



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

# روکش کاری فولاد پر استحکام کم آلیاژ با فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز و بررسی رفتار تریبو خوردگی آن

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد جوشکاری

عباس اقلیمی

اساتید راهنما:

دکتر مرتضی شمعیان

دکتر کیوان ریسی



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته جوشکاری عباس اقلیمی  
تحت عنوان

روش کاری فولاد پر استحکام کم آلیاژ با فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی  
به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز و بررسی رفتار تریبو خوردگی آن

در تاریخ ۱۳۹۱/۷/۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر مرتضی شمعیان

۲- استاد راهنمای پایان نامه دکتر کیوان رئیسی

۳- استاد داور دکتر محمدعلی گل‌عذار

۴- استاد داور دکتر حمیدرضا سلیمی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر کیوان رئیسی

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

با تشکر از:

✓ اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر مرتضی شمعانیان و جناب آقای دکتر کیوان ریسی به

سبب بر عهده داشتن مسئولیت راهنمایی اینجانب در امر انجام این پایان نامه.

✓ اساتید محترم آقایان دکتر محمدعلی گل‌عذار و دکتر حمیدرضا سلیمی به جهت تقبل زحمت

مطالعه و داوری پایان نامه حاضر.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
فهرست شکل ها	یازده
فهرست جدول ها	چهارده
چکیده	۱

### فصل اول: مقدمه

#### فصل دوم: مروری بر مطالب

۱-۲ فولادهای پراستحکام کم آلیاژ: ترکیب، تولید و جوشکاری	۴
۲-۲ فولادهای زنگ‌نزن دوفازی	۶
۱-۲-۲ تاریخچه فولادهای دوفازی	۶
۲-۲-۲ انجماد فولادهای زنگ‌نزن دوفازی	۷
۳-۲-۲ فازهای موجود در فولادهای زنگ‌نزن دوفازی	۷
۴-۲-۲ خواص مکانیکی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی	۱۸
۵-۲-۲ مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی	۱۸
۶-۲-۲ کاربرد فولادهای زنگ‌نزن دوفازی	۲۰
۷-۲-۲ اندازه‌گیری مقدار فریت در فولادهای زنگ‌نزن دوفازی	۲۲
۳-۲ جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن دوفازی: کلیات	۲۴
۱-۳-۲ حرارت ورودی، پیش‌گرم، دمای بین پاسی و عملیات حرارتی پس از جوشکاری	۲۵
۲-۳-۲ جوش‌پذیری فولادهای زنگ‌نزن دوفازی	۲۶
۳-۳-۲ روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان پالسی	۲۷
۴-۳-۲ تمهیدات لازم در جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن	۲۸
۴-۲ جوشکاری غیر مشابه فولادهای زنگ‌نزن دوفازی به فولادهای ساده کربنی، کم آلیاژ و پراستحکام کم آلیاژ	۲۹
۱-۴-۲ روکش کاری با فولادهای زنگ‌نزن دوفازی	۳۰
۵-۲ تریو خوردگی	۳۳
۱-۵-۲ ابزار مناسب در بررسی تریو خوردگی	۳۴
۲-۵-۲ مکانیک تماس در تریو خوردگی	۳۵
۳-۵-۲ روش‌های مورد استفاده در تریو خوردگی	۳۶
۴-۵-۲ تفسیر نتایج تریو خوردگی	۴۱

#### فصل سوم: مواد و روش انجام آزمایش

۱-۳ کلیات	۴۴
۲-۳ مواد مورد استفاده	۴۵
۱-۲-۳ زیرلایه	۴۵
۲-۲-۳ ماده روکش	۴۵
۳-۲-۳ ماده معیار UNS S32760	۴۵
۳-۳ فرایند روکش کاری	۴۶
۱-۳-۳ بهینه‌سازی فرایند روکش کاری پالسی توسط روش رویه پاسخ	۴۶

۴۹	۴-۳ بررسی اثر جریان پالسی بر رفتار فلز روکش
۴۹	۵-۳ بررسی ریزساختاری
۵۰	۶-۳ آزمون سختی و ریزسختی
۵۰	۷-۳ بررسی های فازشناسی
۵۱	۸-۳ اندازه گیری عدد فریت و درصد فریت
۵۱	۹-۳ تغییر ترکیب شیمیایی در مرز زیرلایه و روکش
۵۱	۱۰-۳ آزمون خمش سه نقطه‌ای
۵۳	۱۱-۳ آزمون ضربه
۵۴	۱۲-۳ آزمون های خوردگی: کلیات
۵۵	۱-۱۲-۳ آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک
۵۵	۲-۱۲-۳ آزمون پلاریزاسیون سیکنی
۵۵	۳-۱۲-۳ آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)
۵۵	۱۳-۳ آزمون تریبوخوردگی
	<b>فصل چهارم: نتایج و بحث</b>
۵۸	۱-۴ طراحی آزمایش
۵۸	۱-۱-۴ استفاده از نمودارهای ساختاری جهت تعیین ساختار فلز جوش
۶۱	۲-۱-۴ رابطه حرارت ورودی با میزان فریت
۶۲	۳-۱-۴ آنالیز واریانس (ANOVA)
۶۲	۴-۱-۴ معادلات رگرسیون
۶۳	۵-۱-۴ تعیین کفایت مدل
۶۵	۶-۱-۴ کانتورها و رویه های پاسخ
۶۷	۷-۱-۴ انتخاب نمونه بهینه
۶۷	۲-۴ بررسی فازهای تشکیل شده در فلز روکش
۶۹	۳-۴ توازن آستنیت و فریت
۷۰	۴-۴ نتایج بررسی ریزساختاری
۷۰	۱-۴-۴ ریزساختار فلزات پایه و فلز پرکننده
۷۱	۲-۴-۴ ریزساختار روکش ایجاد شده توسط جریان ثابت
۷۴	۳-۴-۴ ریزساختار روکش ایجاد شده توسط جریان پالسی
۷۸	۴-۴-۴ ریزساختار مقاطع روکش کاری شده و مکانیزم رشد روکش سوپر دوفازی
۸۰	۵-۴-۴ منطقه متاثر از حرارت در زیرلایه
۸۲	۵-۴ تغییر ترکیب شیمیایی مقاطع روکش کاری شده در مرز بین زیرلایه و روکش
۸۳	۶-۴ نتایج بررسی سختی سطح و تغییر ریز سختی مقاطع جوش
۸۴	۷-۴ نتایج آزمون ضربه
۸۵	۸-۴ نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای
۸۷	۹-۴ نتایج آزمون های خوردگی
۸۷	۱-۹-۴ نتایج آزمون های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک
۸۹	۲-۹-۴ نتایج آزمون پلاریزاسیون سیکنی
۹۰	۳-۹-۴ نتایج حاصل از آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

۹۴	..... ۱۰-۴ نتایج آزمون تریبوخوردگی
۹۴	..... ۱-۱۰-۴ آزمون تریبوخوردگی در پتانسیل مدار باز
۹۷	..... ۲-۱۰-۴ آزمون تریبوخوردگی تحت پلاریزاسیون کاتدی
۹۷	..... ۳-۱۰-۴ آزمون تریبوخوردگی تحت پلاریزاسیون آنودی
۹۹	..... ۴-۱۰-۴ تعیین خوردگی شدیدکننده سایش و سایش شدیدکننده خوردگی

#### فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۰۳	..... ۱-۵ نتیجه‌گیری
۱۰۴	..... ۲-۵ پیشنهادها
۱۰۵	..... مراجع

## فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۸.....	شکل ۱-۲. نمودار شبه‌دوتایی بر حسب دما در محدوده ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی
۹.....	شکل ۲-۲. ریزساختار فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی 6A آیل انحلالی شده در $1160^{\circ}\text{C}$ و کوئنچ شده در آب
۹.....	شکل ۳-۲. تشکیل فازهای ثانویه در فولادهای زنگ‌نزن دوفازی
۱۰.....	شکل ۴-۲. نمودار شبه‌دوتایی Fe-Cr-Ni در مقطع ۷۰٪ آهن و محدوده دمایی برای تشکیل فازهای محتمل
۱۳.....	شکل ۵-۲. رسوب‌گذاری مشارکتی در تشکیل آستنیت ثانویه
۱۵.....	شکل ۶-۲. نمودار گروینر، نشان‌دهنده افزایش حساسیت به تشکیل $\sigma$ با افزایش نیکل و دما
۱۶.....	شکل ۷-۲. دیاگرام TTP در رسوب‌گذاری $\sigma$ و $\chi$ در فولاد دوفازی ۲۲۰۵
۱۸.....	شکل ۸-۲. حلالیت نیتروژن در فریت و آستنیت در دماهای مختلف
۲۵.....	شکل ۹-۲. تاثیر حرارت ورودی و ترکیب شیمیایی (نوع آلیاژ) بر میزان فریت HAZ دو فولاد زنگ‌نزن دوفازی
۲۷.....	شکل ۱۰-۲. حساسیت به ترک انجمادی بر حسب نسبت کروم معادل به نیکل معادل در فولادهای زنگ‌نزن
۲۸.....	شکل ۱۱-۲. پارامترهای جوشکاری GTAW پالسی
۳۰.....	شکل ۱۲-۲. تاثیر روش‌های مختلف تمیزکاری پس از جوشکاری بر مقاومت به خوردگی حفره‌ای آلیاژ ۲۵۰۷ SAF
۳۲.....	شکل ۱۳-۲. مکانیزم تشکیل مرزهای نوع دوم در جوشکاری غیرمشابه بین فلز جوش آستنیتی و فلز پایه فولاد کربنی
۳۳.....	شکل ۱۴-۲. نحوه محاسبه رقت در روکش کاری
۳۴.....	شکل ۱۵-۲. دستگاهی جهت بررسی تریبوخوردگی بر اساس کارکرد پین بر دیسک
۳۴.....	شکل ۱۶-۲. شماتیک اندازه‌گیری تغییرات پتانسیل الکتروده به روش کلاسیک و ترکیب میکروپروب با الکتروده مرجع
۳۵.....	شکل ۱۷-۲. تماس بین یک کره و یک سطح صاف بی‌نهایت
۳۶.....	شکل ۱۸-۲. روش پتانسیل خوردگی در تریبوخوردگی
۳۷.....	شکل ۱۹-۲. تغییر پتانسیل الکتروده دیسک فولاد زنگ‌نزن AISI 316 در محلول ۰/۵ مولار $\text{H}_2\text{SO}_4$
۳۸.....	شکل ۲۰-۲. روش سلول‌های گالوانیک در تریبوخوردگی
۴۰.....	شکل ۲۱-۲. روش پتانسیواستات در تریبوخوردگی
۴۰.....	شکل ۲۲-۲. صفحه آهنی ساییده شده توسط پین آلومینا در اسید سولفوریک
۴۳.....	شکل ۲۳-۲. شماتیک سیلان ماده و واکنش‌های ممکن در یک سیستم تریبوخوردگی
۵۱.....	شکل ۱-۳. تصویری از نحوه انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای
۵۲.....	شکل ۲-۳. چگونگی تقسیم نمونه خمش سه نقطه‌ای بین زیرلایه و فلز روکش
۵۳.....	شکل ۳-۳. مسطح کردن سطح پس از آزمون خمش سه نقطه‌ای
۵۴.....	شکل ۴-۳. چگونگی تقسیم نمونه ضربه بین زیرلایه و فلز روکش
۵۴.....	شکل ۵-۳. شما و ابعاد نمونه ضربه (ابعاد بر حسب میلی‌متر)
۵۷.....	شکل ۶-۳. دستگاه تریبومتر مورد استفاده در این پژوهش ساخته شده در دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان
۵۷.....	شکل ۷-۳. دستگاه پروفیلومتر SurfTest SJ-301 ساخت شرکت Mitutoyo
۶۰.....	شکل ۱-۴. نمودار شفلر به همراه موقعیت فلز پایه (دایره) و فلز پرکننده (مستطیل) و رقت پیش‌بینی شده در مرزهای نمودار
۶۱.....	شکل ۲-۴. نمودار WRC-1992 با موقعیت فلزات پایه و روکش و رقت در مرزهای عدد فریت
۶۲.....	شکل ۳-۴. عدد فریت بر حسب حرارت ورودی برای نمونه‌های مورد استفاده در طراحی آزمایش
۶۳.....	شکل ۴-۴. تاثیر هر یک از پارامترها بر عدد فریت پس از آنالیز واریانس
۶۴.....	شکل ۵-۴. نمودار پراکنندگی، نمودار باقیمانده بر حسب شماره آزمایش و نمودار باقیمانده بر حسب مقادیر پیش‌بینی شده
۶۶.....	شکل ۶-۴. تغییرات عدد فریت با تغییر پارامترهای جریان پالسی



- شکل ۷-۴. تغییرات رویه پاسخ FN با تغییر پارامترهای جریان پالسی ..... ۶۷
- شکل ۸-۴. الگوی XRD نمونه جوشکاری شده با جریان الف) ثابت ب) پالسی ..... ۶۹
- شکل ۹-۴. الگوی XRD نمونه مبنای UNS S32760 ..... ۶۸
- شکل ۱۰-۴. عدد فریت (پشت) و درصد فریت (جلو) ..... ۶۹
- شکل ۱۱-۴. ریزساختار زیرلایه API X65 اچ شده توسط محلول ۳٪ پتاسیم متابی سولفیت ..... ۷۰
- شکل ۱۲-۴. ریزساختار فلز پرکننده AWS ER2594N اچ شده توسط محلول براها ..... ۷۱
- شکل ۱۳-۴. ریزساختار فلز معیار UNS S32760 اچ شده توسط محلول براها ..... ۷۱
- شکل ۱۴-۴. ریز ساختار روکش ایجاد شده توسط جریان ثابت، اچ شده توسط اسید نیتریک ..... ۷۲
- شکل ۱۵-۴. روکش ایجاد شده توسط جریان ثابت اچ شده توسط محلول براها ..... ۷۳
- شکل ۱۶-۴. تصویر SEM نمونه روکش شده با جریان ثابت، اچ شده توسط محلول ۴۰ درصد NaOH ..... ۷۳
- شکل ۱۷-۴. ریز ساختار روکش ایجاد شده توسط جریان ثابت، اچ شده توسط محلول ۴۰ درصد NaOH ..... ۷۴
- شکل ۱۸-۴. ریزساختار روکش ایجاد شده توسط جریان پالسی، اچ شده توسط اسید نیتریک ..... ۷۵
- شکل ۱۹-۴. ریز ساختار حاصل از روکش کاری با جریان پالسی اچ شده توسط محلول براها ..... ۷۵
- شکل ۲۰-۴. تصویر SEM مربوط به نمونه روکش شده با جریان پالسی اچ شده توسط محلول ۴۰ درصد NaOH ..... ۷۶
- شکل ۲۱-۴. ریز ساختار روکش ایجاد شده توسط جریان پالسی، اچ شده توسط محلول ۴۰ درصد NaOH ..... ۷۶
- شکل ۲۲-۴. منحنی TTT آلیاژ UNS S32760 ..... ۷۸
- شکل ۲۳-۴. ریزساختار مقطع روکش ایجاد شده توسط جریان ثابت ..... ۷۹
- شکل ۲۴-۴. ریزساختار مقطع روکش ایجاد شده توسط جریان ثابت ..... ۸۰
- شکل ۲۵-۴. تصویر SEM مقطع روکش ایجاد شده توسط جریان ثابت، اچ شده توسط محلول ۴۰ درصد NaOH ..... ۸۰
- شکل ۲۶-۴. ریز ساختار منطقه متاثر از حرارت زیرلایه، اچ شده توسط محلول نایتال-پیکرال ..... ۸۱
- شکل ۲۷-۴. مقایسه بین حرارت ایجاد شده در منطقه متاثر از حرارت در حین جوشکاری و عملیات حرارتی ..... ۸۲
- شکل ۲۸-۴. تغییر ترکیب شیمیایی بر حسب فاصله از مرز ذوب در نمونه روکش کاری شده با جریان پالسی ..... ۸۲
- شکل ۲۹-۴. تغییر ترکیب شیمیایی بر حسب فاصله از مرز ذوب در نمونه روکش کاری شده با جریان ثابت ..... ۸۳
- شکل ۳۰-۴. سختی سطح به دست آمده از آزمون سختی سنجی ..... ۸۳
- شکل ۳۱-۴. ریز سختی بر حسب فاصله در نزدیکی مرز بین زیرلایه و روکش ..... ۸۴
- شکل ۳۲-۴. انرژی ضربه در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  ..... ۸۵
- شکل ۳۳-۴. نمونه روکش شده با جریان ثابت پس از آزمون ضربه. ترک ایجاد شده تنها مقدار کمی پیش رفته است ..... ۸۵
- شکل ۳۴-۴. نمودار نیرو-جابجایی برای دو نمونه روکش شده با جریان ثابت (خط ممتد) و جریان پالسی (خط چین) ..... ۸۶
- شکل ۳۵-۴. استحکام تسلیم خمشی برای دو نمونه روکش شده با جریان ثابت و جریان پالسی ..... ۸۶
- شکل ۳۶-۴. نمونه خمش پس از الف) ۱۱۰ درجه (۱۲ میلی متر) خمش، ب) ۱۸۰ درجه خمش ..... ۸۷
- شکل ۳۷-۴. منحنی های پلاریزاسیون ..... ۸۸
- شکل ۳۸-۴. منحنی های لگاریتم دانسیته جریان بر حسب پتانسیل به دست آمده از آزمون پلاریزاسیون سیکلی ..... ۸۹
- شکل ۳۹-۴. منحنی الف) نایکوئیست، ب) بود-زد و ج) بود-فاز متعلق به نمونه روکش شده با جریان پالسی ..... ۹۰
- شکل ۴۰-۴. منحنی الف) نایکوئیست، ب) بود-زد و ج) بود-فاز متعلق به نمونه روکش شده با جریان ثابت ..... ۹۱
- شکل ۴۱-۴. مدار معادل استفاده شده جهت مدل کردن امپدانس در نمونه های روکش شده ..... ۹۲
- شکل ۴۴-۴. میزان مقاومت پلاریزاسیون (Rp) برای دو روکش ایجاد شده ..... ۹۳
- شکل ۴۵-۴. تغییرات پتانسیل مدار باز در حین آزمون تریبوخوردگی ..... ۹۴
- شکل ۴۶-۴. مقایسه نتایج به دست آمده از زبری سنجی پس از انجام آزمون تریبوخوردگی ..... ۹۵

