: تغییرات سختی و درصد آستنیت فلز جوش برحسب حرارت ورودی برای چهار نمونه جوش ۶۶
شکل ۴-۱۹: پروفیل سختی مقطع جوش غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L به فولاد سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ ..... ۶۷
شکل ۴-۲۰: روند تغییرات پتانسیل مدار باز برحسب زمان برای نمونه‌های مختلف زنگ‌نزن ۶۸
شکل ۴-۲۱: منحنی پولاریزاسیون پتانسیودینامیک فلزات پایه ۷۰
شکل ۴-۲۲: منحنی پولاریزاسیون پتانسیودینامیک فلزات جوش ۰۲ و ۰۳ ..... ۷۳
شکل ۴-۲۳: منحنی پولاریزاسیون پتانسیودینامیک فلز جوش ۰۲ و فلزات پایه ۷۴
شکل ۴-۲۴: منحنی پولاریزاسیون سیکلی فلزات پایه ۷۵
شکل ۴-۲۵: منحنی پولاریزاسیون سیکلی فلزات جوش ۰۲ و ۰۳ ..... ۷۶
شکل ۴-۲۶: نحوه تخمین جریان و پتانسیل در حالت کوپل شده ۷۷
شکل ۴-۲۷: تخمین جریان گالوانیکی ایجاد شده بین فلز جوش ۰۲ و فلزات پایه ۷۷
شکل ۴-۲۸: تغییرات درصد آستنیت فولاد سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ بر حسب دمای آنیل ۸۱
شکل ۴-۲۹: درصد آستنیت فلز جوش نمونه شماره ۵ جوشکاری شده به روش پالسی پس از عملیات حرارتی ۸۱
شکل ۴-۳۰: ریزساختار فلز جوش نمونه ۰۲ پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۱۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت ۸۲
شکل ۴-۳۱: ریزساختار مرز ذوب فلز پایه/ فلز جوش ۳۲۷۵۰ پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۱۲۵ درجه سانتی‌گراد ۸۲
شکل ۴-۳۲: منحنی پولاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ در دو حالت ۸۳
شکل ۴-۳۳: منحنی پولاریزاسیون پتانسیودینامیک فلز جوش ۰۲ در حالت ۸۴

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول۲-۱: فهرستی از متداول‌ترین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به همراه ترکیب شیمیایی آن‌ها.....۷

جدول۲-۲: فهرستی از رسوبات در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی.....۹

جدول۲-۳: خواص مکانیکی و فیزیکی دو فولاد ۳۱۶ و ۳۱۶L.....۱۰

جدول۲-۴: ترکیب شیمیایی گروهی از فولادهای زنگ‌نزن دوفازی.....۱۱

جدول۲-۵: فازهای مشاهده شده در فولادهای زنگ‌نزن دوفازی.....۱۶

جدول۲-۶: انواع انجماد، واکنش‌ها و ریزساختارهای حاصل در فولادهای زنگ‌نزن.....۱۷

جدول۳-۱: ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلز پرکننده مورد استفاده در تحقیق (درصد وزنی).....۴۰

جدول۳-۲: مشخصات ابعادی طرح اتصال.....۴۱

جدول۳-۳: پارامترهای جوشکاری با جریان ثابت.....۴۲

جدول۳-۴: آرایه L9 در روش تاگوچی.....۴۴

جدول۳-۵: چهار پارامتر در روش پالسی و سطوح مختلف هر کدام از پارامترها.....۴۴

جدول۳-۶: اطلاعات مربوط به ۹ نمونه جوشکاری شده به روش پالسی.....۴۵

جدول ۴-۱: تغییرات درصد آستنیت فلز جوش در نمونه‌های جوشکاری شده در چهار حرارت ورودی مختلف.....۵۴

جدول۴-۲: مقادیر محاسبه شده کرم و نیکل معادل برای فلزات پایه و فلز پرکننده.....۵۷

جدول۴-۳: اطلاعات مربوط به ۹ نمونه جوشکاری شده به روش پالسی و درصد آستنیت ریزساختار فلز جوش هر نمونه.....۶۴

جدول۴-۴: سختی فلزات پایه و نمونه‌های جوش.....۶۵

جدول۴-۵: مقادیر پتانسیل مدار باز برای فلزات پایه و نمونه‌های جوش.....۶۸

جدول۴-۶: مقادیر پتانسیل خوردگی، جریان خوردگی و پتانسیل حفره‌دار شدن برای نمونه‌های مختلف.....۷۱

