

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

**بررسی رفتار خوردگی مقاطع جوش فولاد زنگ‌نزن دوفازی کم‌آلیاژ  
GOST ۵۶۳۲ پس از فرایند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی**

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد - خوردگی و حفاظت از مواد

**حسین سرلک**

استاد راهنما

**دکتر مسعود عطاپور**



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته خوردگی و حفاظت از مواد آقای حسین سرلک

تحت عنوان

بررسی رفتار خوردگی مقاطع جوش فولاد زنگ نزن دوفازی کم آلیاژ  
GOST ۵۶۳۲ پس از فرایند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی

در تاریخ ۱۳۹۳/۹/۲۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر مسعود عطاپور

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر محمدعلی گلعداز

۲- استاد داور

دکتر عبدالمجید اسلامی

۳- استاد داور

دکتر کیوان رئیسی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

## مشکر و قدردانی

سپاس بیکران پروردگاری که به حرزبانی مذکور است و به حر احسانی مشکور و به حر مکانی معبود، خداوندی که ما را به طریق علم و دانش رهنمون ساخت، به ہمیشگی رحروان علم و دانش مفتخرمان نمود و نوشته چینی از علم و معرفت را روزی جان قرار داد.

خدای را بی شکر کم که از روی لطف و کرم، پدر و مادری فداکار و همسری مهربان نصیبم کرده تا در راه کسب علم و دانش یار و یاورم باشند. عزیزانی که وجودشان تاج افتخاری است بر سرم، نشان دلیلی است بر بودنم و تا ابد پاسگزارشان خواهیم بود.

خالصانه ترین سپاس با تقدیم به استاد جناب آقای دکتر عطا پور که با آراش و حضور همیشگی شان، راهنمایی و هدایت این پیمان نامه را بر عهده داشتند. مشکر می کنم از اساتید گرامی جناب آقایان دکتر کعبه زار و دکتر اسلامی که زحمت بازخوانی و داوری این پیمان نامه را قبول فرمودند. همچنین از اساتید بزرگوار دانشکده مواد، جناب آقایان دکتر سعیدی، دکتر اشرفی زاده، دکتر صالحی، دکتر رینی، دکتر اشرفی و سایر بزرگوارانی که افتخار نگار دیشان را دوشم کمال قدردانی را دارم. از جناب آقایان دکتر شمعانیان، دکتر توحید سعید، مهندس اسمعیل زاده، مهندس کارگر و از مسئولین آزمایشگاه با به ویژه جناب آقایان مهندس خرمند، مهندس رحیم زاده و مهندس عربیان به خاطر کمک های بی دریغ و خالصانه شان پاسگزارم.

همچنین از تمامی دوستان و همکلاسیان عزیزم کمال مشکر را داشته و از خداوند متعال توفیق روز افزون را برایشان طلب می کنم.

و سرانجام،

با سپاس از حرکتی شایسته تقدیر و مشکر بود و به زبان نیاروم...

حسین سرملک

پاییز ۹۳

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

تقدیم ہے:

پدرم بہ استواری کوه

مادرم بہ زلالی چشمہ

وہم سرم بہ صمیمیت باران

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
سه	فهرست مطالب
پنج	فهرست شکل ها
هفت	فهرست جداول
۱	چکیده
	<b>فصل اول: مقدمه</b>
	<b>فصل دوم: مروری بر مطالب</b>
۵	۱-۲ فولادهای زنگ نزن
۵	۱-۱-۲ معرفی فولادهای زنگ نزن
۶	۲-۱-۲ انواع فولادهای زنگ نزن
۶	۲-۲ فولادهای زنگ نزن دوفازی
۶	۱-۲-۲ معرفی فولادهای زنگ نزن دوفازی
۷	۲-۲-۲ انواع فولادهای زنگ نزن دوفازی
۸	۳-۲-۲ معرفی فولاد زنگ نزن دوفازی کم آلیاژ GOST ۵۶۳۲
۹	۴-۲-۲ خواص فیزیکی فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۲	۵-۲-۲ خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۴	۶-۲-۲ خواص خوردگی فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۵	۳-۲ جوشکاری ذوبی فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۵	۱-۳-۲ متالورژی جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۶	۲-۳-۲ رفتار انجمادی در حین جوشکاری
۱۶	۳-۳-۲ انتخاب مواد اولیه
۱۷	۴-۳-۲ نقش نیتروژن در جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۸	۵-۳-۲ گرمای ورودی و دمای بین پاسی
۱۹	۶-۳-۲ ناحیه متأثر از حرارت
۲۲	۴-۲ جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی
۲۴	۱-۴-۲ پارامترهای فرایند
۲۴	۱-۴-۲ الف-هندسه ابزار
۲۵	۱-۴-۲ ب-پارامترهای جوشکاری
۲۷	۵-۲ خوردگی مقاطع جوش فولادهای زنگ نزن پس از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی
۳۹	۶-۲ جمع بندی و هدف
	<b>فصل سوم: مواد و روش ها</b>
۴۱	۱-۳ مواد مورد استفاده
۴۱	۲-۳ آماده سازی و جوشکاری

