

الله أكبر
الله أكبر
الله أكبر
الله أكبر



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

تأثیر حرارت ورودی جوشکاری قوس تنگستن- گاز، بر ریز ساختار و مقاومت به خوردگی حفره ای فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد جوشکاری

سید مصطفی قهاری

اساتید راهنما:

دکتر مرتضی شمعیان

دکتر کیوان رئیسی

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

هشت	فهرست مطالب
یازده	فهرست شکل ها
سیزده	فهرست جداول
۱	چکیده
	فصل اول: مقدمه
	فصل دوم: مروری بر مطالب
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 و تاریخچه فولادهای زنگ نزن دوفازی
۸	۲-۲-۲ ترکیب شیمیایی و دسته بندی فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۰	۳-۲-۲ متالورژی فیزیکی فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۳	۴-۲-۲ معرفی فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750
۱۴	۳-۲ جوشکاری فولادهای زنگ نزن
۱۵	۱-۳-۲ جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۵	۲-۳-۲ انواع روش های جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۵	۳-۳-۲ جوشکاری قوسی تنگستن-گاز
۱۷	۴-۲ متالورژی جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۷	۱-۴-۲ رفتار انجمادی
۱۹	۲-۴-۲ نقش نیتروژن در فولادهای زنگ نزن دوفازی
۲۱	۳-۴-۲ بررسی نقش حرارت ورودی و نرخ سرد شدن بر توازن فریت-آستنیت
۲۲	۵-۲ بررسی انواع رسوب ها در فولادهای زنگ نزن دوفازی
۲۳	۱-۵-۲ آستنیت ثانویه
۲۷	۲-۵-۲ تاثیر فازهای سیگما و نیتريد کرم
۳۰	۳-۵-۲ دیگر رسوبات در فولادهای زنگ نزن دوفازی
۳۱	۶-۲ جوش پذیری
۳۲	۱-۶-۲ پیش بینی ساختار فلز جوش و اندازه گیری عدد فریت
۳۲	۷-۲ مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن دوفازی
۳۵	۱-۷-۲ ترک خوردن خوردگی تنشی
۳۵	۲-۷-۲ خوردگی حفره ای
۴۱	۳-۷-۲ خوردگی گالوانیکی
۴۱	۸-۲ عوامل موثر بر مقاومت به خوردگی فلز جوش فولادهای زنگ نزن
۴۱	۱-۸-۲ ترکیب شیمیایی
۴۱	۲-۸-۲ فاکتورهای فیزیکی

۴۲.....	۳-۸-۲ رسوبات کاربیدی
۴۲.....	۴-۸-۲ فریت دلتا
۴۲.....	۵-۸-۲ فاز سیگما
۴۲.....	۹-۲ کاربرد اسید استیک در صنایع پتروشیمی
۴۲.....	۱۰-۲ جمع بندی و هدف

فصل سوم: مواد و روش

۴۴.....	۱-۳ کلیات
۴۵.....	۲-۳ مواد مورد استفاده
۴۵.....	۱-۲-۳ فلز پایه
۴۵.....	۲-۲-۳ فلز پرکننده
۴۵.....	۳-۳ جوشکاری
۴۵.....	۱-۳-۳ طرح اتصال
۴۶.....	۲-۳-۳ فرآیند جوشکاری
۴۷.....	۴-۳ مشخصه یابی
۴۷.....	۱-۴-۳ بررسی ریزساختاری
۴۸.....	۲-۴-۳ فاز شناسی
۴۸.....	۳-۴-۳ میزان فریت
۴۸.....	۴-۴-۳ ترکیب شیمیایی فازها
۴۸.....	۵-۴-۳ آزمون سختی و ریزسختی
۴۸.....	۵-۳ آزمون های خوردگی: کلیات
۴۹.....	۱-۵-۳ آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک
۵۰.....	۲-۵-۳ آزمون پلاریزاسیون سیکنی
۵۰.....	۳-۵-۳ خوردگی گالوانیکی
۵۱.....	۴-۵-۳ آزمون خوردگی غوطه وری

فصل چهارم: نتایج و بحث

۵۳.....	۱-۴ مقدمه
۵۳.....	۲-۴ بررسی های ریزساختاری
۵۳.....	۱-۲-۴ بررسی ریز ساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750
۵۵.....	۲-۲-۴ بررسی ریزساختار فلز جوش و تاثیر حرارت ورودی
۶۵.....	۳-۲-۴ بررسی ریز ساختار مرز ذوب فلز پایه و فلز جوش
۶۸.....	۴-۲-۴ ترکیب شیمیایی و تقسیم بندی عناصر آلیاژی در فازهای فلز جوش
۷۰.....	۳-۴ بررسی سختی
۷۰.....	۱-۳-۴ ریز سختی سنجی
۷۱.....	۲-۳-۴ پروفیل سختی
۷۲.....	۴-۴ نتایج آزمون های خوردگی
۷۲.....	۱-۴-۴ نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک
۷۴.....	۲-۴-۴ نتایج آزمون پلاریزاسیون سیکنی
۷۸.....	۳-۴-۴ بررسی رفتار خوردگی گالوانیکی