جدول۴-۷: داده‌های استخراج شده از نمودارهای مختلف جهت تخمین امکان رخداد خوردگی گالوانیکی.....۷۸

چکیده

در این تحقیق، به بررسی ریزساختار و رفتار خوردگی مقاطع جوش غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی UNS S۳۲۷۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۱۶L پرداخته شد. برای جوشکاری از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن- گاز با قطبیت منفی و فلز پرکننده AWS ER۲۵۹۴ استفاده شد. با توجه به اهمیت حرارت ورودی در تغییر ریزساختارهای آستنیتی- فریتی، جوشکاری در چندین حرارت ورودی مختلف انجام و تاثیر حرارت ورودی بر تغییرات ریزساختار و مقاومت خوردگی منطقه جوش بررسی گردید. همچنین تاثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری در دمای ۱۱۲۵ درجه سانتی‌گراد بر ریزساختار و رفتار خوردگی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت. برای ارزیابی مقاومت به خوردگی، از آزمون‌های پولاریزاسیون پتانسیودینامیک و پولاریزاسیون سیکلی در محیط ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم و در دمای محیط استفاده شد. نتایج نشان داد که افزایش حرارت ورودی از حدود ۶۶۰ تا ۸۲۵ ژول بر میلی‌متر، موجب افزایش درصد آستنیت فلز جوش حاصل، از ۶۰/۷۹ تا ۷۴/۴۷ درصد می‌شود. در اثر سیکل‌های حرارتی ناشی از جوشکاری، منطقه متاثر از حرارتی به عرض ۲۰۰ میکرومتر و با مقدار آستنیت در حدود ۳۰ درصد در فلز پایه زنگ‌نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ ایجاد شد. همچنین مقداری فریت دلتا در منطقه متاثر از حرارت فلز پایه آستنیتی ۳۱۶L تشکیل می‌شود. نتایج حاصل از آزمون‌های الکتروشیمیایی نشان داد که فلز پایه سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ در مقایسه با فلز پایه آستنیتی ۳۱۶L مقاومت به خوردگی بسیار بهتری دارد. این مقاومت به خوردگی بهتر با افزایش پتانسیل خوردگی، کاهش جریان خوردگی و چند برابر شدن پتانسیل حفره‌دار شدن خود را نشان داد و می‌توان آن را به مقدار بالای عناصر کروم و مولیبدن فلز پایه سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ نسبت داد. بررسی رفتار خوردگی فلزات جوش نشان داد که تغییر درصد آستنیت ناشی از تغییر حرارت ورودی در محدوده مورد بررسی، موجب کاهش مقاومت به خوردگی عمومی می‌شود، اما مقاومت به خوردگی حفره‌ای را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. به‌طورکلی، فلزات جوش و فلز پایه سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ پتانسیل حفره‌دار شدن یکسان و در حدود ۱۰۰۰ میلی‌ولت نشان دادند. بررسی‌های تئوری انجام شده با استفاده از معیارهای مختلف بیانگر وقوع خوردگی گالوانیکی محسوس بین فلز جوش و فلز پایه آستنیتی ۳۱۶L است. این مطلب با توجه به متفاوت بودن ریزساختارها قابل پیش‌بینی بود. عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دمای ۱۱۲۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۲ ساعت در مقاومت به خوردگی فلز پایه سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ تغییر مهمی ایجاد نکرد. اما عملیات حرارتی پس از جوشکاری در همین دما موجب بهبود نسبی مقاومت به خوردگی حفره‌ای منطقه جوش شد. بعد از عملیات حرارتی پس از جوشکاری، افزایش حدود ۲۵ میلی‌ولت در پتانسیل حفره‌دار شدن مشاهده شد. سرانجام قابل ذکر است با استفاده از فلز پرکننده AWS ER۲۵۹۴ و کنترل حرارت ورودی در حدود ۷۰۰ ژول بر میلی‌متر، می‌توان جوشی ایجاد کرد که مقاومت خوردگی بهتری نسبت به فلزات پایه داشته باشد. همچنین با توجه به آن که بهبود مقاومت خوردگی ناشی از عملیات حرارتی پس از جوشکاری چشمگیر نیست و با درنظر گرفتن مشکلات اجرا در مقیاس عملی، عملیات حرارتی پس از جوشکاری برای اتصال مذکور توصیه نمی‌شود.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، جوشکاری غیرمشابه، عملیات حرارتی، ریزساختار، رفتار خوردگی.