- شکل ۴-۴۷. شیار ایجاد شده در اثر سایش آزمون تریبوخوردگی متعلق به نمونه روکش شده با جریان ثابت ..... ۹۶
- شکل ۴-۴۸. شیار ایجاد شده در اثر سایش آزمون تریبوخوردگی متعلق به نمونه روکش شده با جریان پالسی ..... ۹۶
- شکل ۴-۴۹. تغییرات جریان بر حسب زمان در حین آزمون تریبوخوردگی در پلاریزاسیون کاتدی ..... ۹۸
- شکل ۴-۵۰. تغییرات جریان بر حسب زمان در حین آزمون تریبوخوردگی در پلاریزاسیون آنودی ..... ۹۸
- شکل ۴-۵۱. حجم کل از دست رفته برای دو نمونه روکش شده با جریان ثابت و جریان پالسی ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۵۲. سهم مکانیزم‌های تخریب در تخریب نمونه‌های روکش شده ..... ۱۰۲

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۴۵.....	جدول ۱-۳. ترکیب شیمیایی زیرلایه API X65
۴۵.....	جدول ۲-۳. ترکیب شیمیایی فلز پرکننده سوپردوفازی AWS ER2594N
۴۵.....	جدول ۳-۳. ترکیب شیمیایی فولاد سوپردوفازی UNS S32760
۴۶.....	جدول ۴-۳. ثابت‌های فرایند روکش کاری
۴۷.....	جدول ۵-۳. محدوده کاری پارامترهای فرایند جوشکاری پالسی
۴۸.....	جدول ۶-۳. طراحی آزمایش بر اساس CCD
۵۲.....	جدول ۷-۳. ابعاد نمونه، پانچ و نگاه‌دارنده‌های مورد استفاده در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای
۵۸.....	جدول ۱-۴. محدوده کاری پارامترهای فرایند جوشکاری پالسی
۵۹.....	جدول ۲-۴. نتایج به دست آمده از CCD
۶۴.....	جدول ۳-۴. خلاصه‌ای از برازش مدل عدد فریت
۶۷.....	جدول ۴-۴. پارامترهای جوشکاری نمونه بهینه
۸۸.....	جدول ۵-۴. مقایسه کمی نتایج حاصل از آزمون پتانسیواستاتیک
۸۹.....	جدول ۶-۴. مقایسه کمی نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون سیکلی
۹۳.....	جدول ۷-۴. مقادیر حاصل از مدل‌سازی نتایج EIS
۹۵.....	جدول ۸-۴. مقادیر سختی، افت پتانسیل، عرض مسیر سایش و حجم سایش برای دو روکش ایجاد شده
۹۹.....	جدول ۹-۴. دانسیته جریان‌های به دست آمده از آزمون تریبوخوردگی تحت پلاریزاسیون آندی
۱۰۱.....	جدول ۱۰-۴. حجم کل سایش و مولفه‌های آن در آزمون تریبوخوردگی در پلاریزاسیون‌های مختلف

## چکیده

فولادهای پراستحکام کم آلیاژ دارای استحکام و مقاومت به خوردگی بیشتری نسبت به فولادهای ساده کربنی هستند، اما در برابر یون‌های خورنده‌ای چون کلرید موجود در آب دریا بسیار آسیب‌پذیر اند. از سوی دیگر، فولادهای زنگ‌نزن سوپر دوفازی دارای خواص مطلوبی از نظر مکانیکی و مقاومت به خوردگی خصوصاً خوردگی حفره‌ای و تنشی در محیط‌های حاوی کلرید هستند. این فولادها به خاطر دارا بودن ترکیبی از استحکام و مقاومت به خوردگی خوب، کاربردهای گوناگونی پیدا کرده‌اند. عمده کاربرد این فولادها ساخت تفکیک‌کننده‌های گریز از مرکز است که به طور مداوم در معرض تریبو خوردگی و خوردگی سایشی قرار دارند. بنابراین روکش کاری فولادهای پراستحکام کم آلیاژ توسط فولادهای زنگ‌نزن دوفازی، می‌تواند یک روش منطقی جهت ساخت تفکیک‌کننده‌های گریز از مرکز با هزینه کمتر باشد. در این پژوهش پس از بهینه‌سازی فرایند روکش کاری با جریان پالسی در روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز توسط روش رویه پاسخ، به بررسی تاثیر جریان پالسی بر خواص خوردگی و تریبو خوردگی روکش پرداخته شد. در این راه از پراش اشعه ایکس جهت بررسی فازهای تشکیل شده، میکروسکوپ الکترونی روبشی جهت بررسی ریزساختاری، آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و سیکنی و آزمون امپدانس الکتروشیمیایی جهت بررسی رفتار خوردگی و آزمون تریبو خوردگی در سه حالت مدار باز، پلاریزاسیون آندی و پلاریزاسیون کاتدی جهت بررسی رفتار تریبو خوردگی روکش استفاده شد. بررسی‌های ریزساختاری انجام شده نشان داد که دو فاز فریت و آستنیت در نمونه روکش کاری با جریان ثابت وجود داشتند، اما در نمونه روکش شده با جریان پالسی مقادیر زیادی آستنیت ثانویه نیز علاوه بر این دو فاز تشکیل شده بود. حضور این آستنیت ثانویه به همراه مورفولوژی تیغه‌ای شکل فریت و آستنیت به وجود آمده در روکش کاری با جریان پالسی باعث افزایش قابل توجه نرخ خوردگی و دانسیته جریان روپین شدن در آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک شده بود. همچنین حلقه هیستریزس بزرگ‌تر این نمونه در آزمون پلاریزاسیون سیکنی حاکی از حساسیت بیشتر این نمونه به حفره دار شدن بود. نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی حاکی از آن بود که فیلم روپین تشکیل شده بر سطح هر دو نمونه دارای نواقص زیادی است. مقاومت پلاریزاسیون به دست آمده از این آزمون نیز نشان‌دهنده مقاومت پلاریزاسیون کمتر نمونه روکش کاری شده با جریان پالسی بود. بررسی‌های تریبو خوردگی نشان داد که سایش تشدیدکننده خوردگی، مکانیزم غالب در تخریب هر دو روکش بوده است، لیکن میزان حجم کل از دست رفته در آزمون تریبو خوردگی تحت پلاریزاسیون آندی در نمونه روکش شده با جریان پالسی حدود ۵ برابر بیشتر از نمونه روکش کاری شده با جریان ثابت بود که دلیل آن دانسیته جریان روپین شدن بالاتر در این نمونه تشخیص داده شد.

## کلمات کلیدی

فولاد پراستحکام کم آلیاژ، فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی، روکش کاری، خوردگی، تریبو خوردگی

## فصل اول

### مقدمه

فولادهای پر استحکام کم آلیاژ (HSLA)<sup>۱</sup> عموماً دارای استحکام و مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به فولادهای ساده کربنی هستند. این فولادها به خاطر نسبت استحکام به وزن بالاتر نسبت به فولادهای کربنی در خطوط انتقال نفت و گاز به وفور استفاده می‌شوند. فولادهای ساخته شده بر طبق استاندارد موسسه نفت امریکا (API)<sup>۲</sup> یکی از پرکاربردترین انواع فولادهای HSLA هستند که دارای خواص مکانیکی مطلوبی بوده و در برابر خوردگی یکنواخت مقاومت بالایی دارند. اما این فولادها در برابر خوردگی‌های موضعی چون حفره‌دارشدن و خوردگی توام با سایش (خوردگی سایشی) و تریبوخوردگی مقاومت چندانی ندارند.

از سوی دیگر فولادهای زنگ‌نزن دوفازی<sup>۳</sup>، دارای دو فاز آستنیت و فریت با درصدهایی تقریباً یکسان هستند و خواص مفید هر دو نوع فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فریتی نظیر استحکام کششی و خستگی بالا، چقرمگی خوب در دماهای پایین، شکل‌پذیری و جوش‌پذیری مناسب و مقاومت عالی در برابر خوردگی تنشی، حفره‌ای و یکنواخت را دارا هستند. کاربرد اصلی این فولادها در ساخت تفکیک‌کننده‌های گریز از مرکز<sup>۴</sup> می‌باشد که در معرض تریبوخوردگی و خوردگی سایشی قرار دارند.