۴-۴-۴ نتایج آزمون غوطه وری..... ۸۳

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری ۹۰

۵-۲ پیشنهادات ۹۲

مراجع ۹۳

فهرست شکل ها

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
شکل ۱-۲. دیاگرام شبه دو تایی از دیاگرام سه تایی Fe-Cr-Ni با ۶۸ درصد وزنی آهن	۷
شکل ۲-۲. ناحیه دما بالای نمودار فازی شبه دو تایی برای ترکیبات فولادهای زنگ نزن دوفازی	۱۱
شکل ۳-۲. تشکیل رسوب در فولادهای زنگ نزن دوفازی	۱۲
شکل ۴-۲. دیاگرام فازی SAF 2507 محاسبه شده با ترموکالک، ترکیب SAF 2507	۱۳
شکل ۵-۲. فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (الف) شمای کلی فرآیند GTAW (ب) منطقه جوشکاری	۱۷
شکل ۶-۲. ریز ساختار منطقه جوش فولاد SAF 2507، نشان دهنده انواع آستنیت تشکیل شده	۱۸
شکل ۷-۲. حلالیت نیتروژن در فریت و آستنیت	۱۹
شکل ۸-۲. تفاوت ریزساختارهای جوش به دلیل افزودن نیتروژن در گاز محافظ	۲۰
شکل ۹-۲. شماتیکی از دیاگرام TTP برای SAF 2507	۲۳
شکل ۱۰-۲. آستنیت ثانویه درون دانه ای، آستنیت ثانویه فاز اچ شده ی ظریفی است که در مرکز دانه فریت	۲۴
شکل ۱۱-۲. تفاوت بین آستنیت اولیه و آستنیت ثانویه درون دانه ای در فولاد ۲۲۰۵ بازگرمایش	۲۵
شکل ۱۲-۲. تغییرات ضخامت فیلم آستنیت ثانویه در پیرامون α/γ_1 در فولاد ۲۲۰۵ بازگرمایش	۲۵
شکل ۱۳-۲. آستنیت ثانویه بین دانه ای در فولاد SAF 2507 پس از پیرسازی	۲۶
شکل ۱۴-۲. شماتیکی از مکانیزم رسوب گذاری مشارکتی نیتrideها و γ_2 روی فصل مشترک α/γ_1	۲۷
شکل ۱۵-۲. شماتیکی از تاثیر دما، نرخ سرد کردن و عناصر آلیاژی بر تشکیل فاز σ و Cr_2N	۲۸
شکل ۱۶-۲. شماتیکی از تشکیل ایزوترمال فاز سیگما (σ)	۲۹
شکل ۱۷-۲. کسر فاز تعادلی محاسبه شده ترمودینامیکی ۲۵۰۷ بر حسب تابعی از دما	۳۰
شکل ۱۸-۲. حساسیت به ترک خوردن انجمادی جوش بر حسب Cr_{eq}/Ni_{eq}	۳۲
شکل ۱۹-۲. نمودار WRC-1992 با گستره تقریبی ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن دوفازی	۳۳
شکل ۲۰-۲. نمودار پلاریزاسیون فلز پایه و فلز جوش در پاس ریشه و پرکننده	۳۳
شکل ۲۱-۲. مقاومت به ترک خوردن خوردگی تنشی (SCC) فولادهای زنگ نزن دوفازی	۳۵
شکل ۲۲-۲. دمای بحرانی حفره دار شدن (CPT) بر حسب تغییرات غلظت سدیم کلرید	۳۶
شکل ۲۳-۲. نمودار پلاریزاسیون سیکلی از پاس ریشه	۳۷
شکل ۲۴-۲. تاثیر مقدار فریت بر روی نرخ حفره دار شدن فولاد SAF 2507 در اتصال جوشکاری شده	۳۸
شکل ۲۵-۲. شماتیکی از نمودار پلاریزاسیون و ریسک تشکیل شدن حفره در شرایط مختلف	۳۹
شکل ۲۶-۲. نمودار دانسیته جریان بر حسب دما برای فلز پایه و منطقه متاثر از حرارت شبیه سازی شده A ۲۳۰۴	۴۰
شکل ۱-۳. شماتیکی از طرح اتصال و مشخصات ابعادی پیشنهادی شرکت سازنده و ابعاد مورد استفاده در این پژوهش	۴۶
شکل ۲-۳. نمونه ای از مجموعه سه الکترودی برای آزمون های الکتروشیمیایی	۵۰
شکل ۳-۳. شماتیکی از طرح اتصال آزمون ZRA	۵۱
شکل ۴-۳. شماتیکی از ابعاد نمونه ی جوشکاری شده برای آزمون غوطه وری	۵۲
شکل ۵-۳. نمونه ی شماره ۱ جوشکاری شده برای آزمون غوطه وری	۵۲
شکل ۱-۴. ریزساختار فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750	۵۴
شکل ۲-۴. الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750	۵۴
شکل ۳-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فلز پایه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750	۵۴