فصل اول

مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن از مهم‌ترین مواد رایج مهندسی هستند که به‌طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. در میان فولادهای زنگ‌نزن، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به دلیل مقاومت به خوردگی خوب، خواص مکانیکی کافی و جوش‌پذیری مناسب کاربرد زیادی پیدا کرده و بیشترین تناژ تولیدی را در میان فولادهای زنگ‌نزن به خود اختصاص داده‌اند [۳-۱]. در بین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، فولاد AISI ۳۱۶L یکی از موفق‌ترین انواع آستنیتی است. این فولاد به دلیل آن که مقدار کربن کمی دارد، در برابر حساس‌شدن که یکی از مشکلات مهم فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی است، مقاوم است. همچنین حضور ۲ تا ۳ درصد مولیبدن در ترکیب شیمیایی این فولاد، مقاومت آن را در برابر خوردگی حفره‌ای افزایش می‌دهد [۷-۴].

با وجود مقاومت به خوردگی خوب فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، در محیط‌های بسیار خورنده حاوی غلظت‌های بالای یون کلر این فولادها مقاوم نبوده و در برابر خوردگی حفره‌ای و ترک خوردن خوردگی تنشی آسیب‌پذیر هستند. در این موارد، فولادهای زنگ‌نزن دوفازی جایگزین بسیار مناسبی برای فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی هستند. فولادهای زنگ‌نزن دوفازی دارای ریزساختار فریتی-آستنیتی بوده که این ریزساختار خواص جالب توجهی را به دنبال دارد. از جمله این خواص می‌توان به استحکام بالا و مقاومت به خوردگی عالی به ویژه مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای و ترک خوردن خوردگی تنشی اشاره کرد [۲، ۸ و ۹].

در میان فولادهای زنگ‌نزن دوفازی، فولادهای زنگ‌نزن سوپردوفازی با دارا بودن مقادیر بالایی از عناصر آلیاژی کروم، مولیبدن و نیتروژن در مقایسه با فولادهای زنگ‌نزن دوفازی معمول، دارای استحکام بالاتر و مقاومت به خوردگی عالی‌تر هستند. این خصوصیات سبب شده که فولادهای زنگ‌نزن سوپردوفازی به عنوان نسل جدیدی از

فولادهای زنگ‌نزن مطرح شده و کاربرد فراوانی در صنعت پیدا کنند که این کاربرد روز به روز در حال گسترش است [۱۲-۸]. یکی از گریدهای متداول فولادهای زنگ‌نزن سوپردوفازی، فولاد UNS S۳۲۷۵۰ (SAF۲۵۰۷) می‌باشد. این فولاد با دارا بودن خواص قابل توجهی که برای فولادهای زنگ‌نزن سوپردوفازی برشمرده شد، کاربرد گسترده‌ای در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی پیدا کرده است.

با توجه به اهمیت فولادهای زنگ‌نزن در صنعت، روش‌های ساخت و مونتاژ قطعات فولادی زنگ‌نزن نیز مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. در این میان، جوشکاری یکی از مهمترین روش‌های ساخت قطعات و سازه‌های زنگ‌نزن است. با توجه به کاربرد گسترده فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و جایگزین مناسب آن‌ها یعنی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی در صنایع مختلف، طی چند دهه اخیر تحقیقات زیادی در مورد جوشکاری این دو گروه از فولادها انجام شده است.

با عنایت به آن که هر کدام از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L و سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ در گروه خود جزء موفق‌ترین گریدها هستند، کاربرد زیادی داشته و به همین دلیل جوشکاری موفقیت‌آمیز این دو فولاد از اهمیت بالایی برخوردار است و بنابراین بسیاری از محققین به بررسی جوانب مختلف جوشکاری این دو فولاد مشهور و همچنین جوشکاری غیرمشابه آن‌ها با انواع دیگر پرداخته‌اند. گروهی از محققین، تحقیقات خود را بر روی جوشکاری فولاد سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ متمرکز ساخته‌اند. برای مثال، فاگر[1] و همکارش، به بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و خواص خوردگی مقاطع جوش ایجاد شده با روش‌های مختلف جوشکاری ذوبی پرداخته‌اند [۱۳]. ساتو[2] و همکارانش ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[3] فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ را بررسی کرده‌اند [۱۴]. این محققین گزارش کرده‌اند درصد آستنیت منطقه جوش بین ۵۰ تا ۶۰ درصد بوده است و تبلور مجدد دینامیکی سبب ریزدانه شدن منطقه اغتشاش شده است. ریز شدن دانه‌ها افزایش سختی و استحکام را به‌همراه داشته است. اخیراً تاوارس[4] و همکارانش در برزیل جوشکاری چند پاسه فولاد سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۱۵]. براساس نتایج این تحقیق، پاس ریشه چقرمگی بیشتری نسبت به پاس پرکننده نشان داده است، اما مقاومت به خوردگی آن کمتر بوده است. این محققین دلیل این مقاومت به خوردگی کم را تشکیل فازهای ثانویه گزارش کرده‌اند. همچنین مقالاتی نیز در مورد جوشکاری پرتو الکترونی[5] [۱۶] و جوشکاری پلاسمای[6] این فولاد به چاپ رسیده است [۱۷].