۴۲	.....	۳-۳ مشخصه یابی
۴۲	.....	۴-۳ آزمون‌های خوردگی
۴۴	.....	۱-۴-۳ اندازه گیری پتانسیل مدار باز
۴۴	.....	۲-۴-۳ آزمون پلاریزاسیون خطی
۴۴	.....	۳-۴-۳ آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک
۴۴	.....	۴-۴-۳ آزمون پلاریزاسیون چرخه‌ای
۴۴	.....	۵-۴-۳ آزمون آمپر متر با مقاومت داخلی صفر
۴۵	.....	۶-۴-۳ آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی
۴۵	.....	۷-۴-۳ آزمون موت-شاتکی
۴۵	.....	۸-۴-۳ آزمون غوطه‌وری
		<b>فصل چهارم: نتایج و بحث</b>
۴۶	.....	۱-۴ بررسی ریز ساختار
۵۱	.....	۲-۴ بررسی رفتار خوردگی
۵۱	.....	۱-۲-۴ اندازه گیری پتانسیل مدار باز
۵۳	.....	۲-۲-۴ آزمون پلاریزاسیون خطی
۵۴	.....	۳-۲-۴ آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک
۵۷	.....	۴-۲-۴ آزمون پلاریزاسیون چرخه‌ای
۶۲	.....	۵-۲-۴ آزمون آمپر متر با مقاومت داخلی صفر
۶۶	.....	۶-۲-۴ آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی
۷۲	.....	۷-۲-۴ آزمون موت-شاتکی
۷۴	.....	۸-۲-۴ آزمون غوطه‌وری
		<b>فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات</b>
۷۹	.....	۱-۵ نتیجه گیری
۸۱	.....	۲-۵ پیشنهادات
۸۲	.....	مراجع



## فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

- ۱-۲ نمودار WRC-۱۹۹۲ با گستره تقریبی ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ..... ۹
- ۲-۲ ریزساختار ریختگی فولاد زنگ‌نزن دوفازی ..... ۱۰
- ۳-۲ ریزساختار ریختگی فولاد زنگ‌نزن دوفازی ..... ۱۰
- ۴-۲ دماهای بحرانی خوردگی شیاری و حفره‌دار شدن برای فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ..... ۱۵
- ۵-۲ حلالیت نیتروژن در فریت و در آستنیت ..... ۱۷
- ۶-۲ سیکل حرارتی ناحیه متأثر از حرارت نزدیک به خط ذوب فولاد زنگ‌نزن دوفازی با نسبت Creq/Nieq بالا ..... ۱۹
- ۷-۲ ناحیه دما بالای نمودار فازی شبه دوتایی برای ترکیبات فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ..... ۲۱
- ۸-۲ نمودار فازی ترموکالک برای فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ ..... ۲۱
- ۹-۲ تاثیر حرارت ورودی بر رشد دانه فریت ..... ۲۲
- ۱۰-۲ تصویر شماتیک از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی ..... ۲۴
- ۱۱-۲ تصاویر شماتیک از انواع شانه و پین ..... ۲۵
- ۱۲-۲ ریزساختار مناطق مختلف جوش اصطکاکی-اغتشاشی در SAF ۲۲۰۵ ..... ۲۶
- ۱۳-۲ تصاویر میکروسکوپی نوری از اندازه دانه ناحیه اغتشاش در سرعت‌های مختلف جوشکاری ..... ۲۷
- ۱۴-۲ سطح مقطع و تصاویر نوری پس از آزمون محلول اسید سولفوریک-سولفات مس ..... ۲۸
- ۱۵-۲ سطح مقطع عمود بر مسیر جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی پس از آزمون محلول اسید سولفوریک-سولفات آهن ... ۲۹
- ۱۶-۲ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مناطق مختلف نشان داده شده در شکل ۱۵-۲ ..... ۲۹
- ۱۷-۲ سطح مقطع جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی در زیر آب با سرعت چرخش ۴۰۰ rpm ..... ۳۰
- ۱۸-۲ سطح مقطع جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی در زیر آب با سرعت چرخش ۵۰۰ rpm ..... ۳۰
- ۱۹-۲ نمودارهای پلاریزاسیون چرخه‌ای فلز پایه و جوش فولادهای UNS S۳۲۷۶۰ و UNS S۳۲۷۵۰ ..... ۳۱
- ۲۰-۲ نرخ جریان بازگشتی و نرخ خوردگی در فلز پایه، ناحیه اغتشاش و ناحیه متأثر از حرارت ..... ۳۲
- ۲۱-۲ سطح مقطع عملیات شده ..... ۳۳
- ۲۲-۲ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مناطق مختلف نشان داده شده در شکل ۲۱-۲ ..... ۳۳
- ۲۳-۲ دوره نهفتگی و بیشترین نرخ فرسایش در آزمون‌های خوردگی حبابی ..... ۳۴
- ۲۴-۲ کاهش جرم و نرخ‌های فرسایش در آزمون‌های خوردگی حبابی برای فلز پایه و عملیات شده UNS S۳۲۲۰۵ ..... ۳۴
- ۲۵-۲ نتایج آزمون خوردگی حبابی فولاد عملیات شده و عملیات نشده ..... ۳۵
- ۲۶-۲ تصاویر نوری از فولاد عملیات شده و عملیات نشده ..... ۳۵
- ۲۷-۲ منحنی‌های آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای آلیاژ S۳۲۲۰۵ ..... ۳۶
- ۲۸-۲ منحنی‌های آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای آلیاژ S۳۲۲۰۵ جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی شده ..... ۳۷
- ۲۹-۲ منحنی‌های آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای آلیاژ S۳۲۱۰۵ ..... ۳۸
- ۳۰-۲ منحنی‌های آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی برای آلیاژ S۳۲۱۰۵ جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی شده ..... ۳۹
- ۱-۳ شماتیک از سل سه‌الکترودی مربوط به آزمون آمپر متر با مقاومت داخلی صفر ..... ۴۵