- شکل ۴-۴. تصویر میکروسکوپی نوری منطقه جوش (پاس ریشه) با حرارت ورودی زیاد ۵۶
- شکل ۵-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی منطقه جوش (پاس ریشه) با حرارت ورودی زیاد ۵۷
- شکل ۶-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی منطقه جوش (پاس ریشه) با حرارت ورودی زیاد با بزرگنمایی بالاتر ۵۷
- شکل ۷-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از تفاوت آستنیت اولیه و آستنیت ثانویه با حرارت ورودی زیاد ۵۸
- شکل ۸-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از تفاوت آستنیت اولیه با آستنیت ثانویه و انواع آستنیت ثانویه ۵۹
- شکل ۹-۴. درصد آستنیت فلز جوش بر حسب تابعی از حرارت ورودی ۶۰
- شکل ۱۰-۴. تصویر میکروسکوپی نوری از افزایش آستنیت در اثر افزایش حرارت ورودی ۶۱
- شکل ۱۱-۴. الگوی پراش اشعه ایکس فلز جوش در حرارت ورودی های مختلف ۶۲
- شکل ۱۲-۴. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فلز جوش الف) حرارت ورودی کم، ب) حرارت ورودی زیاد ۶۳
- شکل ۱۳-۴. نمودار WRC-1992 و کاربرد آن برای پیش بینی ریزساختار و عدد فریت فلز جوش ۶۴
- شکل ۱۴-۴. تصویر میکروسکوپی نوری از فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه در حرارت ورودی زیاد ۶۵
- شکل ۱۵-۴. تصویر شماتیکی از ارزیابی ریزساختار HAZ در طی جوشکاری فولاد زنگ نزن دوفازی ۶۶
- شکل ۱۶-۴. تصاویر میکروسکوپی الکترونی فصل مشترک فلز جوش و فلز پایه ۶۷
- شکل ۱۷-۴. شناسایی EDS عناصر آلیاژی فاز فریت در حرارت ورودی متوسط ۶۸
- شکل ۱۸-۴. نسبت تقسیم عناصر آلیاژی کرم، نیکل، مولیبدن و منگنز در فلز پایه و فلز جوش ۷۰
- شکل ۱۹-۴. پروفیل سختی مقطع عرضی فلز پایه به سمت فلز جوش ۷۱
- شکل ۲۰-۴. منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از راست به چپ: فلز پایه، فلز جوش ۷۳
- شکل ۲۱-۴. تاثیر حرارت ورودی بر پتانسیل و دانسیته جریان خوردگی فلز جوش ۷۴
- شکل ۲۲-۴. منحنی پلاریزاسیون سیکنی فلز پایه، فلز جوش در حرارت ورودی ۷۵
- شکل ۲۳-۴. دیاگرام تعادلی پوربه سیستم NH₃-H₂O در دمای اتاق ۷۵
- شکل ۲۴-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی بعد از آزمون سیکلی برای MHI ۷۸
- شکل ۲۵-۴. پروفیل خوردگی گالوانیکی بین فلز پایه و فلز جوش در دو حالت حرارت ورودی کم و زیاد ۷۹
- شکل ۲۶-۴. ضریب تراکم بر حسب زمان برای زوج گالوانیکی فلز پایه و فلز جوش در شرایط LHI و HHI ۸۱
- شکل ۲۷-۴. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی بعد از آزمون ZRA برای نمونه فلز جوش ۸۱
- شکل ۲۸-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با استفاده از الکترون برگشتی (BSE) ۸۲
- شکل ۲۹-۴. منحنی پلاریزاسیون سیکلی پس از گذشت ۵ ساعت برای فلز جوش با حرارت ورودی ۸۳
- شکل ۳۰-۴. نمونه های آزمون غوطه وری قبل و بعد از آزمون برای حرارت ورودی های ۸۵
- شکل ۳۱-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی از سه منطقه فلز پایه، فلز جوش و مرز بین این دو ناحیه قبل از غوطه وری ۸۶
- شکل ۳۲-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی از مرز بین فلز پایه و جوش بعد از آزمون غوطه وری حرارت ورودی کم ۸۶
- شکل ۳۳-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی از مرز بین فلز پایه و جوش بعد از آزمون غوطه وری حرارت ورودی متوسط ۸۷
- شکل ۳۴-۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی از مرز بین فلز پایه و جوش بعد از آزمون غوطه وری حرارت ورودی زیاد ۸۸

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۶	جدول ۱-۲. انواع فولاد های زنگ نزن و خواص مغناطیسی آنها
۱۰	جدول ۲-۲. ترکیب فولادهای زنگ نزن دوفازی فریتی - آستنیتی
۱۲	جدول ۳-۲. فهرست رسوبات، فولادهای زنگ نزن دوفازی
۱۳	جدول ۴-۲. ترکیب شیمیایی اسمی فولاد SAF 2507
۱۳	جدول ۵-۲. خواص مکانیکی SAF 2507
۱۴	جدول ۶-۲. انواع مشکلات جوشکاری در انواع فولادهای زنگ نزن
۱۶	جدول ۷-۲. خلاصه ای از روش های جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوفازی
۲۲	جدول ۸-۲. حرارت ورودی و دمای بین پاسی برای فولاد SAF2507
۴۵	جدول ۱-۳. ترکیب شیمیایی فلز پایه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750
۴۵	جدول ۲-۳. ترکیب شیمیایی فلز پرکننده AWS ER2594
۴۷	جدول ۳-۳. پارامترهای جوشکاری با جریان ثابت
۵۵	جدول ۱-۴. ترکیب شیمیایی عناصر آلیاژی فازهای آستنیت و فریت (درصد وزنی Wt%)
۵۹	جدول ۲-۴. تغییر درصد فریت فلز جوش در حرارت ورودی کم تا زیاد (اعداد داخل پرانتز انحراف از معیار است)
۶۸	جدول ۳-۴. ترکیب شیمیایی عناصر آلیاژی در فاز های فریت و آستنیت (درصد وزنی Wt%)
۷۰	جدول ۴-۴. سختی فلز پایه و فلز جوش در حرارت ورودی های مختلف
۷۴	جدول ۵-۴. مقایسه کمی نتایج حاصل از منحنی های آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک
۷۸	جدول ۶-۴. اختلاف پتانسیل بین فلز پایه و فلز جوش (میلی ولت)
۸۹	جدول ۷-۴. مقدار عناصر آلیاژی حل شده در محلول غوطه وری برای فلز پایه و فلز جوش (بر حسب mg/lit)