از سوی دیگر، موضوع تحقیق عده‌ای دیگر از محققان جوشکاری فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L بوده است. پیاتی[7] و همکارش مقاطع ضخیم فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ را با استفاده از فلز پرکننده ۳۱۶L و به روش زیر پودری[8] جوشکاری کرده و ترکیب شیمیایی و ریزساختار فلز جوش را بررسی کرده‌اند [۱۸]. بررسی تاثیر ریزساختار بر خواص مکانیکی

1- Fager
2- Sato
3- Friction Stir Welding
4- Tavares
5- Electron Beam Welding
6- Plasma Arc Welding
7- Piatti
8- Submerged Arc Welding

جوش و همچنین بررسی تاثیر جوشکاری بر مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L نیز از جمله تحقیقات دیگر انجام گرفته است [۱۹ و ۲۰].

در مورد جوشکاری غیرمشابه این دو فولاد زنگ‌نزن به انواع دیگر نیز مقالات متعددی به چاپ رسیده است. برای مثال، آدگارد[1] و همکارانش فلزات پرکننده مناسب برای اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ به فولادهای کربنی و فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و دوفازی پرآلیاژ را معرفی کرده‌اند [۲۱]. سیرشا[2] و همکارانش نیز اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶LN به آلیاژ ۸۰۰ را بررسی کرده‌اند. این محققین با استفاده از آزمون‌های جوش‌پذیری و همچنین بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی از بین سه فلز پرکننده متفاوت، مناسب‌ترین فلز پرکننده را برای اتصال غیرمشابه این دو آلیاژ پیشنهاد کرده‌اند [۲۲ و۲۳]. در سال ۲۰۰۷ نیز لابانوسکی[3] به بررسی خواص مکانیکی و حساسیت به ترک خوردن خوردگی تنشی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L به فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ پرداخته است. این محقق گزارش کرده است در این اتصال غیرمشابه ضعیف‌ترین مکان در ارتباط با ترک خوردن خوردگی تنشی، منطقه متاثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی است [۲۴].

همان‌طور که اشاره شد با توجه به اهمیت هر کدام از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L و سوپردوفازی ۳۲۷۵۰، در مورد جنبه‌های مختلف جوشکاری این دو فولاد مقالات متعددی به چاپ رسیده که در بالا تنها تعدادی از آن‌ها ذکر شد. اما، علی‌رغم کاربرد زیاد اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L به ویژه در مبدل‌های حرارتی[4] در اتصال لوله به صفحه نگهدارنده لوله[5] و در سکوهای دریایی استخراج نفت و گاز[6]، تاکنون تحقیقات مدونی در مورد این اتصال غیرمشابه انجام نشده است. بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر جوشکاری غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن سوپردوفازی ۳۲۷۵۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L و ارزیابی ریزساختار و رفتار خوردگی مقاطع جوش این اتصال غیرمشابه است.

1- Odegard
2- Sireesha
3- Labanowski
4- Heat Exchangers
5- Tube-to-TubeSheet
6- Offshores

فصل دوم

مطالعات مروری

۲-۱ فولادهای زنگ‌نزن

۲-۱-۱ معرفی فولادهای زنگ‌نزن

بدون شک فولادهای زنگ‌نزن یکی از گروه‌های مهم آلیاژهای مهندسی هستند. اهمیت آن‌ها از کاربردهای متنوع و گسترده آن‌ها مشخص می‌گردد. از وسایل آشپزخانه گرفته تا سفینه‌های فضایی و در قسمت‌های مختلف صنایع می‌توان کاربرد فولادهای زنگ‌نزن را مشاهده کرد [۱].