- ۴-۱ مقطع عرضی فولاد زنگ‌نزن دوفازی GOST ۵۶۳۲ پس از جوشکاری اصطکاکی-اغتاشی ..... ۴۶
- ۴-۲ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ..... ۴۷
- ۴-۳ نمودارهای دما-زمان برای سرعت‌های مختلف پیشروی ..... ۴۸
- ۴-۴ الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه‌های جوشکاری ..... ۴۹
- ۴-۵ آنالیز عنصری از ناحیه اغتشاش نمونه ۲ ..... ۵۰
- ۴-۶ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ناحیه ترمومکانیکی نمونه ۳ ..... ۵۱
- ۴-۷ تغییرات پتانسیل مدار باز بر حسب زمان برای نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۵۲
- ۴-۸ پتانسیل مدار باز نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در مقیاس زمان لگاریتمی در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۵۳
- ۴-۹ منحنی‌های پلاریزاسیون خطی نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۵۴
- ۴-۱۰ منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۵۵
- ۴-۱۱ منحنی‌های چگالی جریان-پتانسیل برای نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۵۷
- ۴-۱۲ منحنی‌های پلاریزاسیون چرخه‌ای نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۵۸
- ۴-۱۳ تصاویر میکروسکوپی نوری از همه نمونه‌ها پس از آزمون پلاریزاسیون چرخه‌ای در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۵۸
- ۴-۱۴ منحنی‌های پلاریزاسیون چرخه‌ای همه نمونه‌ها در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار+کلرید سدیم ۰/۱ مولار ..... ۵۹
- ۴-۱۵ تصاویر پس از آزمون پلاریزاسیون چرخه‌ای در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار+کلرید سدیم ۰/۱ مولار ..... ۶۰
- ۴-۱۶ منحنی‌های پتانسیل گالوانیکی و چگالی جریان گالوانیکی برای کوپل ۱ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۶۳
- ۴-۱۷ منحنی‌های پتانسیل گالوانیکی و چگالی جریان گالوانیکی برای کوپل ۲ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۶۳
- ۴-۱۸ منحنی‌های پتانسیل گالوانیکی و چگالی جریان گالوانیکی برای کوپل ۳ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۶۴
- ۴-۱۹ ضریب تراکم بر حسب زمان برای کوپل‌های ۱، ۲ و ۳ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۶۵
- ۴-۲۰ منحنی‌های الف) نایکوئیست ب) باد و ج) باد-فاز نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۶۷
- ۴-۲۱ مدار معادل الکتریکی مورد استفاده برای نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنجی امیدانس الکتروشیمیایی ..... ۶۸
- ۴-۲۲ برازش منحنی‌های الف) نایکوئیست ب) باد و ج) باد-فاز نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۶۹
- ۴-۲۳ مدار معادل رندلز ..... ۷۰
- ۴-۲۴ تغییرات مقاومت و ظرفیت لایه روئین با تغییر اندازه دانه ..... ۷۱
- ۴-۲۵ منحنی‌های موت-شاتکی لایه روئین نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار ..... ۷۲
- ۴-۲۶ تصویر میکروسکوپی نوری از فلز پایه پس از آزمون غوطه‌وری در اسید سولفوریک ۱ مولار ..... ۷۴
- ۴-۲۷ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از همه نمونه‌ها پس از آزمون غوطه‌وری در اسید سولفوریک ۱ مولار ..... ۷۵
- ۴-۲۸ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی در بزرگنمایی بیشتر از همه نمونه‌ها پس از آزمون غوطه‌وری ..... ۷۶
- ۴-۲۹ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ناحیه ترمومکانیکی نمونه ۳ پس از آزمون غوطه‌وری ..... ۷۸

## فهرست جداول

صفحه

عنوان

۷	۱-۲ ترکیب شیمیایی گروهی از فولادهای زنگ‌نزن دوفازی
۸	۲-۲ ترکیب شیمیایی آلیاژ GOST ۵۶۳۲
۱۱	۳-۲ خواص فیزیکی دما بالای فولادهای زنگ‌نزن دوفازی در مقایسه با فولاد کربنی و فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی
۱۲	۴-۲ مقایسه خواص فیزیکی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی با فولاد ساده کربنی و فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی
۱۳	۵-۲ حداقل خواص مکانیکی تعیین شده توسط استانداردهای ASTM و EN برای صفحات فولاد زنگ‌نزن دوفازی
۱۴	۶-۲ مقایسه داکتیلیته فولادهای زنگ‌نزن دوفازی و آستنیتی
۲۴	۷-۲ مزایای کلیدی جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی
۴۱	۱-۳ ترکیب شیمیایی آلیاژ GOST ۵۶۳۲
۴۲	۲-۳ پارامترهای جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی
۴۳	۳-۳ مشخصات محیط‌های استفاده شده برای آزمون‌های خوردگی
۴۷	۱-۴ اندازه دانه فازهای آستنیت و فریت فلز پایه و مراکز نواحی اغتشاش شرایط مختلف جوشکاری
۵۴	۲-۴ ضرایب تافل و چگالی جریان خوردگی بر اساس آزمون پلاریزاسیون خطی
۵۶	۳-۴ پتانسیل خوردگی و چگالی جریان خوردگی استخراج شده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک
۶۰	۴-۴ پتانسیل حفره‌دار شدن و پتانسیل حفاظت همه نمونه‌ها در اسید سولفوریک ۰/۱ مولار+کلرید سدیم ۰/۱ مولار
۶۴	۵-۴ ارتباط نوع خوردگی با مقادیر مختلف ضریب تراکم
۷۱	۶-۴ مقادیر المان‌های به دست آمده از مدار معادل (شکل ۴-۲۱)
۷۳	۷-۴ شیب منحنی‌های موت-شاتکی و مقادیر چگالی دهنده‌های الکترونی