چکیده

در این پژوهش به بررسی ریزساختار و رفتار خوردگی مقاطع جوش فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 پرداخته شد. برای جوشکاری از فرآیند قوس تنگستن-گاز با قطبیت منفی و فلز پرکننده AWS ER2594 استفاده شد. به دلیل اهمیت حرارت ورودی در جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوفازی، جوشکاری در سه حرارت ورودی ۸۰۱، ۹۸۷ و ۱۲۹۸ ژول بر میلی متر انجام شد تا تاثیر حرارت ورودی بر تغییرات ریزساختاری و رفتار خوردگی مقاطع جوش مورد بررسی قرار گیرد. بررسی های ریزساختاری با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی انجام گرفت. همچنین برای بررسی نحوه تقسیم عناصر آلیاژی در دو فاز فریت و آستنیت بعد از جوشکاری از تکنیک EDS استفاده شد. برای ارزیابی مقاومت به خوردگی از آزمون های الکتروشیمیایی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و سیکلی و آزمون خوردگی گالوانیکی ZRA برای ارزیابی خوردگی گالوانیکی بین زوج گالوانیکی فلز پایه و فلز جوش استفاده شد. از آزمون غوطه وری برای ارزیابی خوردگی مناطق مختلف اعم از فلز پایه، فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت به مدت ۱۰۰ روز استفاده شد. همه آزمون های خوردگی در دمای محیط و در محلول اسید استیک ۸۰٪ حاوی آنیون مهاجم برمید (Br⁻) انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش حرارت ورودی از حدود ۸۰۱ تا ۱۲۹۸ ژول بر میلی متر، مقدار آستنیت از ۴۳ به ۵۴ درصد افزایش می یابد. نتایج حاصل از EDS نشان داد که تقسیم بندی عناصر آلیاژی در فلز جوش نسبت به فلز پایه دگرگون شده است که این نسبت برای عنصر کرم از کمترین تغییرات برخوردار بود. نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان داد که فلز جوش در تمام شرایط حرارت ورودی، نسبت به فلز پایه از مقاومت به خوردگی کمتری برخوردار است و برای حرارت ورودی حدود ۹۸۷ ژول بر میلی متر، کمترین اختلاف از نظر پتانسیل و دانسیته جریان خوردگی با فلز پایه وجود دارد. آزمون پلاریزاسیون سیکلی نیز نشان داد که هم فلز پایه و هم فلز جوش دارای حلقه هیستریزیس منفی اند و در برابر حفره دار شدن مقاوم هستند. از نظر معیار اختلاف پتانسیل، فلز پایه و فلز جوش در دو حرارت ورودی ۸۰۱ و ۱۲۹۸ ژول بر میلی متر مستعد به خوردگی گالوانیکی هستند که نتایج آزمون ZRA در این دو حالت نشان داد که در یک اتصال فلز جوش آند و فلز پایه کاتد است. تحلیل نتایج آزمون ZRA با استفاده از ضریب تراکم نشان داد که در فلز جوش با حرارت ورودی پایین خوردگی از نوع یکنواخت و در حرارت ورودی بالا خوردگی از نوع موضعی است. نتایج آزمون غوطه وری برای ارزیابی رفتار خوردگی مناطق مختلف نشان داد که مرز بین فلز پایه و فلز جوش از کمترین مقاومت به خوردگی برخوردار است، یعنی این منطقه آندی تر از فلز پایه و فلز جوش است. نتیجه کلی این که در بین شرایط جوشکاری با حرارت ورودی های مختلف، جوشکاری با حرارت ورودی ۹۸۷ ژول بر میلی متر هم از لحاظ ریزساختاری و هم مقاومت به خوردگی، بهترین حرارت ورودی با توجه به ضخامت و طرح اتصال برای فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 است.

کلمات کلیدی

فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی، جوشکاری، حرارت ورودی، ریز ساختار، خوردگی.

فصل اول

مقدمه

فولادهای زنگ نزن از مهم ترین مواد رایج مهندسی هستند که به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می شوند [۱]. در میان فولادهای زنگ نزن، فولادهای زنگ نزن دوفازی که شامل فریت و آستنیت با ترکیب تقریباً ۵۰:۵۰ از هر دو فاز است، به خاطر داشتن ویژگی های جذاب از فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فریتی مانند استحکام کششی و استحکام خستگی بالا، چقرمگی بالا حتی در دمای کم، شکل پذیری مناسب و جوش پذیری خوب، مقاومت عالی در برابر خوردگی ترک خوردن تنشی^۱ (SCC) و خوردگی یکنواخت و حفره ای، باعث شده است که جایگزین مناسب برای فولادهای آستنیتی باشند. امروزه کلاس جدیدی از فولادهای زنگ نزن دوفازی تحت عنوان فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی^۲ رواج پیدا کرده اند که شامل حدود ۲۵٪ کرم می باشند و عدد معادل مقاومت به حفره دار شدن^۳ (PREN) بالای ۴۰ را دارا می باشند که به دلیل مقاومت به خوردگی بهتر آنها نسبت به فولادهای زنگ نزن دوفازی معمولی توسعه پیدا کرده اند [۳۲]. خصوصیات عالی فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی باعث شده که این فولادها به طور گسترده در صنایع و محیط هایی که مقاومت به خوردگی عالی و خواص مکانیکی بالا نیاز است، مورد استفاده قرار گیرند. از جمله ی این فولادها UNS S32750 (SAF 2507) است که به طور گسترده در صنایع پتروشیمی، نفت و گاز، تجهیزات نفتی ساحلی، صنعت خمیر کاغذ و... مورد استفاده قرار می گیرد. توسعه ی زیاد فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی باعث شده است که جوشکاری به عنوان یک تکنیک ساخت بسیار مهم برای این فولادها مورد توجه قرار گیرد و تحقیقات زیادی روی جوشکاری این فولادها صورت گیرد. محققین انواع روش های جوشکاری ذوبی و به تازگی جوشکاری حالت جامد را برای فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی مورد مطالعه قرار داده اند. اما تمامی پژوهش های انجام شده در این مورد مربوط به روش های مختلف جوشکاری و بررسی خواص مکانیکی و خوردگی است و تحقیق جامعی روی نقش حرارت ورودی روی ریز

¹ Stress Corrosion Cracking (SCC)

² Super Duplex stainless steels

³ Pitting Resistance Equivalence Number (PREN)

ساختار و خواص خوردگی فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 به روش جوشکاری قوس تنگستن-گاز^۱ (GTAW) صورت نگرفته است. جوشکاری یک فرایند اجتناب ناپذیر برای ساخت فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی محسوب می شود و تحقیقات زیادی نیز در این زمینه صورت گرفته است. برای دستیابی به خواص مطلوب در فلز جوش فولادهای زنگ نزن دوفازی لازم است که نسبت تعادلی بین فاز فریت-آستنیت نزدیک ۵۰:۵۰ نگه داشته شود و از تشکیل شدن فازهای ثانویه مضر مانند فازهای سیگما، نیتريد کرم، چي و ... جلوگیری شود. جوشکاری باعث می شود تعادل فریت-آستنیت در منطقه جوش و منطقه متأثر از حرارت^۲ (HAZ) به علت سرد شدن سریع و سیکل های حرارتی که به دنبال دارد به هم بخورد و موجب از دست رفتن خواص مطلوب فولادهای زنگ نزن دوفازی در این مناطق شود. از این رو لازم است که پارامترهای جوشکاری به گونه ای کنترل شود که تعادل ریزساختاری مطلوب حاصل شود و فازهای بین فلزی مضر نیز تا حد امکان تشکیل نشود. کنترل حرارت ورودی جوش می تواند یک روش موثر برای رسیدن به تعادل نزدیک به ۵۰:۵۰ برای فریت و آستنیت و تشکیل نشدن فازهای مضر باشد [۲ و ۳].

