



۹۳۱۷۰۰۵

## دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد

گرایش جوشکاری

عنوان:

بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند GTAW بر توزیع درجه حرارت در ناحیه HAZ و خواص

اتصال در جوش‌های غیرمشابه دو آلیاژ API X80/DSS 2205

اساتید راهنما:

دکتر رضا دهملابی

دکتر سید رضا علوی زارع

نگارنده:

امیرحسین فدائی

اسفند ماه ۹۳

باسمه تعالی  
دانشگاه شهید چمران اهواز  
دانشکده مهندسی

نتیجه ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد

پایان نامه آقای امیرحسین فدائی دانشجوی رشته مهندسی مواد گرایش جوشکاری

دانشکده مهندسی به شماره دانشجویی ۹۲۱۷۰۰۲

با عنوان:

بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند GTAW بر توزیع درجه حرارت در ناحیه HAZ و خواص

اتصال در جوش‌های غیرمشابه دو آلیاژ API X80/DSS 2205

جهت اخذ مدرک: کارشناسی ارشد در تاریخ ۱۳۹۳/۱۲/۱۸ توسط هیأت داوران مورد

ارزشیابی قرار گرفت و با درجه عالی تصویب گردید.

امضاء	رتبه علمی	اعضای هیأت داوران:
.....	استادیار	استاد راهنما دکتر رضا دهملایی
.....	استادیار	استاد راهنما دکتر سید رضا علوی زارع
.....	استاد	استاد داور: دکتر خلیل رنجبر
.....	استادیار	استاد داور: دکتر سید محسن صدرالسادات
.....	استادیار	نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر سید علیرضا سیدرکنی‌زاده
.....	استادیار	مدیرگروه دکتر خلیل ا... قیصری
.....	استادیار	معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر علی حقیقی
.....	استاد	مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه: دکتر عبدالرحمن راسخ

## تقدیم به:

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان  
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این  
سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است  
به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و  
ترس در پناهشان به شجاعت می گراید  
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند  
این مجموعه را به **پدر و مادر عزیزم** تقدیم می کنم.

## تشکر و قدردانی:

خداوند بزرگ را شاکرم که لطف خود را شامل حال من نمود تا پایان نامه خود را به سرانجام رسانده و ان شاء الله بتوانم سهمی هر چند اندک، در راه توسعه علمی ایران عزیز بردارم که چو ایران نباشد، تن من مباد.

همچنین از زحمات جناب آقای دکتر رضا دهملائی و جناب آقای دکتر سید رضا علوی زارع اساتید موقر راهنما، جناب آقایان دکتر غلیل رنجبر و دکتر سید محسن صدرالسادات اساتید موقر داور کمال تشکر دارم که "من لم یشکر المفلوق لم یشکر الفالق".

از زحمات خانواده غویم، دوستان عزیزم خصوصاً آقای مهندس سید میثم زهرایی، مسئولین زحمت کش آزمایشگاه و سایر کسانی که در پژوهش و تدوین این پایان نامه مرا یاری نمودند متشکرم و از خداوند منان سلامت و سعادت ایشان را خواستارم.

و در پایان بر خود لازم میدانم عرایض ام را با دعایی از اسطوره زندگی ام، انسانی وارسته، دانشمند، مجاهد و حق طلب شهید دکتر مصطفی چمران خاتمه دهم:

خدایا از تو می خواهم که طبع ما را آنقدر بلند کنی که در برابر هیچ چیز جز خدا تسلیم نشویم. دنیا ما را نفریبد، خودخواهی ما را کور نکند. سیاهی گناه و فساد و تهمت و دروغ و غیبت، قلب های ما را تیره و تار ننماید. خدایا! به ما آنقدر ظرفیت ده که در برابر پیروزی ها سرمست و مغرور نشویم. خدایا به من آنقدر توان ده که کوچکی و بیپارگی خویش را فراموش نکنم و در برابر عظمت تو خود را نبینم.

## فهرست مطالب

فصل ۱. مقدمه	۱
فصل ۲. مروری بر پژوهش‌های پیشین	۴
۱-۲. فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا	۴
۱-۱-۲. توسعه فولادهای کم آلیاژی	۸
۲-۱-۲. فاکتورهای متالورژیکی	۹
۳-۱-۲. تغییرات ریزساختاری حین جوشکاری فولاد کم آلیاژ استحکام بالا	۱۱
۴-۱-۲. تغییرات ریزساختاری ناحیه متأثر از حرارت	۱۲
۵-۱-۲. نرم شدن HAZ	۱۴
۲-۲. فولادهای زنگ نزن	۱۵
۱-۲-۲. فولادهای زنگ نزن دوفازی	۱۶
۲-۲-۲. رفتار انجمادی فولادهای دوفازی	۱۹
۳-۲-۲. تعادل فازی فریت-آستنیت	۲۰
۴-۲-۲. کنترل توازن فریت-آستنیت	۲۱
۵-۲-۲. واکنش‌های رسوب‌گذاری	۲۲
۶-۲-۲. آستنیت ثانویه	۲۵
۷-۲-۲. بررسی نقش حرارت ورودی و نرخ سرد شدن	۳۰
۸-۲-۲. مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن دوفازی	۳۵
۱-۸-۲-۲. ترک خوردن خوردگی تنشی	۳۵
۲-۸-۲-۲. خوردگی حفره ای	۳۶
۳-۲. جوشکاری الکترو تنگستنی با گاز محافظ	۳۹
۴-۲. حرارت ورودی	۴۰
۱-۴-۲. فرمول محاسبه حرارت ورودی	۴۱
۵-۲. توزیع درجه حرارت در حین جوشکاری	۴۲
۱-۵-۲. ماهیت سیکل‌های گرم و سرد شدن	۴۳
۲-۵-۲. عوامل موثر بر سیکل گرم و سرد شدن	۴۴
۳-۵-۲. تاثیر سیکل حرارتی بر ناحیه متأثر از حرارت	۴۶
فصل ۳. روش تحقیق	۴۸
۱-۳. مواد مصرفی	۴۸
۲-۳. آماده‌سازی نمونه‌ها و طرح اتصال	۴۹
۳-۳. جوشکاری نمونه‌ها	۵۱
۱-۳-۳. ثبت سیکل‌های حرارتی	۵۳
۴-۳. متالوگرافی	۵۵
۵-۳. ارزیابی خواص مکانیکی	۵۷
۱-۵-۳. آزمون ضربه	۵۷