## چکیده

در این پژوهش به بررسی رفتار خوردگی فولاد زنگ‌نزن دوفازی کم‌آلیاژ GOST ۵۶۳۲ پس از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی پرداخته شده است. برای این منظور، آلیاژ مذکور در سرعت چرخشی ثابت ۸۰۰ rpm و سرعت‌های مختلف پیشروی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min جوشکاری شد. ریزساختار همه نمونه‌ها با استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس (EDS) مورد مطالعه قرار گرفت. رفتار خوردگی نمونه‌ها با استفاده از آزمون‌های اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز (OCP)، پلاریزاسیون خطی، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، پلاریزاسیون چرخه‌ای، آمپر متر با مقاومت داخلی صفر (ZRA)، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)، موت-شاتکی و غوطه‌وری بررسی شد. آزمون پلاریزاسیون چرخه‌ای در محلول اسید سولفوریک ۰/۱ مولار+کلرید سدیم ۰/۱ مولار استفاده شد. آزمون غوطه‌وری به منظور بررسی رفتار خوردگی نواحی مختلف جوش و در محلول اسید سولفوریک ۱ مولار انجام شد. از آزمون آمپر متر با مقاومت داخلی صفر به منظور بررسی خوردگی گالوانیکی بین فلز پایه و نمونه‌های حاصل از جوشکاری بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که پس از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی هیچ‌گونه فاز مضر تشکیل نشده است و این روش موجب کاهش اندازه دانه فازهای فریت و آستنیت شده است. آزمون‌های اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز، پلاریزاسیون خطی، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و غوطه‌وری نشان دادند که فلز پایه نسبت به همه نمونه‌های حاصل از جوشکاری مقاومت به خوردگی کمتری دارد. آزمون پلاریزاسیون چرخه‌ای در محلول اسید سولفوریک ۰/۱ مولار+کلرید سدیم ۰/۱ مولار نشان داد که فلز پایه و نمونه‌های جوشکاری دارای حلقه هیستریزس مثبت می‌باشند. از آزمون آمپر متر با مقاومت داخلی صفر نتیجه‌گیری شد که در کوپل‌های تشکیل شده بین فلز پایه و نمونه‌های مختلف جوش، این فلز پایه بود که در نقش آند ظاهر و خورده شد. از آزمون موت-شاتکی مشاهده شد که عیوب نقطه‌ای موجود در لایه رویین برای نمونه‌های جوش بسیار کمتر از فلز پایه می‌باشد. در کل، نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش سرعت پیشروی در سرعت چرخشی ثابت موجب کاهش اندازه دانه و به دنبال آن پایداری بیشتر لایه رویین و بهبود مقاومت به خوردگی نمونه‌های جوشکاری شده نسبت به فلز پایه می‌شود.

## کلمات کلیدی

جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، فولاد زنگ‌نزن دوفازی کم‌آلیاژ، رفتار خوردگی

## فصل اول

### مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن از مهم‌ترین مواد مهندسی هستند که به طور وسیع در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. در میان فولادهای زنگ‌نزن، فولادهای زنگ‌نزن دوفازی به علت دارا بودن خواص مطلوب هر دو نوع فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فریتی نظیر استحکام کششی بالا، چقرمگی در دماهای پایین و مقاومت به خوردگی عالی مخصوصاً در برابر خوردگی تنشی (SCC)<sup>۱</sup> در محیط‌های کلریدی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. این فولادها دارای فازهای فریت و آستنیت با مقادیر برابر می‌باشند. فولادهای زنگ‌نزن دوفازی، بر اساس عدد معادل مقاومت به حفره‌دار شدن (PREN)<sup>۲</sup> به سه دسته کلی کم‌آلیاژ<sup>۳</sup>، آلیاژمتوسط<sup>۴</sup> و پرآلیاژ (فولاد زنگ‌نزن سوپر دوفازی) دسته‌بندی می‌شوند که PREN دسته کم‌آلیاژ، کمتر از ۳۲ می‌باشد. فولادهای زنگ‌نزن دوفازی کم‌آلیاژ به دلایلی همچون استحکام بالاتر در مقایسه با فولادهای زنگ‌نزن فریتی و آستنیتی که سبب کاهش وزن سازه می‌شود، و همچنین ارزان‌تر بودن آنها به علت اصلاح ترکیب شیمیایی این مواد (نیکل کم و مولیبدن زیاد)، مورد استفاده وسیعی قرار گرفته‌اند [۱ و ۲].

یکی از انواع فولادهای زنگ‌نزن دوفازی کم‌آلیاژ، فولاد GOST ۵۶۳۲ با استاندارد ISO ۱۷۲۵۴ می‌باشد. این آلیاژ از نوع آستنیتی-فریتی بوده و دارای خواص ماشینکاری خوبی نیز می‌باشد و در مخازن خنک‌کننده رآکتورها، مخازن مورد استفاده در صنایع شیمیایی و غذایی کاربرد دارد. این فولاد برای ساخت ابزارآلات صنایع شیمیایی و غذایی که نیاز به مقاومت به خوردگی در قطعات جوشکاری است، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

با وجود کاربردهای وسیع فولادهای زنگ‌نزن دوفازی کم‌آلیاژ، جوشکاری ذوبی این مواد برخی مشکلات نظیر تغییر ریزساختار و تعادل فازی، کاهش خواص مکانیکی، تشکیل ترک‌های ناشی از انجماد، تسریع تردی هیدروژنی<sup>۵</sup> و همچنین تشکیل فازهای ترد بین‌فلزی را موجب می‌شود. مقادیر فریت بیشتر و دانه‌های درشت‌تر از دیگر رویدادهای

<sup>۱</sup> Stress Corrosion Cracking

<sup>۲</sup> Pitting Resistance Equivalent Number

<sup>۳</sup> Lean

<sup>۴</sup> Intermediate Alloy

<sup>۵</sup> Hydrogen Cracking

ناخوشایند می‌باشند که هم مقاومت به خوردگی و هم خواص مکانیکی اتصال جوش داده شده را کاهش می‌دهند. از سوی دیگر، رشد دانه‌های ناحیه جوش و اکسیداسیون سطحی از مشکلات خیلی جدی در حین جوشکاری ذوبی مرسوم فولادهای زنگ‌نزن دوفازی می‌باشد. یکی از روش‌های پیشگیری از این مشکلات، استفاده از تکنولوژی جوشکاری حالت جامد است.

جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی (FSW)<sup>۱</sup> یک فرایند اتصال حالت جامد می‌باشد که توسط انجمن جوشکاری انگلستان (TWI)<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۱ ابداع و توسعه یافت. جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی همراه با ذوب و انجماد نیست و منجر به کاهش تشکیل تخلخل و استحاله‌های فازی مضر در حین فرایندهای جوشکاری، تغییر شکل پلاستیک شدید و افزایش دمای ناحیه اغتشاش و اطراف آن می‌شود. این فرایند باعث تغییر قابل ملاحظه ریزساختار شده و جنبه‌های مختلف اندازه دانه، نوع مرزدانه، انحلال یا درشت شدن رسوبات و فروپاشی یا توزیع مجدد بافت را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

در ابتدا، جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی محدود به مواد با دمای ذوب پایین از قبیل آلایزهای آلومینیوم بود [۴]. اما، اخیراً مطالعاتی درباره جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی صورت گرفته است. این تحقیقات نشان می‌دهند که جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی می‌تواند جوش‌هایی بدون عیب در آلایزهای زنگ‌نزن دوفازی SAF ۲۵۰۷ [۴]، SAF ۲۲۰۵ [۵] و LDSS<sup>۳</sup> [۱] ایجاد کند. این محققین گزارش کردند که جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی منجر به بازیابی دانه‌ها در ناحیه اغتشاش فولادها شده است. بیشینه دما و حرارت ورودی با افزایش سرعت جوشکاری کاهش می‌یابد و سرعت‌های جوشکاری بالاتر به تشکیل دانه‌های ریزتر فریت و آستنیت در ناحیه اغتشاش منجر می‌شود. گزارش شده است که حرارت ورودی بیشتر در سرعت جوشکاری کمتر و پایداری فریت در دماهای بالا از دلایل عمده رشد دانه‌های فاز فریت می‌باشند.

انتظار می‌رود که مناطق مختلف جوش به علت مشخصات ریزساختاری متمایز، مقاومت به خوردگی متفاوتی داشته باشند. درباره رفتار خوردگی فولادها پس از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، تحقیقات اندکی صورت گرفته است. اخیراً مطالعاتی در مورد بررسی رفتار خوردگی مقاطع حاصل از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴L [۶-۸]، فولادهای زنگ‌نزن فریتی ۴۰۹L [۹] و ۴۰۹M [۱۰] انجام شده است. در مورد فولادهای زنگ‌نزن دوفازی هم رفتار خوردگی فولادهای UNS S۳۲۷۵۰ و UNS S۳۲۷۶۰ [۱۱] پس از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی بررسی گردیده و مشخص شده که مقاومت به خوردگی مقاطع جوش مشابه با فلز پایه است. همچنین گزارش شده است که مقاومت به حفره‌دار شدن فولادهای مذکور پس از جوشکاری هیچ‌گونه تغییری نکرده است. نتایج تحقیق دیگری که روی فولادهای UNS S۳۲۲۰۵ و UNS S۳۲۱۰۱ [۱۲] پس از فرایند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی انجام شد نشان داد که مقاومت به خوردگی فولاد S۳۲۲۰۵ پس از جوشکاری افزایش ولی برای فولاد S۳۲۱۰۱ کاهش یافته است. علت این امر را به مقدار فاز فریت مربوط دانستند، زیرا که مقدار فریت برای فولاد S۳۲۱۰۱ پس از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی با افزایش مواجه بوده است، اما برای فولاد S۳۲۲۰۵ مقدار این فاز کاهش داشته است.

با توجه به اهمیت جوشکاری ورق‌های فولاد زنگ‌نزن GOST ۵۶۳۲ در مخازن خنک‌کننده، لزوم بهبود جوشکاری آن‌ها دوچندان شده است. با توجه به صرفه اقتصادی و طراحی نسبتاً راحت‌تر برای بهبود خواص ناحیه جوش نسبت به

<sup>۱</sup> Friction Stir Welding

<sup>۲</sup> The Welding Institute

<sup>۳</sup> Lean Duplex Stainless Steel

روش‌هایی نظیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری، انتخاب و اعمال روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی برای این فولاد جهت بهبود خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی منطقی به نظر می‌رسد. مقدار حرارت ورودی در حین جوشکاری به منظور حفظ نسبت تعادلی فریت و آستنیت و عدم تشکیل فازهای مضر خیلی مهم می‌باشد. با توجه به استفاده از آلیاژ GOST ۵۶۳۲ در محیط‌های خورنده نظیر صنایع شیمیایی و صنایع غذایی، مقاومت به خوردگی آن اهمیت بسیار زیادی دارد. با این وجود، در رابطه با تاثیر جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی بر رفتار خوردگی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته است. لذا هدف از این پژوهش، بررسی رفتار خوردگی مقاطع جوش فولاد زنگ‌نزن دوفازی کم آلیاژ GOST ۵۶۳۲ پس از انجام جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی می‌باشد که بدین منظور به ارتباط بین ریزساختار و نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها پرداخته می‌شود. برای این منظور، آلیاژ مذکور در سرعت چرخشی ثابت ۸۰۰ rpm و سرعت‌های مختلف پیشروی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ mm/min جوشکاری شد. ریزساختار همه نمونه‌ها با استفاده از پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، رفتار خوردگی نمونه‌ها با استفاده از آزمون‌های اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز، پلاریزاسیون خطی، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، پلاریزاسیون چرخه‌ای، آمپرمتر با مقاومت داخلی صفر، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، موت-شاتکی و غوطه‌وری بررسی شد.