کلمه "فولاد" بدین معنی است که آهن جزء اصلی سازنده آلیاژ است، در حالی که صفت "زنگ‌نزن" به عدم زنگ‌زدگی و خورده‌شدگی در محیط‌هایی که فولادهای معمول حساس هستند اشاره دارد. به‌منظور آن که یک فولاد "زنگ‌نزن" به حساب آید باید دارای یک حداقل میزان کروم باشد [۱]، این حداقل در مراجع مختلف بین ۱۰/۵ تا ۱۲ درصد وزنی بیان شده است [۳-۱]. این میزان از کروم موجب تشکیل یک لایه اکسیدی غیر فعال بر روی سطح شده که تماس فلز زیرلایه را با محیط پیرامون قطع کرده و از خورده شدن آن جلوگیری می‌کند. باید اشاره داشت که بسیاری از فولادهای حاوی ۱۲ درصد وزنی کروم و حتی بیشتر باز در محیط‌های خورنده دچار خوردگی می‌شوند. دلیل این امر را می‌توان رسوب کاربیدها یا ترکیبات دیگر دانست که با کاهش مقدار کروم محلول در زمینه، از تشکیل یک پوسته اکسیدی مستحکم و مقاوم جلوگیری می‌کنند. علاوه بر این، حتی با وجود تشکیل پوسته اکسیدی، محیط‌های خورنده می‌توانند با حمله به پوسته اکسیدی، آن را از بین برده و موجبات خوردگی فولادهای زنگ‌نزن را فراهم آورند.

نوع خوردگی و شدت آن وابسته به نوع محیط خورنده، خواص متالورژیکی ماده و مواردی دیگر همچون شدت تنش‌های موضعی است. با توجه به آن که در اکثر مواقع فولادهای زنگ‌نزن به دلیل مقاومت به خوردگی انتخاب می‌گردند، مهندسین طراح باید هنگام طراحی علاوه بر خواص ماده به مواردی همچون محیط استفاده و شرایط کاری نیز توجه کافی داشته باشند [۲].

۲-۱-۲ انواع فولادهای زنگ‌نزن

برخلاف اغلب مواد که دسته‌بندی آن‌ها براساس ترکیب شیمیایی صورت می‌گیرد، دسته‌بندی فولادهای زنگ‌نزن براساس ریزساختار و فازهای تشکیل‌دهنده آن‌ها است [۲]. سه نوع اصلی ریزساختار در فولادهای زنگ‌نزن وجود دارد: فریتی، آستنیتی و مارتنزیتی. این ریزساختارها براساس تنظیم مناسب ترکیب شیمیایی حاصل می‌گردند. براساس این ریزساختارهای اصلی، فولادهای زنگ‌نزن به گروه‌های زیر دسته‌بندی می‌شوند [۳-۱]:

- فولادهای زنگ‌نزن فریتی (4XX)
- فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی (4XX)
- فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی (3XX و 2XX)
- فولادهای زنگ‌نزن دوفازی (آستنیتی/ فریتی)
- فولادهای زنگ‌نزن رسوب سخت‌شونده (PH)

همچنین در بعضی موارد فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی Mn-N به صورت یک گروه مجزا در نظر گرفته می‌شوند [۱]. انجمن آهن و فولاد آمریکا[1] به‌منظور نامگذاری فولادهای زنگ‌نزن از یک سیستم سه شماره‌ای که گاهی با یک یا دو حرف نیز همراه است استفاده می‌کند، برای مثال ۳۰۴، ۳۱۶L، ۴۳۰. عباراتی که در دسته‌بندی فوق در پرانتز ذکر شده نشان‌دهنده گروه مربوطه براساس این استاندارد است [۲].

گروه‌های مختلف فولادهای زنگ‌نزن دارای خواص متفاوتی هستند. برای مثال، آستنیتی‌ها غیرمغناطیسی هستند، در حالی که انواع فریتی و مارتنزیتی فرومغناطیس هستند. خواص فیزیکی همانند هدایت حرارتی و انبساط حرارتی و همچنین خواص مکانیکی و رفتار خوردگی دارای تغییرات گسترده‌ای برای انواع مختلف این فولادها هستند و همین گستره وسیع خواص این دسته از آلیاژها را جذاب کرده و دلیل کاربردهای متنوع آن‌ها است [۱ و۲].