با توجه به کاربرد گسترده فولادهای HSLA و خواص عالی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی، تلاش‌هایی در زمینه اتصال آن‌ها به منظور استفاده از خواص مطلوب هر دو گروه، انجام شده است. اما تمامی پژوهش‌های انجام شده در این مورد که حجم چندان زیادی هم ندارند، در زمینه جوشکاری این فلزات بوده است و تاکنون به روکش‌کاری یک

---

<sup>۱</sup> High Strength Low Alloy

<sup>۲</sup> American Petroleum Institute

<sup>۳</sup> Duplex Stainless Steel (DSS)

<sup>۴</sup> Centrifugal Separator

فولاد سوپردوفازی بر سطح یک فولاد HSLA به صورت کامل پرداخته نشده است. می توان از روکش کاری<sup>۱</sup> فولاد سوپردوفازی بر سطح فولاد HSLA به منظور محافظت از فولاد HSLA در برابر خوردگی و خوردگی سایشی در محیط های دریایی استفاده کرد. همچنین روکش کاری مخازن بزرگ تحت فشار از جنس فولاد کربنی یا کم آلیاژ و لوله های انتقال نفت و گاز با فولاد زنگ نزن دوفازی روشی مطلوب برای محافظت از آنها در برابر خوردگی با هزینه کم است که معمولاً در صنعت انجام می شود. روکش کاری یک فولاد سوپردوفازی بر سطح یک فولاد HSLA می تواند جهت کاهش هزینه ها در ساخت تفکیک کننده های گریز از مرکز که هم اکنون به صورت کامل از فولادهای دوفازی ساخته می شوند نیز به کار گرفته شود.

همان گونه که ذکر شد تحقیقات انجام شده در مورد روکش کاری فولادهای زنگ نزن دوفازی محدود و اندک شمار است. به طوری که مقاله های چاپ شده در این زمینه محدود به بهینه سازی فرایند روکش کاری و بررسی ریزساختاری هستند. از این میان می توان به پژوهش کانان و موروگان در سال ۲۰۰۶ اشاره کرد که به روکش کاری فولاد ۲۲۰۹ SAF بر سطح فولاد ۲۰۶۲ ISO پرداختند و نشان دادند که عدد فریت با افزایش حرارت ورودی، کاهش می یابد. لذا با توجه به کاربرد خاص فولادهای زنگ نزن دوفازی که از خواص خوردگی و خوردگی تنشی (SCC)<sup>۲</sup> آنها نشأت گرفته است، لزوم یک پژوهش جامع در مورد رفتار خوردگی این روکش ها مشخص می شود. همچنین با توجه به کاربرد ویژه فولادهای زنگ نزن دوفازی در ساخت تفکیک کننده های گریز از مرکز، بررسی رفتار تریبو خوردگی این روکش ها نیز می تواند حائز اهمیت بسزایی باشد. اهمیت پژوهش در زمینه بررسی تریبو خوردگی فولادها با مراجعه به مقالات منتشر شده در این زمینه بیش از پیش مشخص می شود؛ به طوری که حجم مقالات موجود در این زمینه نیز اندک است. مهم ترین مقاله موجود در این زمینه مربوط به ویگنال و همکاران در سال ۲۰۰۶ است که نشان دادند فعالیت شیمیایی فازهای فریت و آستنیت در فولادهای دوفازی در آزمایش تریبو خوردگی با آزمایش خوردگی متفاوت است.

بنابراین در این پژوهش روکشی از فولاد زنگ نزن سوپردوفازی توسط روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با دو جریان پالسی و ثابت بر سطح فولاد پراستحکام کم آلیاژ اعمال شد. در مجموع اهداف اصلی انجام این پژوهش عبارت است از:

- با توجه به غیرمشابه بودن اتصال، مهم ترین هدف دست یابی به ساختاری است که بتواند بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری (PWHT)<sup>۳</sup> بهترین رفتار خوردگی و تریبو خوردگی را داشته باشد.
- استفاده از روش طراحی آزمایش مرکب مرکزی برای تعیین پارامترهای تاثیر گذار در روکش کاری پالسی فولاد سوپردوفازی و بهینه سازی این فرایند جهت دست یابی به بهترین خواص ممکن.
- بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی، خواص خوردگی و تریبو خوردگی نمونه های روکش کاری شده در دو حالت جریان پالسی و ثابت و مشخص کردن تاثیر جریان پالسی بر رفتار روکش.

<sup>۱</sup> Cladding

<sup>۲</sup> Stress Corrosion Cracking

<sup>۳</sup> Post-Weld Heat Treatment

## فصل پنجم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

#### ۱-۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی روکش کاری یک فولاد سوپردوفازی بر سطح یک فولاد HSLA پرداخته شد. اهم دستاوردهای این پژوهش عبارتند از:

- در روکش کاری با جریان پالسی هیچ رابطه مشخصی بین حرارت ورودی و میزان فریت یافت نشد.
- بررسی ریزساختار دو روکش ایجاد شده با جریان ثابت و جریان پالسی حاکی از ایجاد روکشی با نسبتی مطلوب و نزدیک به ۵۰:۵۰ بین آستنیت و فریت بود و هیچ‌گونه فاز بین‌فلزی و مخربی دیده نشد. اما در روکش کاری با جریان پالسی به خاطر نرخ سرد شدن بیشتر منجر به تشکیل آستنیت ثانویه در ریز ساختار شده بود. این آستنیت ثانویه نقش مخربی بر رفتار روپین شدن روکش سوپردوفازی داشت.
- خواص خوردگی زیرلایه با استفاده از روکش ایجاد شده به واسطه تبدیل رفتار خوردگی از حالت فعال به فعال-روپین به مراتب بهبود یافت. این بهبود خواص در روکش کاری با جریان ثابت به خاطر حضور تنها دو فاز فریت و آستنیت در ریزساختار به مراتب بیشتر از روکش کاری با جریان پالسی بود. به طوری که نمونه روکش شده با جریان پالسی در آزمون پلاریزاسیون سیکلی حلقه هیستریزیس به مراتب بزرگ‌تری ایجاد کرد که نشان‌دهنده تمایل بیشتر حفرات تشکیل شده جهت رشد می‌باشد.
- میزان تخریب و حجم از دست رفته در آزمون تریبوخوردگی در پلاریزاسیون کاتدی برای هر دو نمونه مقادیر نزدیکی داشت. این امر از یکسان بودن مکانیزم تخریب در این پلاریزاسیون حکایت داشت.
- نتایج تریبوخوردگی نشان داد که میزان خوردگی روکش ایجاد شده توسط جریان پالسی در دو حالت OCP و تحت پلاریزاسیون آندی به مراتب بیشتر از روکش ایجاد شده توسط جریان ثابت است. در این نمونه خوردگی تشدیدکننده سایش، نقش به مراتب موثرتری در تخریب روکش داشت.

## ۲-۵ پیشنهادها

در پایان به منظور تکمیل نتایج این پژوهش، تحقیقات زیر پیشنهاد می‌شود:

- با توجه به این که نیتروژن می‌تواند تشکیل نیتريد کروم را در نرخ‌های سرد شدن زیاد به تعویق بیندازد [۱۵] می‌توان از افزودن نیتروژن به گاز محافظ در جریان پالسی برای جلوگیری از تشکیل نیتريد کروم و متعاقباً آستنیت ثانویه استفاده کرد.
- بررسی سایش خشک (بدون الکترولیت) روکش‌ها جهت تعیین خواص سایشی روکش.
- بررسی خوردگی سایشی نمونه‌های روکش شده.
- تعیین مقاومت به خوردگی بین‌دانه‌ای در دو نمونه روکش کاری شده با جریان ثابت و جریان پالسی با استفاده از روش حلقه دو گانه فعال‌سازی مجدد الکتروشیمیایی-پتانسیوسیتیکی (DL-EPR)<sup>۱</sup>.
- شبیه‌سازی فرایند روکش کاری این فولاد برای تعیین تفاوت تنش‌های پس‌ماند در دو نمونه روکش شده با جریان ثابت و پالسی.
- افزودن تقویت کننده به روکش خصوصاً کاربید تیتانیوم (TiC) [۱۵۵] و کاربید تنگستن (WC) به منظور بهبود رفتار سایشی.
- بررسی تاثیر افزودن عناصر نادر خاکی به حوضچه جوش بر رفتار خوردگی روکش.
- بررسی دقیق تر فازی توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری و استفاده از میکروسکوپ الکتروشیمیایی روبشی (SECM)<sup>۲</sup> جهت تعیین خوردگی ترجیحی در نمونه‌های ایجاد شده با جریان پالسی و ثابت و تعیین نقاط حساس تر ساختار.