## فصل دوم

### مروری بر مطالب

#### ۲-۱ فولادهای زنگ‌نزن

##### ۲-۱-۱ معرفی فولادهای زنگ‌نزن

فولادهای زنگ‌نزن، شناخته‌شده و پرکاربردترین مواد برای مقاومت در برابر خوردگی می‌باشند. این فولادها، آلیاژی بر پایه آهن هستند که برای زنگ‌نزن بودن بایستی حاوی حداقل ۰/۵٪ کروم باشند. این میزان کروم باعث تشکیل یک لایه غیرفعال اکسیدی، چسبنده، خودترمیم‌شونده و غنی از کروم روی سطح فلز می‌شود که از خوردگی آن جلوگیری می‌کند. البته باید توجه داشت که بسیاری از فولادهای حاوی ۱۲٪ کروم و یا فولادهایی با میزان کروم بیشتر در محیط‌های به شدت خورنده دچار خوردگی می‌شوند. این موضوع ناشی از آن است که مقداری از کروم به صورت کاربید و یا ترکیبات دیگر در می‌آید و میزان کروم محلول در زمینه کاهش می‌یابد و به کمتر از حد مورد نیاز جهت تشکیل پوسته محافظ اکسیدی پیوسته می‌رسد. برای محافظت در برابر حفره‌دار شدن و زنگ‌زدن در محیط‌های شدیداً خورنده نظیر اتمسفرهای مرطوب یا محیط‌های آلوده و یا در حضور عناصری نظیر کربن، مقادیر بیشتری از کروم بایستی افزوده شود. به فولادهای زنگ‌نزن علاوه بر کروم، عناصر آلیاژی دیگری نظیر نیکل، مس، تیتانیوم، آلومینیوم، سیلیسیم، مولیبدن و نیتروژن به منظور افزایش خواص آنها افزوده می‌شود. همچنین، فولادهای زنگ‌نزن مقاومت خوبی در برابر اکسیداسیون، حتی در دماهای بالا دارند و به همین خاطر به عنوان آلیاژهای مقاوم به حرارت شناخته می‌شوند. مقاومت به اکسیداسیون در دمای بالا نیز به علت میزان بالای کروم فولادهای زنگ‌نزن می‌باشد [۱۳-۱۵].

فولادهای زنگ‌نزن دارای کاربردهای گسترده‌ای از جمله استفاده در عملیات تولید انرژی، صنایع شیمیایی و کاغذسازی، ساخت بسیاری از محصولات تجاری نظیر تجهیزات آشپزخانه و قطعات اتومبیل می‌باشند. همچنین این فولادها به دلیل خلوص بالا، به طور گسترده در کاربردهای استریل مثل فرایندهای داروسازی، تولید لبنیات و صنایع غذایی استفاده می‌شوند [۱۳].



## ۲-۱-۲ انواع فولادهای زنگ‌نزن

فولادهای زنگ‌نزن را می‌توان به پنج گروه اصلی که در ذیل آمده تقسیم‌بندی نمود:

- ۱) فولادهای زنگ‌نزن فریتی (۴XX)
- ۲) فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی (۲XX و ۳XX)
- ۳) فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی (۴XX)
- ۴) فولادهای زنگ‌نزن دوفازی (آستنیتی-فریتی)
- ۵) فولادهای زنگ‌نزن رسوب سخت شونده (PH)<sup>۱</sup>

برخلاف سایر مواد که دسته‌بندی آن‌ها معمولاً براساس ترکیب شیمیایی صورت می‌گیرد، دسته‌بندی فولادهای زنگ‌نزن براساس فازهای متالورژیکی می‌باشد که چهار گروه اول بر همین اساس می‌باشند و گروه پنجم شامل فولادهایی است که با کمک عملیات حرارتی پیرسازی و ایجاد رسوب‌های استحکام دهنده در زمینه استحکام می‌یابند [۱۳ و ۱۶]. سه فاز اصلی در فولادهای زنگ‌نزن، فریت، آستنیت و مارتنزیت است و این فازها با تنظیم مناسب ترکیب شیمیایی فولاد حاصل می‌شوند. گروه‌های مختلف فولادهای زنگ‌نزن دارای خواص مختلفی هستند. برای مثال، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، غیرمغناطیس هستند اما انواع مارتنزیتی و فریتی، فرومغناطیس می‌باشند [۱۴]. انجمن آهن و فولاد آمریکا (AISI)<sup>۲</sup> از سیستمی با سه شماره که گاهی با یک حرف نیز همراه است برای تعیین نوع فولاد زنگ‌نزن استفاده می‌کند [۱۳]. روش دسته‌بندی در استانداردهایی مانند استاندارد روسی متفاوت است و آلیاژی‌هایی در این استاندارد وجود دارد که معادل آن‌ها در استانداردهای دیگر نمی‌باشد. یکی از گروه‌های شناخته‌شده در استاندارد روسی گروه GOST ۵۶۳۲ می‌باشد که شامل آلیاژهای مقاوم به حرارت با ساختارهای آستنیتی و دوفازی است. در این میان فولادهای دوفازی به دلیل خواص ویژه، کاربردهای خاصی دارند.

## ۲-۲ فولادهای زنگ‌نزن دوفازی

### ۲-۲-۱ معرفی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی

فولادهای زنگ‌نزن دوفازی از دهه ۱۹۳۶ شناخته شده‌اند [۱۳] و دارای دو فاز آستنیت و فریت با درصدهای تقریباً یکسان هستند. بنابراین، این فولادها خواص مفید هر دو نوع فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و فریتی نظیر استحکام کششی و خستگی بالا، چقرمگی خوب حتی در دماهای پایین، شکل‌پذیری و جوش‌پذیری مناسب و مقاومت عالی در برابر خوردگی تنش، خوردگی حفره ای و خوردگی یکنواخت را دارا هستند [۱۷]. استحکام بالا و مقاومت به خوردگی موضعی این فولادها ناشی از فاز فریت است، در حالی که حضور فاز آستنیت باعث افزایش داکتیلیته و مقاومت به خوردگی یکنواخت آن‌ها می‌گردد [۵]. چون فولادهای زنگ‌نزن دوفازی نسبت به فولادهای آستنیتی مقدار فریت بیشتری دارند، بیشتر فرومغناطیس هستند و هدایت حرارتی بیشتر و انبساط حرارتی کمتری دارند. این فولادها در کاربردهایی استفاده می‌شوند که از مقاومت به خوردگی عالی، استحکام و یا هر دوی آن‌ها بهره برده شود [۱۳]. آن‌ها نسبت به فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، مقاومت بیشتری به خوردگی تنش داشته و استحکام بالاتری از خود نشان می‌دهند. این مزیت‌ها و عوامل مثبت دیگر، باعث استفاده وسیع از فولادهای زنگ‌نزن دوفازی در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی و کاغذسازی شده است [۴]. ترکیب شیمیایی این فولادها در استانداردهای مختلف کمی متفاوت است اما

<sup>۱</sup> Precipitation-Hardenable  
<sup>۲</sup> American Iron and Steel Institute

عموماً این فولادها دارای ۲۰ تا ۳۰ درصد وزنی کروم و ۴ تا ۸ درصد وزنی نیکل می‌باشند [۲]. در جدول ۱-۲ ترکیب شیمیایی گروهی از فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ارائه شده است.