۵۸.....	۳-۵-۲. آزمون سختی .....
۵۸.....	۳-۵-۳. آزمون ریزسختی.....
۵۹.....	۳-۶. بررسی رفتار خوردگی .....
۵۹.....	۳-۶-۱. آماده سازی نمونه برای تست خوردگی.....
۵۹.....	۳-۶-۲. آزمون پلاریزاسیون سیکلی.....
۶۰.....	<b>فصل ۴. نتایج و بحث .....</b>
۶۰.....	۴-۱. بررسی ریزساختاری .....
۶۰.....	۴-۱-۱. ریزساختار فلزات پایه .....
۶۳.....	۴-۱-۲. ریزساختار فلز جوش ER2209.....
۶۸.....	۴-۱-۲-۱. تاثیر حرارت ورودی.....
۷۲.....	۴-۱-۳. ناحیه متأثر از حرارت .....
۷۲.....	۴-۱-۳-۱. ناحیه متأثر از حرارت فولاد ۲۲۰۵ .....
۸۱.....	۴-۱-۳-۲. ناحیه متأثر از حرارت فولاد X80.....
۹۱.....	۴-۲. بررسی فصل مشترک فلز جوش ER2209 و فلزات پایه .....
۹۵.....	۴-۲-۱. تاثیر حرارت ورودی .....
۹۹.....	۴-۳. بررسی خواص مکانیکی .....
۹۹.....	۴-۳-۱. آزمون ضربه .....
۱۰۱.....	۴-۳-۲. آزمون سختی سنجی .....
۱۰۲.....	۴-۳-۳. آزمون ریزسختی سنجی.....
۱۰۴.....	۴-۴. بررسی رفتار خوردگی .....
۱۰۴.....	۴-۴-۱. مقدمه .....
۱۰۴.....	۴-۴-۲. پتانسیل آزاد خوردگی .....
۱۰۶.....	۴-۴-۳. آزمون پلاریزاسیون چرخه ای ( سیکلی ) .....
۱۰۶.....	۴-۴-۱. بررسی رفتار خوردگی فلزات پایه .....
۱۰۹۹.....	۴-۴-۲. بررسی رفتار خوردگی فلز جوش .....
۱۱۱.....	۴-۴-۳. بررسی رفتار خوردگی منطقه متأثر از حرارت.....
۱۱۵.....	<b>فصل ۵. نتیجه گیری و پیشنهادها .....</b>
۱۱۵.....	۵-۱. نتیجه گیری .....
۱۱۷.....	۵-۲. پیشنهادها .....
۱۱۸.....	<b>فهرست منابع.....</b>
۱۲۳.....	<b>چکیده انگلیسی.....</b>

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲. روند توسعه فولادهای کم آلیاژی با گذر زمان ..... ۸
- شکل ۲-۲. ارتباط بین استحکام تسلیم و اندازه دانه ..... ۱۰
- شکل ۳-۲. رابطه پایداری کاربید و نیتريد عناصر کم آلیاژی با دما ..... ۱۰
- شکل ۴-۲. نمایش شماتیک محدوده دمایی نواحی مختلف منطقه متأثر از حرارت ..... ۱۳
- شکل ۵-۲. ریزساختار میکروسکوپ نوری فولاد زنگ‌نزن دوفازی ..... ۱۸
- شکل ۶-۲. ناحیه دما بالا نمودار فازی شبه دوتایی برای ترکیبات فولاد زنگ‌نزن دوفازی ..... ۲۰
- شکل ۷-۲. الف) تشکیل آستنیت با دما ب) تغییرات نرخ جوانه زنی ..... ۲۲
- شکل ۸-۲. تشکیل فازهای ثانویه در فولادهای زنگ نزن دوفازی ..... ۲۴
- شکل ۹-۲. آستنیت ثانویه ناشی از رشد در خارج از آستنیت اولیه در آلیاژ ۲۲۰۵ ..... ۲۶
- شکل ۱۰-۲. مکانیزم رشد مشارکتی برای تشکیل آستنیت ثانویه ..... ۲۶
- شکل ۱۱-۲. ریزساختار ناحیه ذوب برای جوشکاری در شرایط مختلف ..... ۲۸
- شکل ۱۲-۲. نمایش شماتیک رابطه بین نرخ سرد کردن و دیاگرام سینیتیک استحاله فاز ..... ۲۹
- شکل ۱۳-۲. منحنی سیکل دمایی در شرایط مختلف جوشکاری ..... ۳۰
- شکل ۱۴-۲. تأثیر حرارت ورودی بر فریت محتوی HAZ فولاد زنگ نزن دوفازی ..... ۳۳
- شکل ۱۵-۲. نمودار پیش بینی ۸ - ۱۲ $\Delta$  برای فولادهای زنگ نزن دوفازی ..... ۳۴
- شکل ۱۶-۲. مقاومت به ترک خوردن خوردگی تنشی فولادهای زنگ نزن دوفازی ..... ۳۶
- شکل ۱۷-۲. تأثیر حرارت ورودی بر نرخ خوردگی قطعات جوشکاری شده آلیاژ ۲۲۰۵ در کلرید فریک ..... ۳۷
- شکل ۱۸-۲. تأثیر تعادل آستنیت- فریت بر مقاومت به حفره‌دارشدن ..... ۳۸
- شکل ۱۹-۲. نمایی از فرآیند جوشکاری قوسی با الکتروود تنگستنی و گاز محافظ ..... ۴۰
- شکل ۲۰-۲. منحنی سرد شدن چند نقطه در مجاورت جوش ..... ۴۳
- شکل ۲۱-۲. تأثیر خواص حرارتی مواد بر خطوط هم‌دما ..... ۴۵
- شکل ۲۲-۲. رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت ..... ۴۷
- شکل ۱-۳. شماتیک اتصال مورد استفاده برای جوشکاری ..... ۴۹
- شکل ۲-۳. تصویر نمونه‌ی آماده سازی شده قبل از جوشکاری ..... ۵۰
- شکل ۳-۳. شماتیک محل قرارگیری سوراخ‌ها ..... ۵۱
- شکل ۴-۳. نمونه‌ی نهایی سوراخ کاری شده ..... ۵۱
- شکل ۵-۳. تصویر نمونه جوشکاری شده ..... ۵۲