حرارت های ورودی خیلی کم، منجر به تشکیل مقدار بالایی از فریت و نیتريد کرم در منطقه جوش می شود جایی که فرصت استحاله فریت به آستنیت وجود ندارد و از طرفی امکان جدایش عناصر آلیاژی در فازهای فریت و آستنیت وجود نداشته و با حبس شدن نیتروژن در فاز فریت و وجود مقدار زیاد کرم در این فاز باعث تشکیل نیتريد کرم می شود. از طرفی حرارت ورودی بالا باعث می شود که آستنیت بیشتری، از استحاله فریت به آستنیت حاصل شود ولی به دلیل قرار گیری زمان زیادی در محدوده دمایی تشکیل فازهای مضر، فازهایی مانند سیگما و چي تشکیل می شوند. بنابراین برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی محدوده ای از حرارت ورودی در نظر گرفته می شود که بسته به ضخامت و هندسه ی اتصال بین ۰/۵-۲ kJ/mm می باشد [۳ و ۴]. همان طور که اشاره شد محققان به محدوده حرارت ورودی ۰/۵-۲ kJ/mm اشاره کرده اند ولی بیشتر تحقیقات صورت گرفته روی خواص مکانیکی بوده و تحقیقات کمی روی فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی SAF 2507 مبنی بر بررسی نقش حرارت ورودی بر ریزساختار و دست یافتن به بهترین حرارت ورودی برای مطلوب ترین ساختار و متعاقباً رفتار خوردگی فلز جوش در حرارت ورودی های مختلف صورت گرفته است. در این پژوهش سعی شد با کنترل حرارت ورودی در محدوده بیان شده بهترین ریزساختار با توجه به ضخامت و هندسه اتصال برای فولاد مورد بررسی یافت شود و رفتار خوردگی فلز جوش نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. از طرفی یکی از خوردگی های رایجی که بین فلز پایه و فلز جوش به دلیل عدم تجانس صورت می گیرد، خوردگی گالوانیکی^۳ است. با وجود اینکه تحقیقاتی روی خوردگی گالوانیکی فولاد های زنگ نزن آستنیتی جوشکاری شده وجود دارد، ولی تحقیقی در این زمینه روی فولادهای زنگ نزن دوفازی صورت نگرفته است. یکی از مناطق حساس در برابر خوردگی منطقه متأثر از حرارت (HAZ) است که تحت نرخ سرد شدن مختلف رفتار خوردگی متفاوتی از خود نشان می دهد که بیشتر تحقیق های صورت گرفته از طریق شبیه سازی حرارتی منطقه متأثر از حرارت (HAZ) روی فولادهای زنگ نزن دوفازی است. دلیل این موضوع کوچک بودن و مشکل بودن دسترسی به این منطقه است. از طرفی بررسی های صورت گرفته برای هر یک از مناطق به صورت جدا از هم بوده و تحت آزمون های الکتروشیمیایی صورت گرفته که این موجب نادیده گرفتن شرایط واقعی و خوردگی گالوانیکی بین این منطقه و مناطق دیگر از جمله با فلز پایه و فلز جوش می شود. در بین آزمون

¹ Gas-Tungsten Arc Welding (GTAW)

² Heat Affected Zone (HAZ)

³ Galvanic Corrosion

های خوردگی، آزمون غوطه وری به دلیل داشتن شرایط واقعی کار از اهمیت زیادی برخوردار است که تحقیقی در این زمینه برای فولادهای زنگ نزن دوفازی دیده نمی شود. از این رو در این پژوهش سعی شده است علاوه بر انجام آزمون های الکتروشیمیایی، رفتار خوردگی مناطق مختلف از جمله فلز پایه، فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت (HAZ) از طریق آزمون غوطه وری مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد.

فصل دوم مروری بر مطالب

۲-۱ فولادهای زنگ نزن

۲-۱-۱ معرفی فولادهای زنگ نزن

فولادهای زنگ نزن شامل گروهی از فولادهای پر آلیاژ، بر پایه سیستم های Fe-Cr، Fe-Cr-C و Fe-Cr-Ni می باشند. این فولادها برای زنگ نزن بودن باید حاوی حداقل ۱۰/۵ درصد وزنی کرم باشند. این میزان کرم باعث تشکیل یک سطح غیر فعال اکسیدی می شود که از اکسیداسیون و خوردگی فلز زیری در شرایط محیط و غیرخورنده جلوگیری می کند [۱]. لو^۱ و همکاران، حداقل مقدار کرم برای تشکیل اکسید کرم چسبنده روی سطح فولادهای زنگ نزن را ۱۱ درصد وزنی کرم اعلام کردند. به هر حال، این لایه اکسیدی برای حفاظت در برابر حفره دار شدن و زنگ زدگی در بیشتر محیط های خطرناک (مانند محیط های با اتمسفر مرطوب و آلوده) و یا در شرایطی که عناصری مثل کربن وجود دارد، می بایست مقدار کرم بیشتری اضافه شود [۵]. بسیاری از فولادها با ۱۲ درصد وزنی کرم و یا فولادهایی با میزان کرم بیشتر، در شرایط محیط دچار زنگ زدگی می شوند. این موضوع ناشی از آن است که مقداری از کرم به صورت کاربید و یا ترکیبات دیگر در می آید و میزان کرم محلول در زمینه کاهش می یابد و به کمتر از حد مورد نیاز جهت تشکیل پوسته ی محافظ اکسیدی پیوسته می رسد. با وجود اینکه، پوسته ی اکسیدی روی فولادهای زنگ نزن تشکیل می شود، گاهی محیط های خورنده با حمله کردن به آن موجب از بین رفتن پوسته اکسیدی شده و سبب خوردگی فولادهای زنگ نزن می شود. نوع خوردگی و شدت آن وابسته به نوع محیط خورنده، شرایط متالورژیکی ماده و تنش های موضعی موجود می باشد. از این رو لازم است مهندسیین و طراحان در هنگام انتخاب فولادهای زنگ نزن برای استفاده در شرایط خورنده، محیط استفاده و اثر عملیات تولید بر رفتار متالورژیکی آن ها را در نظر بگیرند [۱].