<sup>۱</sup> Double Loop Electrochemical Potentiokinetic Reactivation

<sup>۲</sup> Scanning Electro-Chemical Microscopy



- [1] Weng, Y., Dong, H., and Gan, Y., *Advanced steels: The recent scenario in steel science and technology*, Metallurgical Industry Press & Springer, London & New York, 2011.
- [2] Wikipedia, 2011, [http://en.wikipedia.org/wiki/High-strength\\_low-alloy\\_steel](http://en.wikipedia.org/wiki/High-strength_low-alloy_steel).
- [3] Llewellyn, D.T. & Hudd, R.C., *Steels: Metallurgy and applications*, 3<sup>rd</sup> Ed., Elsevier, Oxford, 1998.
- [4] Kou, S., *Welding metallurgy*, 2<sup>nd</sup> Ed., Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 2003.
- [5] Abbade, N.P. & Crnkovic, S.J., "Sand-water slurry erosion of API 5L X65 pipe steel as quenched from intercritical temperature", *Tribology International*, Vol. 33, No. 12, pp. 811-816, 2000.
- [6] Mendoza, B.I., Maldonado, Z.C., Albitar, H.A., and Robles, P.E., "Dissimilar welding of superduplex stainless steel/HSLA steel for offshore applications joined by GTAW", *Engineering*, Vol. 2, No. 7, pp. 520-528, 2010.
- [7] Muñoz, A.I., Antón, J.G., Guiñón, J.L., and Herranz, V.P., "The effect of chromate in the corrosion behavior of duplex stainless steel in LiBr solutions", *Corrosion Science*, Vol. 48, No. 12, pp. 4127-4151, 2006.
- [8] Lippold, J.C. & Kotecki, D.J., *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, John Wiley, Hoboken, New Jersey, 2005.
- [9] Liljas, M., "80 years with duplex stainless steel, a historic review and prospects for the future", *Acom*, Vol. 4, pp. 28-34, 2010.
- [10] Perren, R.A., Suter, T.A., Uggowitzer, P.J., Weber, L., Magdowski, R., Böhni, H., and Speidel, M.O., "Corrosion resistance of super duplex stainless steels in chloride ion containing environments: investigations by means of a new microelectrochemical method: I. Precipitation-free states", *Corrosion Science*, Vol. 43, No. 4, pp. 707-726, 2001.
- [11] Weibull, I., "Duplex stainless steels and their application, particularly in centrifugal separators, Part A: History & development", *Materials & Design*, Vol. 8, No. 1, pp. 35-40, 1987.
- [12] Notten, G., "Corrosion prevention and protection: Duplex stainless steels", *Stainless Steel World - KCL Publishing BV*, Vol. SSW-CE-LR, pp. 62-75, 2007.
- [13] Ezuber, H.M., El-Houd, A., and El-Shawesh, F., "Effects of sigma phase precipitation on seawater pitting of duplex stainless steel", *Desalination*, Vol. 207, No. 1-3, pp. 268-275, 2007.
- [14] Gagnepain, J.C., "Duplex stainless steels: Success story and growth perspectives", *Duplex Steel World*, Vol. BP19, pp. 1-5, 2010.
- [15] Kim, S.-T., Jang, S.-H., Lee, I.-S., and Park, Y.-S., "Effects of solution heat-treatment and nitrogen in shielding gas on the resistance to pitting corrosion of hyper duplex stainless steel welds", *Corrosion Science*, Vol. 53, No. 5, pp. 1939-1947, 2011.
- [16] Kaçar, R., "Effect of solidification mode and morphology of microstructure on the hydrogen content of duplex stainless steel weld metal", *Materials & Design*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-9, 2004.
- [17] McGuire, M.F., *Stainless steels for design engineers*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008.
- [18] Schaeffler, A.L., "Constitution diagram for stainless steel weld metal", *Metal Progress*, Vol. 56, No. 11, pp. 680-680B, 1949.
- [19] DeLong, W., Ostrom, G., and Szumachowski, E., "Measurement and calculation of ferrite in stainless steel weld metal", *Welding Journal*, Vol. 35, No. 11, pp. 521s-528s, 1956.

- [20] Siewert, T.A., McCowan, C.N., and Olson, D.L., "Ferrite number prediction to 100 FN in stainless steel weld metal", *Welding Journal*, Vol. 67, No. 12, pp. 289s-298s, 1988.
- [21] Martins, M. & Casteletti, L.C., "Sigma phase morphologies in cast and aged super duplex stainless steel", *Materials Characterization*, Vol. 60, No. 8, pp. 792-795, 2009.
- [22] Badji, R., Bouabdallah, M., Bacroix, B., Kahloun, C., Belkessa, B., and Maza, H., "Phase transformation and mechanical behavior in annealed 2205 duplex stainless steel welds", *Materials Characterization*, Vol. 59, No. 4, pp. 447-453, 2008.
- [23] Charles, J., "Duplex stainless steels, a Review after DSS'07 held in Grado", *Revue de Métallurgie*, Vol. 105, No. 3, pp. 155-171, 2008.
- [24] Yoo, Y.-H., Choi, Y.-S., Kim, J.-G., and Park, Y.-S., "Effects of Ce, La and Ba addition on the electrochemical behavior of super duplex stainless steels", *Corrosion Science*, Vol. 52, No. 4, pp. 1123-1129, 2010.
- [25] A923-03: Standard test methods for detecting detrimental intermetallic phase in duplex austenitic/ferritic stainless steels, ASTM Standard, 2003.
- [26] Pohl, M., Storz, O., and Glogowski, T., "Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel", *Materials Characterization*, Vol. 58, No. 1, pp. 65-71, 2005.
- [27] Chen, H., Ding, T.-S., Li, J., Xiao, X.-S., Zhao, J.-L., and Jiang, L.-Z., "A New Economical Sigma-free Duplex Stainless Steel 19Cr-6Mn-1.0Mo-0.5Ni-0.5W-0.5Cu-0.2N", *Journal Of Iron and Steel Research (International)*, Vol. 18, No. 4, pp. 52-56, 2011.
- [28] Li, J., Xu, Y., Xiao, X., Zhao, J., Jiang, L., and Hu, J., "A new resource-saving, high manganese and nitrogen super duplex stainless steel 25Cr-2Ni-3Mo-xMn-N", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 1-2, pp. 245-251, 2009.
- [29] Varol, I., III, W.A.B., and Lippold, J.C., "Characterisation of weld solidification cracking in a duplex stainless steel", *Metallography*, Vol. 23, No. 2-5, pp. 1-19, 1989.
- [30] Ramirez, A., Lippold, J.C., and Brandi, S., "The relationship between chromium nitride and secondary austenite precipitation in duplex stainless steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 34, No. 8, pp. 1575-1597, 2003.
- [31] Pettersson, C.O. & Fager, S.A., "Welding practice for the sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507", *AB Sandvik Steel*, 1995.
- [32] Nowacki, J. & Łukojć, A., "Structure and properties of the heat-affected zone of duplex steels welded joints", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 1074-1081, 2005.
- [33] Sahu, J.K., Krupp, U., Ghosh, R.N., and Christ, H.J., "Effect of 475°C embrittlement on the mechanical properties of duplex stainless steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 508, No. 1-2, pp. 1-14, 2009.
- [34] Hsieh, C.-C. & Wu, W., "Discussing the precipitation behavior of  $\sigma$  phase using diffusion equation and thermodynamic simulation in dissimilar stainless steels", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 506, No. 2, pp. 820-825, 2010.
- [35] Tavares, S.S.M., Pardal, J.M., Guerreiro, J.L., Gomes, A.M., and Silva, M.R.d., "Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No. 17, pp. L29-L33, 2010.
- [36] Sieurin, H. & Sandström, R., "Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 444, No. 1-2, pp. 271-276, 2007.
- [37] Gunn, R.N., *Duplex stainless steels: Microstructure, properties and applications*, Woodhead Publishing, 1997.

- [38] Kobayashi, D.Y. & Wolyneec, S., "Evaluation of the low corrosion resistant phase formed during the sigma phase precipitation in duplex stainless steels", *Materials Research*, Vol. 2, pp. 239-247, 1999.
- [39] Sato, Y.S. & Kokawa, H., "Preferential precipitation site of sigma phase in duplex stainless steel weld metal", *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 6, pp. 659-663, 1999.
- [40] Pardal, J.M., Tavares, S.S.M., Fonseca, M.C., de-Souza, J.A., Côrte, R.R.A., and de-Areu, H.F.G., "Influence of the grain size on deleterious phase precipitation in superduplex stainless steel UNS S32750", *Materials Characterization*, Vol. 60, No. 3, pp. 165-172, 2009.
- [41] Kim, S.-T., Jeon, S.-H., Lee, I.-S., and Park, Y.-S., "Effects of rare earth metals addition on the resistance to pitting corrosion of super duplex stainless steel - Part 1", *Corrosion Science*, Vol. 52, No. 6, pp. 1897-1904, 2010.
- [42] Lewis, M.H., "Precipitation of (Fe, Cr) sigma phase from austenite", *Acta Metallurgica*, Vol. 14, No. 11, pp. 1421-1428, 1966.
- [43] Magnabosco, R., "Kinetics of sigma phase formation in a Duplex Stainless Steel", *Materials Research*, Vol. 12, pp. 321-327, 2009.
- [44] Park, Y.-S., Kim, S.-T., Lee, I.-S., and Song, C.-B., "Effects of rare earth metals addition and aging treatment on the corrosion resistance and mechanical properties of super duplex stainless steels", *Metals And Materials International*, Vol. 8, No. 3, pp. 309-318, 2002.
- [45] Shim, S.-I., Park, Y.-S., Kim, S.-T., and Song, C.-B., "Effects of rare earth metal addition on the cavitation erosion-corrosion resistance of super duplex stainless steels", *Metals And Materials International*, Vol. 8, No. 3, pp. 301-307, 2002.
- [46] Ha, H.-Y., Park, C.-J., and Kwon, H.-S., "Effects of misch metal on the formation of non-metallic inclusions and the associated resistance to pitting corrosion in 25% Cr duplex stainless steels", *Scripta Materialia*, Vol. 55, No. 11, pp. 991-994, 2006.
- [47] Samanta, S.K., Mitra, S.K., and Pal, T.K., "Effect of rare earth elements on microstructure and oxidation behaviour in TIG weldments of AISI 316L stainless steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 430, No. 1-2, pp. 242-247, 2006.
- [48] Escriba, D.M., Materna-Morris, E., Plaut, R.L., and Padilha, A.F., "Chi-phase precipitation in a duplex stainless steel", *Materials Characterization*, Vol. 60, No. 11, pp. 1214-1219, 2009.
- [49] Weibull, I., "Duplex stainless steels and their application, particularly in centrifugal separators, Part B: Corrosion resistance", *Materials & Design*, Vol. 8, No. 2, pp. 82-88, 1987.
- [50] Nelson, D.E., Baeslack-III, W.A., and Lippold, J.C., "Characterization of the weld structure in a duplex stainless steel using color metallography", *Metallography*, Vol. 18, No. 3, pp. 215-225, 1985.
- [51] Weber, L. & Uggowitzer, P.J., "Partitioning of chromium and molybdenum in super duplex stainless steels with respect to nitrogen and nickel content", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 242, No. 1-2, pp. 222-229, 1998.
- [52] Kurka, V., Machovcak, P., Liska, M., and Michalek, K., "Research and development of two-phase Cr-Ni-Mo high alloyed stainless steel", *Metal*, Vol. 18, pp. 335-341, 2010.
- [53] Perren, R.A., Suter, T., Solenthaler, C., Gullo, G., Uggowitzer, P.J., Böhni, H., and Speidel, M.O., "Corrosion resistance of super duplex stainless steels in chloride ion containing environments: investigations by means of a new microelectrochemical method: II. Influence of precipitates", *Corrosion Science*, Vol. 43, No. 4, pp. 727-745, 2001.
- [54] Davis, J.R., *Corrosion of weldments*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2006.
- [55] G150-99-R04: Standard test method for electrochemical critical pitting temperature testing of stainless steels, ASTM Standard, 2004.