- شکل ۳-۶. تصویر از دستگاه‌های ثبت کننده دما..... ۵۴
- شکل ۳-۷. تصویر ترموکوپل‌های قرار گرفته درون سوراخ‌های تعبیه شده در پشت نمونه ها..... ۵۵
- شکل ۳-۸. نمونه‌های آماده سازی شده برای آزمون ضربه طبق استاندارد ASTM E23..... ۵۷
- شکل ۳-۹. سطح اثر آزمون سختی سنجی ویکرز..... ۵۸
- شکل ۴-۱. ریزساختار فولاد ۲۲۰۵..... ۶۱
- شکل ۴-۲. ریزساختار فولاد X80..... ۶۲
- شکل ۴-۳. دیاگرام شیفلر ۱۹۴۹ جهت پیش بینی ریزساختار فلز جوش..... ۶۵
- شکل ۴-۴. دیاگرام WRC-1992 اصلاح شده جهت پیش‌بینی ریزساختار فلز جوش..... ۶۵
- شکل ۴-۵. ریزساختار فلز جوش ۲۲۰۹ در نمونه ۱ (حرارت ورودی ۰/۶۸KJ/MM)..... ۶۷
- شکل ۴-۶. الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی فلز جوش ۲۲۰۹..... ۶۸
- شکل ۴-۷. تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلز جوش ۲۲۰۹ در حرارت ورودی‌های مختلف..... ۶۹
- شکل ۴-۸. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ریزساختار فلز جوش ۲۲۰۹ در حرارت ورودی‌های مختلف..... ۷۰
- شکل ۴-۹. نتایج حاصل از نرم‌افزار MIP برای تخمین درصد فریت فلز جوش ۲۲۰۹..... ۷۱
- شکل ۴-۱۰. ریزساختار ناحیه متاثر از حرارت فولاد ۲۲۰۵..... ۷۵
- شکل ۴-۱۱. تصویر میکروسکوپ نوری ناحیه متاثر از حرارت فولاد ۲۲۰۵ در حرارت ورودی‌های مختلف (اتصال ۲۲۰۵/ER2209)..... ۷۶
- شکل ۴-۱۲. پیک دمایی ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها در فواصل مشخص برای نمونه ۱ (با حرارت ورودی ۰/۶۸KJ/MM) در فولاد ۲۲۰۵..... ۷۷
- شکل ۴-۱۳. پیک دمایی ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها در فواصل مشخص برای نمونه ۲ (در حرارت ورودی ۰/۸۴KJ/MM) در فولاد ۲۲۰۵..... ۷۸
- شکل ۴-۱۴. پیک دمایی ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها در فواصل مشخص برای نمونه ۳ (در حرارت ورودی ۱/۱۲KJ/MM) در فولاد ۲۲۰۵..... ۷۹
- شکل ۴-۱۵. تصویر میکروسکوپ نوری ریزساختار ناحیه متاثر از حرارت فولاد X80..... ۸۳
- شکل ۴-۱۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی ناحیه درشت دانه فولاد X80..... ۸۳
- شکل ۴-۱۷. تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ناحیه درشت دانه فولاد X80 در حرارت ورودی‌های مختلف..... ۸۵
- شکل ۴-۱۸. پیک دمایی ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها در فواصل مشخص برای نمونه ۱ (در حرارت ورودی ۰/۶۸ KJ/MM) در فولاد X80..... ۸۷
- شکل ۴-۱۹. پیک دمایی ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها در فواصل مشخص برای نمونه ۲ (در حرارت ورودی ۰/۸۴ KJ/MM) در فولاد X80..... ۸۸