¹ Lo

۲-۱-۲ انواع فولادهای زنگ نزن

برخلاف سایر مواد که دسته بندی آن ها معمولاً براساس ترکیب شیمیایی صورت می گیرد، دسته بندی فولادهای زنگ- نزن براساس فاز (و یا فازهای) متالورژیکی غالب می باشد. انجمن آهن و فولاد آمریکا^۱ از سیستمی با سه شماره که گاهی با یک حرف نیز همراه می شود برای تعیین نوع فولاد زنگ نزن استفاده می کند. برای مثال ۳۰۴، ۳۰۴L، ۴۳۰ و ۴۳۰L جدول ۱-۲ دسته بندی انواع فولادهای زنگ نزن را نشان می دهد. عباراتی که در دسته بندی در پرانتز ذکر شده است، نشان دهنده گروه مربوط براساس این استاندارد می باشد [۱].

جدول ۱-۲. انواع فولاد های زنگ نزن و خواص مغناطیسی آنها [۱].

ردیف	نوع فولاد زنگ نزن	سری	خواص مغناطیسی
۱	مارتنزیتی	4XX	فرومغناطیس
۲	فریتی	4XX	فرومغناطیس
۳	آستنیتی	3XX	غیر مغناطیس
۴	دوفازی (فریتی و آستنیتی)	-	فرومغناطیس
۵	سختی رسوبی (PH)	-	-

همان گونه که در شکل ۱-۲ دیده می شود خواص مغناطیسی هر دسته نیز معلوم شده است. از خواص مغناطیسی می توان برای مشخص کردن برخی از فولادهای زنگ نزن استفاده کرد. نوع آستنیتی غیر مغناطیس است ولی انواع فریتی و مارتنزیتی فرومغناطیس هستند. فولادهای زنگ نزن دوفازی نیز به دلیل مقدار زیاد فریت دارای خواص مغناطیسی قوی هستند. نوع سختی رسوبی^۲ (PH) به این عنوان لقب گرفته اند چون به کمک عملیات حرارتی پیر سازی، رسوب های استحکام دهنده در زمینه ایجاد شده که باعث سختی فولاد می شود [۱].

۲-۲ فولادهای زنگ نزن دوفازی

۱-۲-۲ معرفی و تاریخچه فولادهای زنگ نزن دوفازی

فولادهای زنگ نزن دوفازی^۳، دارای ریز ساختار ترکیبی از آستنیت و فریت با نسبت های مساوی است که بیش از هشتاد سال است که وجود دارند [۶]. این فولادها نام خود را ریز ساختارشان در دمای محیط گرفته اند که تقریباً نیمی از آن فریت و نیمی دیگر آستنیت است [۱]. اکتشاف یک ریز ساختار دوفازی در ابتدا توسط بین و گریفیث^۴ در سال ۱۹۲۷ شناخته شده است [۷]. رده های اولیه ی فولادهای زنگ نزن دوفازی شامل عناصر آلیاژی کرم- نیکل و مولیبدن بودند [۶]. یک دیاگرام شبه دو تایی از این فولادها در شکل ۱-۲ نشان داده شده است که بخشی از دیاگرام سه تایی آهن- کرم و نیکل با ۶۸٪ وزنی آهن است [۷]. ویژگی جذاب فولادهای زنگ نزن دوفازی در سال ۱۹۳۰ توسط اوستا جرنورک^۵ شناخته شد و از این فولادها در صنعت خمیر کاغذ مورد استفاده قرار گرفتند [۷].

اولین آلیاژهای فولاد زنگ نزن به دور از بهینه کردن برحسب مقاومت به خوردگی بودند از این رو مقاومت به خوردگی متفاوت در دو فاز می تواند منجر به خوردگی انتخابی یکی از فازها شود [۸]. آلیاژی کردن با نیتروژن صورت نمی گرفت تا اینکه مقدار بالای فریت موجب تعدیل در چقرمگی این فولادها شد از این رو آلیاژی کردن با