جدول ۱-۲. ترکیب شیمیایی گروهی از فولادهای زنگ‌نزن دوفازی [۲].

Tradename	Producer	Standard	Cr	Mo	Ni	N	Other elements	PREN
SAF 2304	Sandvik, Avesta	UNS S 32304	23	0.2	4.0	0.10		25
UR 35N	Creusot-Loire	UNS S 32304	23	0.2	4.0	0.10		25
UR 45N	Creusot-Loire	UNS S 31803	22	3.0	5.3	0.17		35
SAF 2205	Sandvik, Avesta	UNS S 31803	22	3.0	5.3	0.17		35
FALC 223	Krupp Stahl	UNS S 31803	22	3.0	5.3	0.17		35
DP 3	Sumitomo	UNS S 31260	25	3.0	6.5	0.16	0.5 Cu, 0.3 W	37
UR 52N	Creusot-Loire	UNS S 32550	25	3.0	6.5	0.18	1.6 Cu	38
Zeron 100	Weir	UNS S 32760	25	3.6	7.0	0.25	0.7 Cu, 0.7 W	41
UR 52N+	Creusot-Loire	UNS S 32550	25	3.8	6.0	0.26	1.5 Cu	42
SAF 2507	Sandvik, Avesta	UNS S 32750	25	3.8	7.0	0.27		42

در فولادهای زنگ‌نزن اعم از فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و دوفازی، مقاومت به حفره‌دار شدن در اصل تابعی از ترکیب شیمیایی می‌باشد و روابط مختلف عدد معادل مقاومت به حفره‌دار شدن برای نمایش این اثر گسترش یافته است. رایج‌ترین این روابط در ذیل آمده است [۱۳ و ۱۸]:

$$PREN = \%Cr + 3.3 \times (\%Mo + 0.5 \times \%W) + 16 \times (\%N) \quad (۱-۲)$$

همان‌طور که در جدول ۱-۲ مشاهده می‌شود، عدد PREN برای انواع فولادهای زنگ‌نزن دوفازی متفاوت است.

### ۲-۲-۲ انواع فولادهای زنگ‌نزن دوفازی

برای فولادهای زنگ‌نزن دوفازی دسته‌بندی‌های مختلفی مطرح شده است، اما به طور کلی و به صورت سنتی بر اساس عدد معادل مقاومت به حفره‌دار شدن به سه دسته کم‌آلیاژ، آلیاژمتوسط و پرآلیاژ یا سوپر دوفازی تقسیم می‌شوند [۱ و ۲]. از سوی دیگر، توسعه فولادهای زنگ‌نزن دوفازی همچنان ادامه دارد به طوری که فولادهای دوفازی نوین را می‌توان به پنج دسته تقسیم کرد:

۱) فولادهای زنگ‌نزن دوفازی کم‌آلیاژ مانند ۲۳۰۴، که در این نوع مولیبدن به طور عمدی و پیش‌بینی شده اضافه نمی‌شود؛

۲) فولادهای زنگ‌نزن دوفازی استاندارد مانند ۲۲۰۵، که بیش از ۸۰ درصد از کاربرد فولادهای دوفازی مربوط به این نوع است؛

- ۳) فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ۲۵ درصد کروم<sup>۱</sup>، مانند آلیاژ ۲۵۵ با PREN کمتر از ۴۰؛
- ۴) فولادهای زنگ‌نزن سوپر دوفازی (PREN بین ۴۰ تا ۴۵)، با ۲۵-۲۶ درصد کروم و مقادیر بیشتری از مولیبدن و نیتروژن در مقایسه با انواع ۲۵ درصد کروم، مانند ۲۵۰۷؛
- ۵) فولادهای زنگ‌نزن فرا دوفازی<sup>۲</sup>، این نوع به صورت فولاد زنگ‌نزن دوفازی پرآلیاژ با PREN بیش از ۴۵ تعریف می‌شود [۱۹].

فولادهای زنگ‌نزن دوفازی کم آلیاژ به منظور پر کردن فاصله عملکردی بین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ و فولادهای زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ طراحی شده‌اند. این فولادها نسبت به نوع ۲۲۰۵ دارای مقاومت به خوردگی کمتری می‌باشند، اما نسبت به نوع ۳۱۶ مقاومت به خوردگی و استحکام بالاتری را دارند. فولادهای زنگ‌نزن دوفازی کم آلیاژ به دو دلیل عمده مورد استفاده وسیع قرار می‌گیرند؛ اول، استحکام بالاتر در مقایسه با فولادهای زنگ‌نزن فریتی و آستنیتی که سبب کاهش وزن سازه می‌شود، و دوم، اصلاح ترکیب این مواد و کمتر بودن عناصر گران‌قیمت در ترکیب آنها (نیکل کم و مولیبدن زیاد) که سبب ارزان‌تر شدن آنها شده است. از این رو، آنها جایگزین مناسبی برای فولادهای کم آلیاژ یا ساده کربنی در کاربردهایی که نیاز به ترکیبی از خواص مکانیکی و خوردگی است، به شمار می‌آیند [۱]. کم بودن نیکل و مولیبدن در این فولادها نسبت به دیگر فولادهای زنگ‌نزن دوفازی موجب آهسته‌تر شدن رسوب‌گذاری فازهای بین‌فلزی است. مسئله اصلی در رابطه با فولادهای زنگ‌نزن دوفازی کم آلیاژ، باقیماندن تعادل بین فازهای آستنیت و فریت و همچنین پایداری آستنیت در برابر استحاله مارتنزیتی در طول تغییر شکل است [۲۰].