- شکل ۴-۲۰. پیک دمایی ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها در فواصل مشخص برای نمونه ۳ (در حرارت ورودی ۱/۱۲ KJ/MM) در فولاد X80 ..... ۸۹
- شکل ۴-۲۱. فصل مشترک فلز جوش ۲۲۰۹ و فلز پایه ۲۲۰۵ در نمونه ۱ (با حرارت ورودی ۰/۶۸ KJ/MM) ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۲. رشد اپی تکسیال فلز جوش در نزدیکی خط ذوب ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۳. فصل مشترک فلز جوش ۲۲۰۹ و فولاد X80 در نمونه ۱ (با حرارت ورودی ۰/۶۸ KJ/MM) ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۴. شکل‌گیری مرزهای نوع II ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۵. نتایج آنالیز خطی EDS در فصل مشترک فلز جوش ۲۲۰۹ و فولاد X80 برای نمونه ۱ (با حرارت ورودی ۰/۶۸ KJ/MM) ..... ۹۵
- شکل ۴-۲۶. فصل مشترک فلز جوش ۲۲۰۹ و فلز پایه ۲۲۰۵ در نمونه ۲ (با حرارت ورودی ۰/۸۴ KJ/MM) ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۷. فصل مشترک فلز جوش ۲۲۰۹ و فلز پایه ۲۲۰۵ در نمونه ۳ (با حرارت ورودی ۱/۱۲ KJ/MM) ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۸. فصل مشترک فلز جوش ۲۲۰۹ و فولاد X80 در نمونه ۲ (با حرارت ورودی ۰/۸۴ KJ/MM) ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۹. فصل مشترک فلز جوش ۲۲۰۹ و فولاد X80 در نمونه ۳ (با حرارت ورودی ۱/۱۲ KJ/MM) ..... ۹۷
- شکل ۴-۳۰. نتایج آنالیز خطی EDS در فصل مشترک فلز جوش ۲۲۰۹ و فولاد X80 برای نمونه ۲ (با حرارت ورودی ۰/۸۴ KJ/MM) ..... ۹۸
- شکل ۴-۳۱. نتایج آنالیز خطی EDS در فصل مشترک فلز جوش ۲۲۰۹ و فولاد X80 برای نمونه ۳ (با حرارت ورودی ۱/۱۲ KJ/MM) ..... ۹۹
- شکل ۴-۳۲. نتایج آزمون ضربه شاری برای نمونه‌های مختلف ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۳۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه‌ها تحت آزمون ضربه شاری ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۳۴. تغییرات سختی در عرض اتصال X80/2209/2205 در حرارت ورودی‌های مختلف ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۳۵. نمودار تغییرات پتانسیل آزاد خوردگی OCP بر حسب زمان ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳۶. منحنی‌های پلاریزاسیون سیکنی مربوط به فلزات پایه X80 و ۲۲۰۵ ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳۷. منحنی تاثیر حرارت ورودی بر رفتار خوردگی فلز جوش ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۳۸. منحنی تاثیر حرارت ورودی بر رفتار خوردگی ناحیه متأثر از حرارت X80 ..... ۱۱۲
- شکل ۴-۳۹. منحنی تاثیر حرارت ورودی بر رفتار خوردگی ناحیه متأثر از حرارت DSS2205 ..... ۱۱۴

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲. ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن دوفازی ..... ۱۷
- جدول ۲-۲. ساختار کریستالی و ترکیب شیمیایی فازهای ثانویه در فولاد زنگ نزن دوفازی ..... ۲۴
- جدول ۱-۳. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلز پرکننده ..... ۴۸
- جدول ۲-۳. پارامترهای جوشکاری ..... ۵۳
- جدول ۳-۳. محلول‌های حکاکی و روش کار ..... ۵۶
- جدول ۱-۴. فرمول محاسبه کرم معادل و نیکل معادل در دیاگرام‌های شیفلر ۱۹۴۹ و WRC-1992 ..... ۶۳
- جدول ۲-۴. کرم معادل و نیکل معادل فلزات پایه و پرکننده بر حسب شیفلر ۱۹۴۹ و WRC-1992 ..... ۶۳
- جدول ۳-۴. ریزساختار و حالت انجمادی پیش بینی شده طبق دیاگرام‌های شیفلر ۱۹۴۹ و WRC-1992 به همراه میزان فریت فلز جوش اندازه‌گیری شده توسط فریت‌اسکوپ (پاس آخر) ..... ۶۶
- جدول ۴-۴. نتایج حاصل از فریت اسکوپ (پاس آخر) برای فلز جوش ۲۲۰۹ در حرارت ورودی‌های مختلف ..... ۷۰
- جدول ۵-۴. زمان ماندگاری (ثانیه) فواصل مختلف از خط ذوب در دمای بالای ۵۷۰°C در فولاد ۲۲۰۵ در حرارت ورودی‌های مختلف ..... ۸۰
- جدول ۶-۴. ضخامت ناحیه متأثر از حرارت فولاد ۲۲۰۵ در حرارت ورودی‌های مختلف ..... ۸۱
- جدول ۷-۴. ضخامت ناحیه متأثر از حرارت فولاد X80 در حرارت ورودی‌های مختلف ..... ۹۰
- جدول ۸-۴. سختی فلزات پایه و فلز جوش ..... ۱۰۱
- جدول ۹-۴. سختی فلز جوش ۲۲۰۹ در حرارت ورودی‌های متفاوت ..... ۱۰۲
- جدول ۱۰-۴. پتانسیل آزاد خوردگی نمونه تست شده ..... ۱۰۵
- جدول ۱۱-۴. اطلاعات مربوط به رفتار خوردگی فلزات پایه X80 و ۲۲۰۵ ..... ۱۰۷
- جدول ۱۲-۴. تاثیر حرارت ورودی بر رفتار خوردگی فلزات جوش ..... ۱۱۰
- جدول ۱۳-۴. تاثیر حرارت ورودی بر رفتار خوردگی ناحیه متأثر از حرارت X80 ..... ۱۱۳
- جدول ۱۴-۴. تاثیر حرارت ورودی بر رفتار خوردگی ناحیه متأثر از حرارت DSS2205 ..... ۱۱۴
- جدول ۱-۵. ضخامت تخمین زده شده ناحیه متأثر از حرارت با استفاده از سیکل‌های حرارتی ..... ۱۱۶