¹ American Iron and Steel Institute

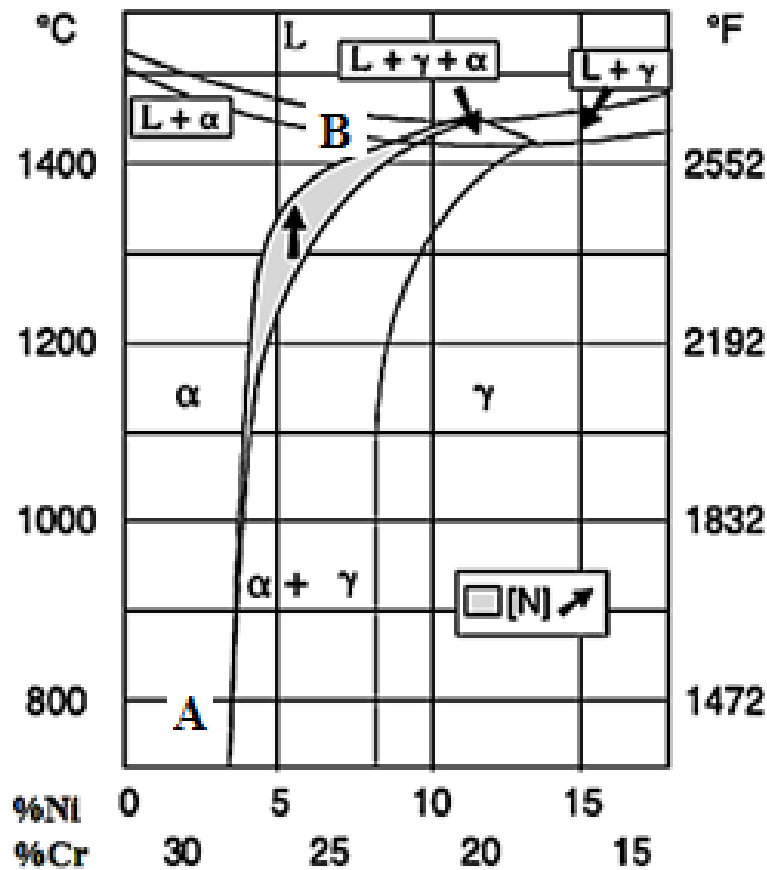
² Precipitation Hardenable

³ Duplex Stainless Steels (DSS)

⁴ Bain and Griffith

⁵ Avesta Jernerk

Cu و Mo،N برای بهبود خواص خوردگی و مکانیکی این فولادها صورت گرفت [۷و۸]. در سال ۱۹۴۰، مشخص شد که فاز فریت در فولادهای زنگ نزن باعث حفاظت در برابر ترک خوردن خوردگی تشکیقی القا شده ی کلریدی می شود. از این رو استفاده از این فولادها به عنوان راه حلی برای محیط های کلریدی شناخته شدند. در سال ۱۹۵۰ فولادهای کرم بالا-نیکل کم (بدلیل کمبود نیکل) رواج پیدا کردند، همچنین آلیاژ سازی با نیتروژن نیز صورت گرفت. مزیت افزودن نیتروژن کاهش مصرف نیکل گران قیمت، پایداری فاز آستنیت تقویت استحکام فولاد و همچنین باعث می شود که آستنیت در دمای بالایی از فریت حاصل شود. تاثیر افزودن نیتروژن در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. در واقع تا قبل از آلیاژی کردن با نیتروژن این فولادها برای جوشکاری در منطقه متاثر از حرارت^۱ (HAZ) دچار مشکل بودند زیرا مقدار زیادی فریت تشکیل می شد و موجب کاهش چقرمگی این فولادها می شد که با آلیاژ سازی با نیتروژن و شناخت تاثیر آن روی فولاد مشکلات جوشکاری این دسته تا حدود زیادی برطرف شد [۷].



شکل ۱-۲. دیاگرام شبه دو تایی از دیاگرام سه تایی Fe-Cr-Ni با ۶۸ درصد وزنی آهن [۷].

^۱ Heat Affected Zone (HAZ)

از سال ۱۹۶۰ به بعد و حدود سال ۱۹۷۰، با پیشرفت تکنیک های فولاد سازی با روش های کربن زدایی آرگون-اکسیژن^۱ و کربن زدایی خلا-اکسیژن^۲ (AOD & VOD) باعث شد که فولادهای خیلی تمیز با سطح کربن کم و کنترل محتوای نیتروژن تولید شود. این امر باعث بهبود مقاومت به خوردگی و پایداری دما بالای این فولادها بویژه در ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) پس از جوشکاری می شود. در اوایل سال ۱۹۸۰، توسعه ی زیادی در تولید، تحقیق و پیشرفت این فولادها صورت گرفت و رده های آلیاژی تر نیز در این دوره تولید شدند [۷]. از طرفی فهم عمیق در تقابل های ترمودینامیکی بین عناصر آلیاژی و توسعه برنامه های رایانه ای باعث توسعه فوق العاده این فولادها شد [۸].

در انستیتو تکنولوژی رویال^۳، روش های محاسبه ی ترمودینامیکی به کمک نرم افزار ترموکالک^۴ باعث توسعه ی فولادهای زنگ نزن دوفازی شد. در دو دهه گذشته معرفی فولادهای زنگ نزن "سوپر"^۵ مطرح شده اند. اولین فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی که با استفاده از نرم افزار ترموکالک بهینه شد فولاد SAF 2507 است که با محاسبه دمای عملیات انحلالی، عدد معادل مقاومت به حفره دارشدن^۶ (PREN) مساوی، در دو فاز فریت و آستنیت حاصل شد [۷ و ۸]. امروزه نیز مصرف فولادهای زنگ نزن در صنعت سالیانه ۱۰ تا ۲۰ درصد در حال زیاد شدن است که این موضوع باعث حجم تولید بالای این فولاد، نیاز به رده های جدیدتر، عملیات های تولید جدید و شرایط جوشکاری جدید شده است. از این رو چالش های بزرگی را برای محققان در متالورژی فیزیکی و دانش مواد فولادهای زنگ نزن دوفازی ایجاد کرده است [۷].

۲-۲-۲ ترکیب شیمیایی و دسته بندی فولادهای زنگ نزن دوفازی

ترکیب شیمیایی و عملیات های ترمومکانیکی^۷ فولادهای زنگ نزن دوفازی مُدرن به گونه ای انتخاب می شود که کسر حجمی مطلوبی از فاز فریت حاصل شود. ترکیب شیمیایی استفاده شده برای طبقه بندی فولادهای زنگ نزن دوفازی بر اساس عدد معادل مقاومت به حفره دارشدن (PREN) صورت می گیرد. برای محاسبه PREN می توان از معادله ۱-۲ استفاده کرد [۹].

$$\text{PREN} = \% \text{Wt Cr} + 3.3 \% \text{Wt Mo} + 16 \% \text{Wt N} \quad \text{معادله (۱-۲)}$$

با وجود اینکه به طور معمول مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن دوفازی را با عدد معادل مقاومت به حفره دارشدن (PREN) بیان می کنند، ولی این عدد (PREN) یک مقدار مطلق برای مقاومت به خوردگی را بیان نمی کند، همچنین در همه ی محیط ها نیز قابل استفاده نیست بلکه فقط یک دید کلی از خوردگی حفره ای برای محلول های آبی کلریدی فراهم می کند. الوارز^۸، تاثیر افزودن تنگستن به فولادهای زنگ نزن پرآلیاژی تر را بررسی و از آنجایی که تنگستن مقاومت به حفره دار شدن را برای فولادهای زنگ نزن افزایش می دهد، معادله ۲-۲، را برای محاسبه PREN معرفی کرد [۷].