۲-۲ فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی

۲-۲-۱ مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، آلیاژهایی پایه آهنی و دارای ریزساختاری آستنیتی هستند که این ریزساختار آستنیتی به وسیله مقادیر بالای عناصر آستنیت‌زا نظیر نیکل حاصل می‌گردد [۴]. این گروه از فولادهای زنگ‌نزن به دلیل مقاومت

1- American Iron and Steel Institute (AISI)

عالی به خوردگی، خواص مکانیکی مناسب و جوش‌پذیری خوب کاربرد گسترده‌ای در گستره وسیعی از صنایع مختلف پیدا کرده‌اند و بر همین اساس بیشترین تناژ تولیدی را در بین فولادهای زنگ‌نزن به خود اختصاص داده‌اند. در حالت کلی، این فولادها دارای ۱۶ تا ۲۵ درصد وزنی کروم، ۸ تا ۲۰ درصد نیکل، ۱ تا ۲ درصد منگنز، ۰/۵ تا ۳ درصد سیلیسیم، ۰/۰۲ تا ۰/۰۸ درصد کربن بوده و عناصری نظیر مولیبدن، نیتروژن، تیتانیم و نیوبیم برای بهبود خواص به برخی گریدها افزوده می‌شود [۲].

اگرچه انواع مختلفی از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی موجود است اما آلیاژهای سری ۳۰۰ متداول‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها هستند. بیشتر این فولادها بر پایه سیستم ۱۸Cr–۸Ni و با افزودن عناصر آلیاژی اضافی و اصلاح‌کننده شکل گرفته‌اند. در جدول۲–۱ فهرستی از پرکاربردترین انواع زنگ‌نزن آستنیتی به همراه ترکیب شیمیایی آن‌ها ارائه شده است.

جدول۲–۱: فهرستی از متداول‌ترین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به همراه ترکیب شیمیایی آن‌ها [۳].

	Composition (wt %)*									
Type	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Other
201	0.15	5.5-7.5	0.06	0.03	1.0	16.0-18.0	3.5-5.5	-	0.25	-
302	0.15	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	8.0-10.0	-	-	-
304	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-10.5	-	-	-
304L	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-12.0	-	-	-
304H	0.04-0.1	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-10.5	-	-	-
308	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	19.0-21.0	10.0-12.0	-	-	-
309	0.20	2.0	0.045	0.03	1.0	22.0-24.0	12.0-15.0	-	-	-
310	0.25	2.0	0.045	0.03	1.0	24.0-26.0	19.0-22.0	-	-	-
316	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
316L	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
317	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	11.0-15.0	3.0-4.0	-	-
321	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	9.0-12.0	-	-	Ti:5xC-0.70
330	0.10	2.0	0.045	0.03	0.75-1.5	17.0-20.0	34.0-37.0	-	-	-
347	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	9.0-13.0	-	-	Nb:10xC-1.00

* A single value is a maximum

۲–۲–۲ متالورژی فیزیکی

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به گونه‌ای تولید می‌شوند که در حالت کلی ریزساختار آستنیتی حاصل گردد. بسته به نسبت عناصر آستنیت‌زا و فریت‌زا، ریزساختار نهایی می‌تواند کاملاً آستنیتی و یا مخلوطی از آستنیت و فریت باشد.

رفتار استحاله‌ای فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی را می‌توان با نمودارهای شبه دوتایی Fe-Cr-Ni و در مقدار ثابت آهن برابر با ۷۰ یا ۶۰ درصد تشریح کرد. در شکل۲–۱ دو مقطع از نمودار سه‌تایی Fe-Cr-Ni نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فاز اولیه انجماد فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی می‌تواند به صورت آستنیت یا فریت باشد. در سیستم سه‌تایی مرز بین این دو ناحیه فاز اولیه انجماد در حدود ۱۸Cr–۱۲Ni قرار می‌گیرد. با توجه به شکل۲–۱ آلیاژهایی که غنی از نیکل هستند به صورت آستنیتی منجمد می‌شوند. در گستره ترکیب شیمیایی متوسط، در ابتدا آلیاژ به صورت فریتی منجمد شده اما قبل از مراحل پایانی انجماد به وسیله یک واکنش پریتکتیک به فریت و آستنیت استحاله می‌یابد. در مقادیر نیکل کم هم آلیاژ به صورت فریتی منجمد می‌شود [۵].