نام خانوادگی: فدائی		نام: امیرحسین	شماره دانشجویی: ۹۲۱۷۰۰۲
عنوان پایان نامه: بررسی تاثیر پارامترهای فرآیند GTAW بر توزیع درجه حرارت در ناحیه HAZ و خواص اتصال در جوش‌های غیرمشابه دو آلیاژ API X80/DSS 2205			
اساتید راهنما: دکتر رضا دهملایی و دکتر سیدرضا علوی زارع			
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی مواد	گرایش: جوشکاری	
دانشگاه: شهید چمران اهواز	دانشکده: مهندسی	گروه: مواد	
تاریخ فارغ‌التحصیلی: ۹۳/۱۲/۱۸		تعداد صفحه: ۱۲۳	
کلیدواژه‌ها: اتصال غیرمشابه، جوشکاری تیگ، فولاد دوفازی، فولاد X80، سیکل حرارتی.			
<p><b>چکیده:</b></p> <p>جوشکاری غیرمشابه به دلیل منافع اقتصادی و همچنین استفاده کامل از عملکرد برجسته دو فلز مختلف مانند استحکام و مقاومت به خوردگی، به طور گسترده‌ای در صنایع نفت و گاز استفاده می‌شود. با توسعه بهره‌برداری از نفت و گاز در آب‌های عمیق، استفاده از فولادهای زنگ نزن دوفازی در خطوط انتقال بیشتر مورد توجه بوده، ولی با توجه به قیمت بالای این فولادها، در انتهای این خطوط از فولادهای کم‌آلیاژ نیز استفاده می‌شود. بنابراین جوشکاری آلیاژهای مذکور به یکدیگر و توجه به ریزساختارها و خواص حاصل از جوش اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش تأثیر حرارت ورودی فرآیند GTAW بر خواص اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۵ به فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالای API5L X80 مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی تأثیر حرارت ورودی بر خواص اتصال و گسترش ناحیه متأثر از حرارت جوشکاری در حرارت ورودی‌های ۰/۶۸ KJ/mm، ۰/۸۴ KJ/mm و ۱/۱۲ KJ/mm و با استفاده از فلز پرکننده ER2209 به همراه کاشت ترموکوپل‌هایی در نزدیکی درز اتصال با هدف ثبت سیکل‌های حرارتی انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی مجهز به EDS در نواحی مختلف اتصال صورت گرفت. همچنین جهت بررسی خواص مکانیکی جوش، آزمون‌های سختی سنجی و ضربه انجام شد. سطح شکست نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. میزان فریت فلز جوش توسط دستگاه فریت سنج اندازه‌گیری شد. جهت بررسی رفتار خوردگی از تست پلاریزاسیون سیکنی استفاده گردید. نتایج بررسی‌ها نشان داد افزایش حرارت ورودی موجب افزایش پیک دمایی ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها و گسترش ناحیه متأثر از حرارت می‌شود. از طرفی افزایش حرارت ورودی سبب افزایش میزان آستنیت فلز جوش، کاهش سختی و بهبود انرژی ضربه شد. نتایج تست پلاریزاسیون نشان داد توازن فریت و آستنیت تأثیر گذارترین عامل بر مقاومت خوردگی حفره‌ای فلز جوش دوفازی ۲۲۰۹ می‌باشد.</p>			

# فصل اول

## مقدمه

در سال‌های اخیر تولید و مصرف فولادها همواره رو به گسترش بوده است ولی با توسعه صنعت، نیاز به استفاده از فولادهایی با استحکام بالاتر و کیفیت بهتر مد نظر قرار گرفته است. صنایع نفت و گاز به دلیل نیاز بشر به مصرف انرژی بیشتر به عنوان موتور محرک برای توسعه صنعت به شمار می‌رود. با توجه به این مسئله نیاز به توسعه میادین جدید نفت و گاز و انتقال آن به بازارهای مصرف بیش از گذشته احساس می‌شود.

امروزه جوش‌پذیری و چقرمگی اهمیت زیادی در کاربرد فولادهای مختلف پیدا کرده است. تمایل به استفاده از فولادهایی با استحکام بالا در صنعت ساختمان و خطوط لوله، منجر به تولید فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا شده است. این فولادها کاربرد زیادی در ساخت پل‌ها، ساختمان، کشتی‌ها و زیردریایی، خطوط لوله، مخازن و بدنه اتومبیل پیدا کرده‌اند و به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، جوش‌پذیری خوب، چقرمگی مطلوب، مقاومت در برابر خوردگی اتمسفری و قیمت مناسب مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

فولادهای کم آلیاژ مورد استفاده در صنایع نفت و گاز مطابق استاندارد API و با سری X طبقه‌بندی می‌شوند. در گذشته از فولادهایی با درجه استحکام پایین با ریز ساختار فریتی پرلیتی استفاده می‌شد، ولی امروزه به دلیل کاهش ضخامت لوله و نیز کاهش هزینه‌های جوشکاری، تمایل به استفاده از فولادهایی با استحکام بالاتر مورد توجه قرار گرفته است. در فولادهای کم آلیاژی نوین زمینه فریتی پرلیتی با استفاده از فرآیند نورد کنترل شده و سرد کردن سریع به سمت زمینه فریت سوزنی، فریت دانه‌ای و بینیتی تغییر یافته که تأمین‌کننده استحکام بالا همراه با چقرمگی و

مقاومت در برابر شکست مطلوب است. فولاد کم آلیاژ X80 به عنوان یکی از فولادهای کم آلیاژ پر استحکام در تقسیم‌بندی استاندارد API به شمار می‌رود که امروزه استفاده از آن در پروژه‌های جدید خطوط انتقال لوله مورد توجه است. با این حال استفاده از این فولاد با توجه به مشکلات پیش رو در ایران تاکنون محقق نشده است.

فولادهای کم آلیاژ استحکام بالای API5L در ساخت لوله‌های خطوط انتقال نفت، گاز و پتروشیمی به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، انعطاف‌پذیری، استحکام و سختی مناسب کاربرد فراوانی دارند. شرایط مختلف محیطی مانند میزان اکسایش و خوردگی، شرایط دمایی گوناگون، میزان دبی جریان و نوع گاز یا مایعات در حال انتقال تاثیر مستقیم بر روی میزان خواص این مواد دارد. لذا در بعضی نقاط جهت دستیابی به برخی خواص و برآورده نمودن نیازهای کیفیتی منطبق با خواسته‌ها می‌بایست از برخی فلزات و آلیاژها جهت تأمین این خواسته استفاده نمود. استفاده از این آلیاژها در شرایط محیطی مختلف نظیر کنار دریاها، زیر خاک و عبور از بستر رودخانه‌ها و غیره، نیاز به اتصال غیرمشابه این فولادها به دیگر آلیاژها از جمله فولادهای زنگ نزن را ضروری می‌نماید.