### ۲-۲-۳ معرفی فولاد زنگ‌نزن دوفازی کم آلیاژ GOST ۵۶۳۲

فولاد زنگ‌نزن دوفازی کم آلیاژ GOST ۵۶۳۲ یکی از محصولات فولادهای دوفازی کشور روسیه می‌باشد. با توجه به گستردگی و تفاوت استانداردها این فولاد معادل DIN نداشته و معادل آن ISO ۱۷۲۵۴ می‌باشد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۲-۲ ارائه شده است [۲۱]. این فولاد با دارا بودن حدود ۲۱ درصد کروم و ۵ درصد نیکل و مقدار بسیار ناچیزی مولیبدن در دسته فولادهای زنگ‌نزن دوفازی کم آلیاژ قرار می‌گیرد. عدد PREN این فولاد در حدود ۲۴ بوده و حداقل مقاومت به خوردگی فولادهای دوفازی را دارا می‌باشد. این نوع فولادها به دو دلیل عمده گسترش یافته‌اند، یکی اصلاح عناصر آلیاژی (نظیر نیکل و مولیبدن) که نتیجه آن کاهش هزینه می‌باشد و دیگری استحکام بالاتر (نسبت به فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی) که اجازه کاهش ضخامت را به ما می‌دهد [۲۲]. این آلیاژ در مخازن خنک‌کننده رآکتورها و برای ساخت ابزارآلات صنایع شیمیایی و غذایی که نیاز به مقاومت به خوردگی در قطعات جوشکاری می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳].

جدول ۲-۲. ترکیب شیمیایی آلیاژ GOST ۵۶۳۲ (درصد وزنی) [۲۱].

Fe	C	Si	Mn	S	Cr	Mo	Ni	W	Ti	Al	Cu
	۰/۰۹-۰/۱۴	۰/۸	۰/۸	۰/۰۳	۲۰-۲۲	۰/۳	۴/۸-۵/۸	۰/۲	۰/۲۵-۰/۵	۰/۰۸	۰/۳

<sup>۱</sup> 25 Cr Duplex  
<sup>۲</sup> Hyper Duplex

### ۲-۲-۴ خواص فیزیکی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی

تأثیر عناصر آلیاژی در فولادهای زنگ‌نزن به صورت عبارات "کروم معادل"<sup>۱</sup> و "نیکل معادل"<sup>۲</sup> بیان می‌گردد. در این روابط، عناصر پایدارکننده آستنیت در رابطه نیکل معادل و پایدارکننده‌های فریت در رابطه کروم معادل قرار داده می‌شوند. تاکنون روابط تجربی زیادی برای این پارامترها ذکر شده است. به عنوان مثال اولین رابطه را شفلا<sup>۳</sup> در سال ۱۹۴۹ به صورت زیر ارائه کرد:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb \quad (۲-۲)$$

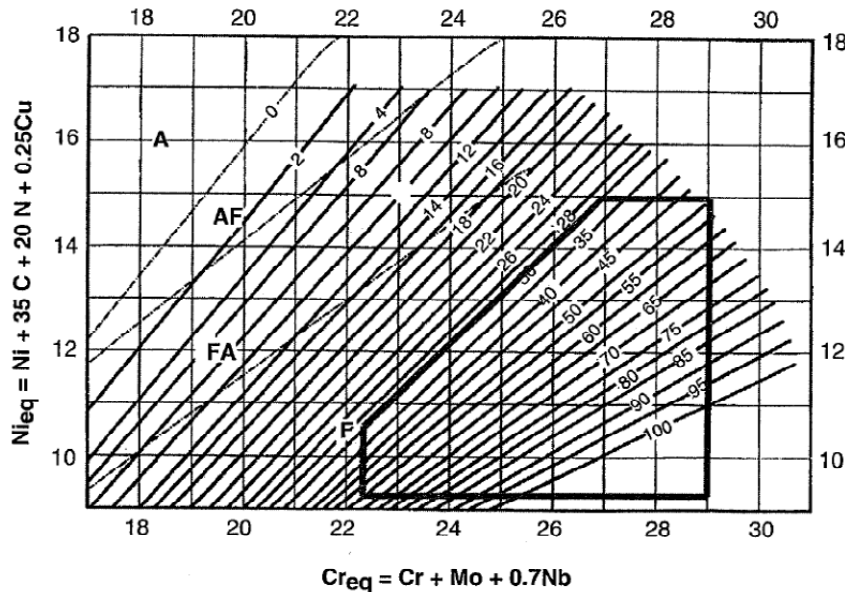
$$Ni_{eq} = Ni + 30C + 0.5Mn \quad (۳-۲)$$

از سال ۱۹۴۹ محققان زیادی بر روی این موضوع تحقیق کرده و عناصر آلیاژی دیگر را وارد این روابط کرده‌اند یا به تصحیح ضرایب پرداخته‌اند [۲۳]. در حال حاضر، کروم معادل و نیکل معادل مورد استفاده در نمودار WRC-۱۹۹۲ از معتبرترین و دقیق‌ترین روابط به دست آمده می‌باشند که به صورت روابط ۲-۴ و ۲-۵ تعریف می‌شوند.

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb \quad (۴-۲)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu \quad (۵-۲)$$

همچنین، نمودار WRC-۱۹۹۲ در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱. نمودار WRC-۱۹۹۲ با گستره تقریبی ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ‌نزن دوفازی [۱۳].

فولادهای زنگ‌نزن دوفازی معمولاً در مقایسه با فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی دارای نسبت عناصر فریت‌زا به عناصر آستنیت‌زای بالاتری هستند و این امر به خاطر آن است که فولادهای زنگ‌نزن دوفازی به صورت ۱۰۰٪ فریتی انجماد یابند [۱۳].

<sup>۱</sup> Chromium Equivalent

<sup>۲</sup> Nickel Equivalent

<sup>۳</sup> Schaeffler