- [56] G48-03: Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by use of ferric chloride solution, ASTM Standard, 2003.
- [57] *Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steel*, 2<sup>nd</sup> Ed., International Molybdenum Association (IMOA), London, UK, 2009.
- [58] Yushchenko, K.A., Avdeeva, A.K., and Kakhovskii, Y.N., "Current state of the welding of two-phase corrosion-resistant steels", *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 33, No. 5, pp. 595-599, 1997.
- [59] Singh-Raman, R.K. & Siew, W.H., "Role of nitrite addition in chloride stress corrosion cracking of a super duplex stainless steel", *Corrosion Science*, Vol. 52, No. 1, pp. 113-117, 2010.
- [60] El-Yazgi, A.A. & Hardie, D., "Stress corrosion cracking of duplex and super duplex stainless steels in sour environments", *Corrosion Science*, Vol. 40, No. 6, pp. 909-930, 1998.
- [61] Cui, Z.D., Wu, S.L., Zhu, S.L., and Yang, X.J., "Study on corrosion properties of pipelines in simulated produced water saturated with supercritical CO<sub>2</sub>", *Applied Surface Science*, Vol. 252, No. 6, pp. 2368-2374, 2006.
- [62] Smith, L., "A guideline to the successful use of duplex stainless steels for flowlines", *Stainless Steel World; Duplex America 2000 Conference - KCL Publishing BV*, Vol. DA2-102, pp. 1-16, 2000.
- [63] Hussain, E. & Husain, A., "Erosion-corrosion of duplex stainless steel under Kuwait marine condition", *Desalination*, Vol. 183, No. 1-3, pp. 227-234, 2005.
- [64] Bendall, K.C., "Duplex stainless steel in the pulp and paper industry", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 44, No. 3, pp. 170-174, 1997.
- [65] Notten, G., "Application of duplex stainless steel in the chemical process", *Stainless Steel World; 5<sup>th</sup> World Conference on Duplex Stainless Steels 97 - KCL Publishing BV*, Vol. D97- 201, pp. 9-16, 1997.
- [66] Francis, R., Byrne, G., and Warburton, G.R., "Experiences with Zeron 100 super duplex stainless steel in the process industries", *Stainless Steel World: '99 Conference*, Vol. SSW99-007, pp. 613-623, 1999.
- [67] Wang, S.-H., Chiu, P.-K., Yang, J.-R., and Fang, J., "Gamma ( $\gamma$ ) phase transformation in pulsed GTAW weld metal of duplex stainless steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 420, No. 1-2, pp. 26-33, 2006.
- [68] Olsson, J., "Stainless steels for desalination plants", *Desalination*, Vol. 183, No. 1-3, pp. 217-225, 2005.
- [69] Rowe, D., Nelson, T.W., and Lippold, J.C., "Hydrogen-induced cracking along the fusion boundary of dissimilar metal welds", *Welding Journal*, Vol. 78, No. 2, pp. 31s-37s, 1999.
- [70] Pohl, M., Storz, O., and Glogowski, T., "Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel", *Materials Characterization*, Vol. 58, No. 1, pp. 65-71, 2007.
- [71] E562-02: Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count, ASTM Standard, 2002.
- [72] Muthupandi, V., Bala-Srinivasan, P., Seshadri, S.K., and Sundaresan, S., "Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 358, No. 1-2, pp. 9-16, 2003.
- [73] Kotecki, D.J., "A martensite boundary on the WRC-1992 diagram", *Welding Journal*, Vol. 78, No. 5, pp. 180s-192s, 1999.
- [74] Vitek, J.M., David, S.A., and Hinman, C.R., "Improved ferrite number prediction model that accounts for cooling rate effects - Part 1: Model development", *Welding Journal*, Vol. 82, No. 1, pp. 10s-17s, 2003.
- [75] Kannan, T. & Murugan, N., "Prediction of ferrite number of duplex stainless steel clad metals using RSM", *Welding Journal*, Vol. 85, No. 5, pp. 91s-100s, 2006.

- [76] Lundin, C.D., Ruprecht, W., and Zhou, G., Literature review: Ferrite measurement in austenitic and duplex stainless steel castings, Report, 1999.
- [77] Pickering, E.W., Robitz, E.S., Vandergriff, D.M., and Stalmasek, E., *WRC bulletin 318: Factors influencing the measurement of ferrite content in austenitic stainless steel weld metal using magnetic instruments*, Welding Research Council, New York, 1986.
- [78] A4.2-97: Standard procedures for calibrating magnetic instruments to measure the delta ferrite content of austenitic and duplex ferritic-austenitic stainless steel weld metal, ANSI/AWS Standard, 1997.
- [79] Kotecki, D.J. & Siewert, T.A., "WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metals: A modification of the WRC-1988 diagram", *Welding Journal*, Vol. 71, No. 5, pp. 171s-172s, 1992.
- [80] Kotecki, D.J., "A martensite boundary on the WRC-1992 diagram - Part 2: The effect of manganese", *Welding Journal*, Vol. 79, No. 12, pp. 346s-354s, 2000.
- [81] Sato, Y.S., Nelson, T.W., Sterling, C.J., Steel, R.J., and Pettersson, C.O., "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 397, No. 1-2, pp. 376-384, 2005.
- [82] Kurt, B. & Çalik, A., "Interface structure of diffusion bonded duplex stainless steel and medium carbon steel couple", *Materials Characterization*, Vol. 60, No. 9, pp. 1035-1040, 2009.
- [83] Kaçar, R. & Acarer, M., "Microstructure-property relationship in explosively welded duplex stainless steel-steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 363, No. 1-2, pp. 290-296, 2003.
- [84] Liou, H.-Y., Hsieh, R.-I., and Tsai, W.-T., "Microstructure and stress corrosion cracking in simulated heat-affected zones of duplex stainless steels", *Corrosion Science*, Vol. 44, No. 12, pp. 2841-2856, 2002.
- [85] Holmberg, B., "Stainless steels: Their properties and their suitability for welding", *Stainless Steels; AvestaPolarit Welding AB*, pp. 1-7, 2002.
- [86] Garzón, C.M. & Ramirez, A.J., "Growth kinetics of secondary austenite in the welding microstructure of a UNS S32304 duplex stainless steel", *Acta Materialia*, Vol. 54, No. 12, pp. 3321-3331, 2006.
- [87] Murugan, N. & Giridharan, P.K., "Effect of Pulsed Gas Tungsten Arc Welding Process Parameters on Pitting Corrosion Resistance of Type 304L Stainless Steel Welds", *Corrosion*, Vol. 63, No. 5, pp. 433-441, 2007.
- [88] Madadi, F., Ashrafizadeh, F., and Shamanian, M., "Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 510, No. 1, pp. 71-77, 2012.
- [89] Sandvik Materials Technology, "Welding guide for Sandvik duplex stainless steels", 2011, <http://www.svarovacitechnika.cz/pdf/sandvik/katalog2004/katalogy/s-1252-eng2003-duplex.pdf>.
- [90] Sandvik Materials Technology, "Welding guidelines for SAF 2507", 2011, [http://www2.sandvik.com/sandvik/0140/SC/se01396.nsf/266bc9ad3a821442c1256e970030c378/00e519c6c3b18ad5c125722000475909/\\$FILE/Welding%20Guidelines%20SAF%202507,%20rev%201.pdf](http://www2.sandvik.com/sandvik/0140/SC/se01396.nsf/266bc9ad3a821442c1256e970030c378/00e519c6c3b18ad5c125722000475909/$FILE/Welding%20Guidelines%20SAF%202507,%20rev%201.pdf).
- [91] A5.12-98: Specification for tungsten and tungsten alloy electrodes for arc welding and cutting, ANSI/AWS Standard, 1998.
- [92] Barnhouse, E.J. & Lippold, J.C., "Microstructure/property relationships in dissimilar welds between duplex stainless steels and carbon steels", *Welding Journal*, Vol. 77, No. 12, pp. 477s-487s, 1998.
- [93] Kurt, B., "The interface morphology of diffusion bonded dissimilar stainless steel and medium carbon steel couples", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, No. 1-3, pp. 138-141, 2007.