جوشکاری فلز غیرمشابه به طور وسیعی جهت اتصال فولادهای زنگ نزن به مواد دیگر استفاده می‌شود. این روش اغلب در جایی به کار می‌رود که تغییر حالتی در خواص مکانیکی و یا کارایی در سرویس لازم باشد، از طرفی جوشکاری غیرمشابه به دلیل منافع اقتصادی و همچنین استفاده کامل از عملکرد برجسته دو فلز مختلف مانند استحکام و مقاومت به خوردگی، به طور گسترده‌ای در صنایع نفت و گاز استفاده می‌شود. با توسعه بهره‌برداری از نفت و گاز در آب‌های عمیق، فولادهای زنگ نزن دوفازی در خطوط انتقال بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند. اگرچه فولادهای کم آلیاژ برای ملاحظات اقتصادی در انتهای خطوط انتقال استفاده شده است؛ بنابراین جوشکاری غیرمشابه این اتصالات اجتناب‌ناپذیر است [۲۱].

فرآیند جوشکاری قوسی معمولی در صورت انتخاب پارامترهای مناسب جهت حفظ توازن فریت - آستنیت در فلز جوش، می‌تواند برای جوشکاری فولادهای دوفازی استفاده شود. مهم‌ترین مشکل جوش‌پذیری فولادهای دوفازی تغییر توازن فریت - آستنیت می‌باشد. اگر فریت بیشتر از آستنیت باشد، رسوب فازهای بین‌فلزی مانند سیگما باعث کاهش مقاومت خوردگی و چقرمگی

فولادهای دو فازی می شود؛ به عبارت دیگر تأثیر فرآیند جوشکاری بر فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا کمتر از فولادهای دو فازی می باشد. برای حداقل کردن این تأثیرات انتخاب دقیق مواد و متغیرهای جوشکاری مهم می باشد [۳].

جهت کنترل ریزساختار و خواص منطقه اتصال و دستیابی به یک اتصال مناسب بین دو آلیاژ غیرهمجنس، انتخاب فلز پرکننده مناسب، اهمیت زیادی دارد. با توجه به بروز مشکلات متالورژیکی در اتصال غیرمشابه فولاد زنگ نزن دوفازی به فولادهای کم آلیاژ، کنترل ریزساختار فلز جوش به ویژه در پاس ریشه مهم و تأثیرگذار می باشد. با توجه به مقاومت به خوردگی پایین فولاد کم آلیاژ استحکام بالا در محیطهای کلریدی اتصال غیرمشابه این آلیاژ با فولاد زنگ نزن دوفازی که از مقاومت به خوردگی مناسبی در محیطهای کلریدی برخوردار است، ضروری به نظر می رسد.

در این پژوهش اتصال بین فولاد زنگ نزن دو فازی ۲۲۰۵ به فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API 5L X80 با استفاده از فرآیند جوشکاری الکترو تنگستنی با گاز محافظ (GTAW) و با استفاده از فلز پرکننده زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۹ (AWS ER2209) انجام شد و به منظور بررسی تاثیر حرارت ورودی بر خواص اتصال و گسترش ناحیه متأثر از حرارت، جوشکاری در سه حرارت ورودی متفاوت به همراه ثبت سیکل های حرارتی انجام گردید.

## فصل دوم

### مروری بر پژوهش های پیشین

در این فصل فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا و فولادهای زنگ نزن، متالورژی جوشکاری آنها و به صورت مختصر روش جوشکاری الکتروود تنگستنی با گاز محافظ، بررسی شده است. در ادامه به بررسی اتصالات غیرمشابه فولادهای زنگ نزن به فولادهای کم آلیاژ و مشکلات آنها پرداخته و در نهایت رفتار خوردگی الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۱-۲. فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا

امروزه جوش پذیری و چقرمگی اهمیت زیادی در کاربرد فولادهای مختلف پیدا کرده است. تمایل به استفاده از فولادهای استحکام بالا در صنعت ساختمان و خطوط لوله، منجر به تولید فولادهای کم آلیاژی استحکام بالا شده است. فولادهای کم آلیاژی دسته مهمی از فولادها هستند که تقریباً ۱۲ درصد از کل تولید جهانی فولاد را در بر می گیرند و کاربرد وسیعی در صنایع انتقال نفت و گاز پیدا کرده اند. فولاد کم آلیاژ شامل مقادیر بسیار کمی وانادیم، نایوبیم و تیتانیم می باشد. این عناصر کم آلیاژی، علی رغم مقادیر کم، موجب بهبود چقرمگی و استحکام می شوند و این یکی از دلایل عمده استفاده روزافزون از این دسته از فولادها می باشد [۴]. مهم ترین کاربرد این گروه از فولادها در خطوط لوله می باشد ولی به طور کلی این فولادها در قسمت های مختلف جهان کاربردهای مختلفی دارند. مثلاً در ژاپن نسبت به اروپا و آمریکای شمالی، بیشتر برای ساخت مخازن تحت فشار و کشتی به کار می روند [۵].



ریزساختارهای چند فازی شامل فریت چند وجهی، پرلیت، بینیت و مارتنزیت را می توان در محدوده وسیعی از فولادهای کم کربن کم آلیاژ که ناشی از ترکیب شیمیایی مناسب، فرآیند ترمومکانیکال و شرایط سرد کردن سریع می باشد، تولید کرد [۶]. در گذشته، از فولادهایی با درجه استحکام پایین با ریزساختار فریتی - پرلیتی استفاده می شد ولی امروزه به دلیل کاهش ضخامت لوله و نیز کاهش هزینه های جوشکاری همراه با افزایش فشارکاری و سرعت احداث و تکمیل پروژه ها، تمایل به استفاده از فولادهایی با درجه استحکام بالاتر مورد توجه قرار گرفته است. در فولادهای کم آلیاژی نوین زمینه فریتی - پرلیتی با استفاده از فرآیند نورد کنترل شده و سرد کردن سریع به سمت زمینه فریت سوزنی، فریت دانه ای و بینیتی تغییر یافته که تأمین کننده استحکام بالا همراه با چقرمگی و مقاومت در برابر شکست مطلوب است. خواص مکانیکی فولادها نه تنها به مقدار پرلیت موجود در ریز ساختار آنها بستگی دارد، بلکه تابعی از اندازه دانه های فریت و ترکیب شیمیایی فولادها است. به عنوان مثال، با ریز شدن دانه های فریت، استحکام و چقرمگی فولاد افزایش می یابد. به منظور ریز شدن دانه های فریت از روش هایی نظیر آلیاژ کردن، استفاده از پایین ترین دمای ممکن برای کار گرم و آستنیته کردن فولاد در پایین ترین دمای ممکن در نرماله کردن استفاده می شود.

فولادهای کم آلیاژ فریتی، از ریز ساختاری با دانه های فریت بسیار ریز و در نتیجه استحکام و چقرمگی بالا تشکیل شده اند. این فولادها به فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا یا HSLA<sup>۱</sup> موسوم اند و اکثراً دارای ۰/۰۷ تا ۰/۱۲ درصد کربن هستند. کنترل اندازه دانه های فریت در این فولادها به کمک مقادیر بسیار کم (به ندرت از ۰/۱ درصد وزنی تجاوز می کند) عناصر آلیاژی نظیر وانادیم، نایوبیم و عناصر آلیاژی مشابه که با کربن و یا نیتروژن ترکیب شده و تشکیل کاربید، نیتريد و یا کربونیتريد بسیار ریز می دهند، انجام می شود. این رسوبات، تبلور مجدد و یا رشد دانه های آستنیته را در ضمن نورد گرم محدود کرده و بنابراین فریت حاصل از آستنیته مزبور دارای دانه های بسیار ریز خواهند بود.

<sup>۱</sup>High strength low alloy

عملیات تولید این نوع فولادها شامل مجموعه‌ای از عملیات حرارتی و نورد گرم (عملیات ترمومکانیکال)<sup>۱</sup> بوده که به طور خلاصه شامل مراحل زیر است: به منظور انحلال رسوبات موجود در ریزساختار، فولاد با ترکیب شیمیایی مناسب را تا بالاتر از ۱۲۳۰ درجه سانتی گراد (دمای انحلال رسوبات) حرارت داده و سپس فولاد را تحت عملیات نورد گرم قرار می‌دهند. در طول نورد گرم و کاهش دما، کاربید، نیتريد و کربونیتريد های آلیاژی در داخل آستنیت رسوب می‌کنند. این رسوبات تحرک مرزدانه‌ها، نابجایی‌ها و مرزهای فرعی را کم کرده و بنابراین انجام تبلور مجدد در طول نورد گرم را کاهش داده و یا متوقف می‌کنند (کاهش تبلور مجدد و یا متوقف کردن آن بستگی به دمای عملیات دارد). نتیجه نهایی این عملیات، به وجود آمدن آستنیت با دانه‌های ریز است. از آنجایی که فریت عمدتاً در مرز دانه‌های آستنیت جوانه می‌زند کاهش اندازه دانه آستنیت که معادل با افزایش مرز دانه‌ها در واحد حجم است، باعث ایجاد محل‌های مناسب برای جوانه زنی فریت می‌شود و یا به بیان دیگر جوانه‌های فریت افزایش می‌یابد. در نتیجه اندازه دانه‌های فریت نهایی نیز کاهش خواهند یافت. سرانجام، آن مقدار از عناصر آلیاژی که هنوز محلول است به صورت کاربید، نیتريد و کربونیتريد در داخل ساختار فریتی رسوب کرده و باعث افزایش بیشتر استحکام فولاد می‌شود [۴].

از اواخر دهه ۷۰ میلادی با استفاده از اصول متالورژیکی و عناصر کم آلیاژی فرآیند نورد گرم کنترل شده توسعه داده شد تا با کاهش میزان کربن و فاز پرلیت، استحکام کششی و چقرمگی شکست در محصولات نوردی افزایش یابد. در این حالت با ایجاد ریزساختارهای پیچیده فریتی و بینیتی همراه با مارتنزیت - آستنیت خواص کششی و چقرمگی شکست بهبود می‌یابد. ریزساختار فولاد کم آلیاژی تا درجه X56 شامل فریت چندوجهی<sup>۲</sup> یا شبه چندوجهی<sup>۳</sup> همراه با پرلیت است. با افزایش استحکام کششی، ریزساختار ریزتر شده و بر اثر سرد کردن سریع، فازهایی نظیر فریت سوزنی در ریز ساختار ایجاد می‌شود [۷].