- [94] Wang, S., Ma, Q., and Li, Y., "Characterization of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welded joint between 2205 duplex stainless steel and 16MnR", *Materials & Design*, Vol. 32, No. 2, pp. 831-837, 2011.
- [95] Kannan, T. & Murugan, N., "Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176, No. 1-3, pp. 230-239, 2006.
- [96] Stern, K.H., *Metallurgical and ceramic protective coatings*, Springer, 1996.
- [97] Desale, G.R., Paul, C.P., Gandhi, B.K., and Jain, S.C., "Erosion wear behavior of laser clad surfaces of low carbon austenitic steel", *Wear*, Vol. 266, No. 9-10, pp. 975-987, 2009.
- [98] Nelson, T.W., Lippold, J.C., and Mills, M.J., "Nature and evolution of the fusion boundary in ferritic-austenitic dissimilar weld metals, Part 1: Nucleation and growth", *Welding Journal*, Vol. 78, No. 10, pp. 329s-337s, 1999.
- [99] Nelson, T.W., Lippold, J.C., and Mills, M.J., "nature and evolution of the fusion boundary in ferritic-austenitic dissimilar weld metals, Part 2: On-cooling transformations", *Welding Journal*, Vol. 79, No. 10, pp. 267s-277s, 2000.
- [100] Murugan, N., Parmar, R.S., and Sud, S.K., "Effect of submerged arc process variables on dilution and bead geometry in single wire surfacing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, No. 1-4, pp. 767-780, 1993.
- [101] Vynar, V., Dovhnyk, V., and Student, M., "Methodical specific features of tribocorrosion investigations", *Materials Science*, Vol. 46, No. 5, pp. 633-639, 2011.
- [102] Pokhmurs'kyi, V. & Dovhnyk, V., "Tribocorrosion of stainless steels (review)", *Materials Science*, Vol. 46, No. 1, pp. 87-96, 2010.
- [103] Vignal, V., Mary, N., Ponthiaux, P., and Wenger, F., "Influence of friction on the local mechanical and electrochemical behaviour of duplex stainless steels", *Wear*, Vol. 261, No. 9, pp. 947-953, 2006.
- [104] Bello, J.O., Wood, R.J.K., and Wharton, J.A., "Synergistic effects of micro-abrasion-corrosion of UNS S30403, S31603 and S32760 stainless steels", *Wear*, Vol. 263, No. 1-6, pp. 149-159, 2007.
- [105] Von-der-Ohe, C.B., Johnsen, R., and Espallargas, N., "A multi-degradation test rig for studying the synergy effects of tribocorrosion interacting with 4-point static and cyclic bending", *Wear*, Vol. 271, No. 11-12, pp. 2978-2990, 2011.
- [106] Mischler, S., "Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A comparative evaluation", *Tribology International*, Vol. 41, No. 7, pp. 573-583, 2008.
- [107] Johnson, K.L., *Contact mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, London, New York & New Rochelle, 1987.
- [108] Tribology of materials: Chapter 7 - Contact stresses, 2012, [http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~ltachai/tribology/tribo\\_ch07.pdf](http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~ltachai/tribology/tribo_ch07.pdf).
- [109] Ponthiaux, P., Wenger, F., Drees, D., and Celis, J.P., "Electrochemical techniques for studying tribocorrosion processes", *Wear*, Vol. 256, No. 5, pp. 459-468, 2004.
- [110] García, I., Drees, D., and Celis, J.P., "Corrosion-wear of passivating materials in sliding contacts based on a concept of active wear track area", *Wear*, Vol. 249, No. 5-6, pp. 452-460, 2001.
- [111] Watson, S.W., Friedersdorf, F.J., Madsen, B.W., and Cramer, S.D., "Methods of measuring wear-corrosion synergism", *Wear*, Vol. 181-183, Part 2, pp. 476-484, 1995.
- [112] Mischler, S., Spiegel, A., and Landolt, D., "The role of passive oxide films on the degradation of steel in tribocorrosion systems", *Wear*, Vol. 225-229, Part 2, No. 0, pp. 1078-1087, 1999.

- [113] Stemp, M., Mischler, S., and Landolt, D., "The effect of mechanical and electrochemical parameters on the tribocorrosion rate of stainless steel in sulphuric acid", *Wear*, Vol. 225, pp. 466–475, 2003.
- [114] Mischler, S., Spiegel, A., Stemp, M., and Landolt, D., "Influence of passivity on the tribocorrosion of carbon steel in aqueous solutions", *Wear*, Vol. 251, No. 1–12, pp. 1295-1307, 2001.
- [115] D'Oliveira, A.S.C.M., Paredes, R.S.C., and Santos, R.L.C., "Pulsed current plasma transferred arc hardfacing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, No. 2, pp. 167-174, 2006.
- [116] Yousefieh, M., Shamanian, M., and Saatchi, A., "Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, No. 3, pp. 782-788, 2011.
- [117] Goupy, J. & Creighton, L., *Introduction to design of experiments with JMP examples*, 3<sup>rd</sup> Ed., SAS Institute, Cary, North Carolina, 2007.
- [118] *ASM metal handbook, Vol. 9: Metallography and microstructures*, ASM International, 2004.
- [119] E290-97a: Standard test methods for bend testing of material for ductility, ASTM Standard, 2004.
- [120] Dowling, N.E., *Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*, 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice Hall, 1999.
- [121] A370-03a: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, ASTM Standard, 2003.
- [122] E23-02a: Standard test Methods for notched bar impact testing of metallic materials, ASTM Standard, 2002.
- [123] G5-94-R04: Standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements, ASTM Standard, 2004.
- [124] G61-86-R03: Standard test method for conducting cyclic potentiodynamic polarization measurements for localized corrosion susceptibility of iron-, nickel-, or cobalt-based alloys, ASTM Standard, 2003.
- [125] Guñón-Pina, V., Igual-Muñoz, A., and García-Antón, J., "Influence of pH on the electrochemical behaviour of a duplex stainless steel in highly concentrated LiBr solutions", *Corrosion Science*, Vol. 53, No. 2, pp. 575-581, 2011.
- [126] Ovarfort, R., "New electrochemical cell for pitting corrosion testing", *Corrosion Science*, Vol. 28, No. 2, pp. 135-140, 1988.
- [127] Mischler, S. & Ponthiaux, P., "A round robin on combined electrochemical and friction tests on alumina/stainless steel contacts in sulphuric acid", *Wear*, Vol. 248, No. 1–2, pp. 211-225, 2001.
- [128] Silva, R.C.C., Nogueira, R.P., and Bastos, I.N., "Tribocorrosion of UNS S32750 in chloride medium: Effect of the load level", *Electrochimica Acta*, Vol. 56, No. 24, pp. 8839-8845, 2011.
- [129] Bi, Q., Liu, W., Ma, J., Yang, J., Pu, Y., and Xue, Q., "Tribocorrosion behavior of Ni-17.5Si-29.3Cr alloy in sulfuric acid solution", *Tribology International*, Vol. 42, No. 7, pp. 1081-1087, 2009.
- [130] Davis, J.R., *ASM specialty handbook: Stainless steels*, Asm International, Materials Park, Ohio, 1994.
- [131] Kangas, P., Walden, B., Berglund, G., and Nicholls, M., EP 94919946 A: Ferritic-austenitic stainless steel and use of the steel, Sandvik Aktiebolag, European Patent Office, pp. 5-6, 1996.
- [132] Pal, K. & Pal, S., "Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding: A review", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, No. 6, pp. 918-931, 2011.