---

<sup>۱</sup>Thermo mechanical

<sup>۲</sup>Polyhedral ferrite

<sup>۳</sup>Semi polyhedral ferrite

فرآیند نورد ترمومکانیکی، شروع تحول آستنیت به فریت را تسریع و تحول فوق در دمایی بالاتر آغاز می‌شود. همچنین پایان نورد درست در زیر دمای تبلور مجدد فاز آستنیت شروع می‌شود. با ایجاد کرنش در دانه‌های آستنیت، مکان‌های جوانه زنی زیادی به دلیل ایجاد ساختارهای فرعی با چگالی بالایی از نابجائی‌ها در فاز آستنیت ایجاد شده و ریزساختاری ریزدانه تشکیل می‌شود. اضافه نمودن ۰/۱ تا ۰/۲ درصد مولیبدن باعث ایجاد ریزساختار فریت سوزنی شده و ایجاد رسوبات استحکام دهنده را تسریع می‌نماید. نایوبیم در فولادهای کم آلیاژی به دو روش استحکام را بهبود می‌بخشد. اول باعث ایجاد رسوبات کاربید نایوبیم شده و دوم اینکه در زمینه حل و محلول جامد تشکیل خواهد داد. همچنین حضور نایوبیم فرآیند تبلور مجدد را به تأخیر می‌اندازد. حضور رسوبات TiC یا TiN می‌تواند در نزدیکی خط ذوب جوش باعث کاهش پهنای منطقه درشت‌دانه گردد. چهار نوع رسوب در فولاد کم آلیاژی فوق مشاهده شده است. اول رسوبات تیتانیم - نایوبیم که عمدتاً غنی از تیتانیم هستند در زمینه و در طول مرز دانه‌های آستنیت مشاهده شده‌اند. دوم رسوبات غنی از آهن همراه با نیتروژن، کربن و بور که در طول مرز دانه‌ها دیده شده است. سوم رسوبات غنی از نایوبیم که در زمان حرارت دهی طولانی مشاهده شده است. چهارم رسوبات غیرقابل حل نیتريد تیتانیم که در دمای بالا ایجاد می‌شوند [۵].

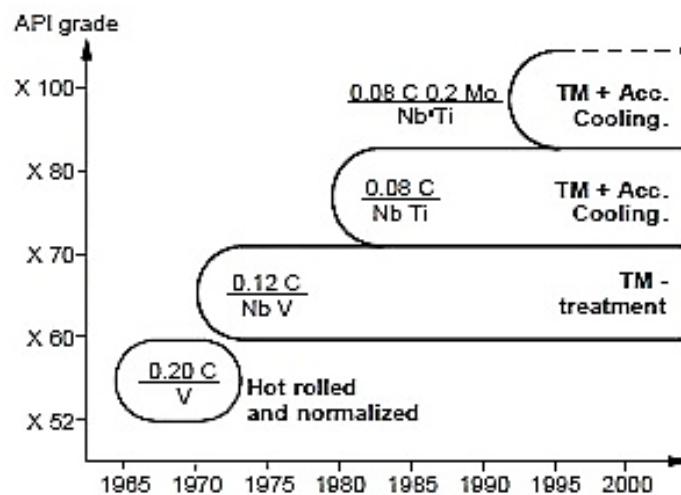
در جوشکاری ذوبی رسوبات نیتريد تیتانیم باعث محدود شدن رشد دانه‌های آستنیت در HAZ جوش و جلوگیری از افزایش شدید سختی پذیری و کاهش زیاد در استحکام و چقرمگی می‌شود. آلومینیوم به منظور دی اکسید کردن و اصلاح دانه‌ها اضافه می‌شود. رسوبات نیتريد آلومینیوم باعث تسریع انتقال آستنیت به فریت می‌شود [۸].

در همه حالات ترکیب شیمیایی به نحوی طراحی می‌شود تا استحکام کششی و چقرمگی مطلوب فراهم گردد. همچنین برای بهبود جوش پذیری، مقادیر عنصر کربن در میزان حداقل نگاه داشته می‌شود. در این فولادها با تحول فازی فریت سوزنی، بینیت دانه‌ای، بینیت پایینی و مارتنزیت، استحکام همراه با چقرمگی بالا به دست می‌آید. خواص مطلوب در این فولادها ناشی از حضور فریت سوزنی کم کربن بوده که از ذرات ریز و مناطقی با چگالی نابجایی بالا جوانه می‌زنند. انرژی ضربه شکست شارپی فراتر از ۲۰۰ ژول برای فلز پایه قابل تأمین بوده، در نتیجه مقاومت شکست مناسب در دماهای پایین قابل تأمین خواهد بود [۴].

تنش اعمالی در زمان تغییر شکل بر تحول فاز فریت سوزنی مشابه با بینیت تأثیر می گذارد. تغییر شکل مکانیکی در زمان نورد، انرژی آزاد آستنیت را افزایش داده، لذا پتانسیل مکان های جوانه زنی بر روی ساختارهای فرعی افزایش می یابد. حضور فریت چند شکلی در مرزدانه های آستنیت، به تحول فریت سوزنی کمک نموده زیرا مرزدانه های آستنیت را به محلی مناسب برای جوانه زنی بینیت تبدیل می کند [۹].

## ۲-۱-۱. توسعه فولادهای کم آلیاژی

شکل ۲-۱ روند توسعه فولادهای کم آلیاژی در نتیجه افزودن عناصر آلیاژی و تکنیک های مختلف فرآیند را نشان می دهد. تا کنون روش های متفاوتی برای افزایش استحکام تسلیم و کششی در فولادهای کم آلیاژ به کار برده شده است؛ با این حال روش های استحکام دهی به وسیله محلول جامد، رسوب سختی، ریزکردن دانه ها، افزایش چگالی نابجائی ها و ایجاد فازهای مستحکم همواره مد نظر بوده اند.



شکل ۲-۱. روند توسعه فولادهای کم آلیاژی با گذر زمان [۱۰]

در ابتدا فولادهای حاوی وانادیم، در شرایط نرماله شده به کار می رفته است. ولی امروزه از وانادیم نیز برای کنترل اندازه دانه و افزایش استحکام در نورد کنترل شده فولادهای حاوی نایوبیم، استفاده می شود [۱۱]. با آلیاژ سازی بهبود بیشتری در خواص این فولادها حاصل شد تا به