- [133] Yang, Y., Yan, B., Li, J., and Wang, J., "The effect of large heat input on the microstructure and corrosion behaviour of simulated heat affected zone in 2205 duplex stainless steel", *Corrosion Science*, Vol. 53, No. 11, pp. 3756-3763, 2011.
- [134] Bhadeshia, H. & Honeycombe, R., *Steels: Microstructure and properties*, 3<sup>rd</sup> Ed., Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2006.
- [135] Smuk, O., *Microstructure and properties of modern P/M super duplex stainless steels*, in *Department of Materials Science and Engineering, Division of Ceramics 2004*, Royal Institute of Technology: Stockholm, Sweden.
- [136] Domínguez-Aguilar, M.A. & Newman, R.C., "Detection of deleterious phases in duplex stainless steel by weak galvanostatic polarization in alkaline solution", *Corrosion Science*, Vol. 48, No. 9, pp. 2560-2576, 2006.
- [137] Ndongmouo, U.T. & Hontinfinde, F., "Diffusion and growth on fcc(1 1 0) metal surfaces: A computational study", *Surface Science*, Vol. 571, No. 1-3, pp. 89-101, 2004.
- [138] Chen, L., Tan, H., Wang, Z., Li, J., and Jiang, Y., "Influence of cooling rate on microstructure evolution and pitting corrosion resistance in the simulated heat-affected zone of 2304 duplex stainless steels", *Corrosion Science*, Vol. 58, pp. 168-174, 2012.
- [139] Nillson, J.O., Jonsson, P., and Wilson, A., "Paper 39: Formation of secondary austenite in super duplex stainless steel weld metal and its dependence on chemical composition", *4<sup>th</sup> International Conference "Duplex Stainless Steels 94"*, Vol. 1, pp. Glasgow, Scotland, 1995.
- [140] Garzón, C., Serna, C., Brandi, S., and Ramirez, A., "The relationship between atomic partitioning and corrosion resistance in the weld-heat affected zone microstructures of UNS S32304 duplex stainless steel", *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 21, pp. 9021-9029, 2007.
- [141] Ku, J.S., Ho, N.J., and Tjong, S.C., "Properties of electron beam welded SAF 2205 duplex stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, No. 1-3, pp. 770-775, 1997.
- [142] Khaled, K.F. & Hackerman, N., "Ortho-substituted anilines to inhibit copper corrosion in aerated 0.5 M hydrochloric acid", *Electrochimica Acta*, Vol. 49, No. 3, pp. 485-495, 2004.
- [143] Luo, H., Dong, C.F., Li, X.G., and Xiao, K., "The electrochemical behaviour of 2205 duplex stainless steel in alkaline solutions with different pH in the presence of chloride", *Electrochimica Acta*, Vol. 64, pp. 211-220, 2012.
- [144] Ebrahimi, N., Momeni, M., Kosari, A., Zakeri, M., and Moayed, M.H., "A comparative study of critical pitting temperature (CPT) of stainless steels by electrochemical impedance spectroscopy (EIS), potentiodynamic and potentiostatic techniques", *Corrosion Science*, Vol. 59, pp. 96-102, 2012.
- [145] Growcock, F.B. & Jasinski, R.J., "Time-resolved impedance spectroscopy of mild steel in concentrated hydrochloric acid", Vol. 136, No. 8, pp. 2310-2314, 1989.
- [146] Popova, A., Sokolova, E., Raicheva, S., and Christov, M., "AC and DC study of the temperature effect on mild steel corrosion in acid media in the presence of benzimidazole derivatives", *Corrosion Science*, Vol. 45, No. 1, pp. 33-58, 2003.
- [147] Celis, J.P., Ponthiaux, P., and Wenger, F., "Tribo-Corrosion of materials: Interplay between chemical, electrochemical, and mechanical reactivity of surfaces", *Wear*, Vol. 261, No. 9, pp. 939-946, 2006.
- [148] Sun, Y. & Haruman, E., "Effect of electrochemical potential on tribocorrosion behavior of low temperature plasma carburized 316L stainless steel in 1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, No. 17-18, pp. 4280-4290, 2011.
- [149] Chen, J., Yan, F.Y., Chen, B.B., and Wang, J.Z., "Assessing the tribocorrosion performance of Ti-6Al-4V, 316 stainless steel and Monel K500 alloys in artificial seawater", *Materials and Corrosion*. DOI: 10.1002/maco.2011062492011.



- [150] Martin, É., Azzi, M., Salishchev, G.A., and Szpunar, J., "Influence of microstructure and texture on the corrosion and tribocorrosion behavior of Ti-6Al-4V", *Tribology International*, Vol. 43, No. 5-6, pp. 918-924, 2010.
- [151] Landolt, D., *Corrosion and surface chemistry of metals*, Taylor & Francis, 2007.
- [152] Muñoz, A.I. & Julián, L.C., "Influence of electrochemical potential on the tribocorrosion behaviour of high carbon CoCrMo biomedical alloy in simulated body fluids by electrochemical impedance spectroscopy", *Electrochimica Acta*, Vol. 55, No. 19, pp. 5428-5439, 2010.
- [153] BS EN 10088-2:2005, "Stainless steels: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes", British-Adopted European Standard, 2005.
- [154] Kubecka, P., Wenger, F., Hyspecka, L., Ponthiaux, P., and Galland, J., "Tribocorrosion Tests Of Duplex Stainless Steels 2205 ", *Acta Metallurgica Slovaca*, No. 2, pp. 93-102, 1999.
- [155] Do-Nascimento, A.M., Ocelík, V., Ierardi, M.C.F., and De-Hosson, J.M., "Microstructure of reaction zone in WC<sub>p</sub>/duplex stainless steels matrix composites processing by laser melt injection", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, No. 10, pp. 2113-2120, 2008.

# Cladding of Super Duplex Stainless Steel on High Strength Low Alloy Steel Substrate Using Gas-Tungsten Arc Welding Process and Evaluation of Its Tribocorrosion Behavior

Abbas Eghlimi

abbas.eghlimi@gmail.com

September 22, 2012

Department of Materials Engineering

Isfahan University of Technology 84156 - 83111, Isfahan, Iran

Degree: M.Sc

Language: Farsi

Dr. Morteza Shamanian, Associate Professor (Supervisor), E-mail: shamanian@cc.iut.ac.ir

Dr. Keyvan Raeissi, Associate Professor (Supervisor), E-mail: k\_raeissi@cc.iut.ac.ir

## Abstract:

High strength low alloy (HSLA) steels have higher strength and corrosion resistance with respect to plain carbon steels, but they are vulnerable to corrosive ions such as chloride present in seawater. On the other hand, super duplex stainless steels have acceptable mechanical properties and corrosion resistance, particularly pitting corrosion and stress corrosion cracking in environments containing chloride ions. Due to the combination of high strength and high corrosion resistance, these steels have been used in various applications. Super duplex stainless steels used mainly in fabricating of centrifugal separators which are constantly exposed to abrasive corrosion and tribocorrosion. So, cladding HSLA steels with super duplex stainless steels can be a reasonable method for manufacturing centrifugal separators with lower cost. By reviewing the literature, it is evident that few attempts have been made to clad duplex stainless steels on plain carbon or high strength low alloy steels, and none of them - despite the accurate control of heat input in gas tungsten arc welding process (GTAW) – has been attributed to GTAW. Also, using pulsed current in cladding – and welding - of duplex stainless steels has not been investigated thoroughly yet. So, in this study, after optimizing the cladding process using pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) method with response surface methodology (RSM), the effect of pulsed current on the corrosion and tribocorrosion properties of clad metals was investigated. In this way, the X-ray diffraction (XRD) was used to determine the present phases in the clad metal, optical and scanning electron microscopes were used to investigate the microstructure, potentiodynamic and cyclic polarization were used to examine the corrosion behavior, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) was used to determine corrosion mechanism, and tribocorrosion tests in open circuit potential (OCP), anodic polarization, and cathodic polarization were used to assess the tribocorrosion behavior of clad metals. XRD results showed that ferrite and austenite were the only phases present in the clad metals. Microstructural investigation showed that despite the fact that only ferrite and austenite phases were formed in constant and pulsed current cladding, using pulsed current was caused the formation of secondary austenite. The presence of secondary austenite along with widmanstatten morphology of ferrite and austenite in the microstructure of sample produced by pulsed current resulted in significant increase in corrosion rate and passivation current density in potentiodynamic polarization test. Also, the larger hysteresis loop of sample produced by pulsed current in the cyclic polarization test confirmed the greater sensitivity of this sample to pitting corrosion. EIS results indicated that the films formed on the surface of both samples were flawed and non-ideal. Polarization resistance obtained after modeling with equivalent circuit in EIS test showed that polarization resistance of pulsed current clad sample was lower. Results of tribocorrosion tests show that corrosion accelerated wear was the dominant mechanism of destruction in both samples, but the total amount of volume loss in the anodic polarization test of pulsed current clad sample was about five times higher than constant current clad sample. This was attributed to higher passivation current density of pulsed current clad sample.

**Key Words:** High Strength Low Alloy Steel, Super Duplex Stainless Steel, Cladding, Corrosion, Tribocorrosion



**Isfahan University of Technology**  
Department of Materials Engineering

# **Cladding of Super Duplex Stainless Steel on High Strength Low Alloy Steel Substrate Using Gas-Tungsten Arc Welding Process and Evaluation of Its Tribocorrosion**

A Thesis  
submitted in partial fulfillment of the requirements  
for the degree of Master of Science

**By**  
**Abbas Eghlimi**

Evaluated and Approved by the following Thesis Committee, on September 22, 2012:

1. Dr. Morteza Shamanian, Associate Professor (Supervisor)
2. Dr. Keyvan Raeissi, Associate Professor (Supervisor)
3. Dr. Mohammad Ali Golozar, Professor (Examiner)
4. Dr. Hamid Reza Salimi Jazi, Assistant Professor (Examiner)

Department Graduate Coordinator: Dr. Keyvan Raeissi