¹ Argon Oxygen Decarburization(AOD)

² Vacuume Oxygen Decarburization(VOD)

³ Royal Institute of Technology

⁴ Termo-Calc

⁵ Super

⁶ Pitting Resistance Equivalence Number (PREN)

⁷ Termomechanical Treatments

⁸ Alvarez

$$\text{PREN} = \% \text{Wt Cr} + 3.3\% \text{Wt Mo} + 1.65\% \text{Wt W} + 16\% \text{Wt N} \quad \text{معادله (۲-۲)}$$

در سال ۲۰۰۹ میلادی، سروو^۱ و همکارانش، عدد معادل مقاومت به حفره دارشدن (PREN) را برای فولادهای زنگ نزن به صورت معادله ۲-۳ تعریف کردند. همان گونه که در معادله ی ۲-۳ دیده می شود ضریب نیتروژن ثابت نبوده و از ۱۶ تا ۳۰ تغییر می کند. در واقع برای بررسی فازهای فریت و آستنیت از ضرایب متفاوتی از نیتروژن برای محاسبه عدد معادل مقاومت به حفره دارشدن (PREN) می توان بهره برد [۱۰].

$$\text{PREN} = \% \text{Wt Cr} + 3.3\% \text{Wt Mo} + (16-30) \% \text{Wt N} \quad \text{معادله (۳-۲)}$$

فولادهای زنگ نزن دوفازی مانند فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارای خانواده ای از رده ها هستند که محدوده مقاومت به خوردگی آن ها وابسته به عناصر آلیاژی شان است [۶]. از این رو برای دسته بندی این فولادها می توان از عدد معادل مقاومت به حفره دارشدن (PREN) استفاده کرد و فولادهای زنگ نزن دوفازی را به صورت زیر دسته بندی کرد.

- فولادهای کم آلیاژی (دوفازی ضعیف^۲): این فولادها فاقد مولیبدن بوده مانند ۲۳۰۴، که جایگزینی برای AISI304 و AISI316 در محیط هایی که مقاومت به ترک خوردن خوردگی تنشی نیاز است مورد استفاده می باشند. برای این دسته $\text{PREN} \approx 25$ است [۹و۶].
- فولادهای با عناصر آلیاژی متوسط (دوفازی استاندارد^۳): مانند فولاد ۲۲۰۵ که مقاومت به خوردگی آنها بین AISI316 و رده های سوپر آستنیتی است. این فولادهای زنگ نزن دوفازی بیش از ۸۰٪ استفاده را دارند و $\text{PREN} = 30-35$ را دارا می باشد [۹و۶].
- فولادهای با عناصر آلیاژی زیاد (25Cr): این فولادها دارای ۲۵٪ وزنی کرم هستند و مقدار مولیبدن و نیتروژن آنها متغیر است و گاهی مس و تنگستن نیز به آنها اضافه می شود. برای این دسته نیز $\text{PREN} = 35-39$ می باشد [۹و۶].
- فولادهای زنگ نزن دوفازی سوپر^۴: این فولادها دارای ۲۵ تا ۲۶ درصد وزنی کرم هستند و نسبت به فولادهای 25Cr مقدار بیشتری مولیبدن و نیتروژن اضافه می شود، مانند ۲۵۰۷. برای این دسته مقدار PREN بالاتر از ۴۰ گزارش شده است و در برخی مراجع $\text{PREN} = 40-45$ را گزارش کرده اند [۹و۶].
- فولادهای زنگ نزن دوفازی هایپر^۵: این فولادها دارای عناصر آلیاژی خیلی زیادی هستند و مقدار PREN بالاتر از ۴۵ برای این رده گزارش شده است. از جمله این فولادها می توان به ۲۷۰۷ اشاره کرد [۶].

در جدول ۲-۲، ترکیب شیمیایی تعدادی از آلیاژهای پایه فلزی فولادهای زنگ نزن دوفازی ارایه شده است. فولادهای زنگ نزن دوفازی در کاربردهایی که نیاز به استحکام بالا، مقاومت به خوردگی عالی یا هردو مورد نیاز باشد مورد استفاده قرار می گیرد. این فولادها اغلب به دلیل مقاومت به خوردگی انتخاب می شود و در بسیاری از کاربردها که ترک خوردن خوردگی تنشی و خوردگی حفره ای مهم است، جایگزین مناسبی برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی هستند [۱].

¹ Cerro

² Lean Duplex

³ Standard Duplex

⁴ Super Duplex stainless steel

⁵ Hyper Duplex stainless steel

جدول ۲-۲. ترکیب فولادهای زنگ نزن دوفازی فریتی-آستنیتی [۱].

Type ^b	UNS No. ^b	Composition (wt%) ^a										
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W
—	S32201	0.030	4.0-6.0	0.040	0.030	1.00	19.5-21.5	1.00-3.00	0.60	0.05-0.17	1.00	—
2304	S32304	0.030	2.50	0.040	0.030	1.00	21.5-24.5	3.0-5.5	0.05-0.60	0.05-0.20	0.05-0.60	—
2205 ^c	S31803	0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20	—	—
2205 ^c	S32205	0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	22.0-23.0	4.5-6.5	3.0-3.5	0.14-0.20	—	—
329	S32900	0.08	1.00	0.040	0.030	0.75	23.0-28.0	2.0-5.00	1.00-2.00	—	—	—
—	S32950	0.030	2.00	0.035	0.010	0.60	26.0-29.0	3.5-5.2	1.00-2.50	0.15-0.35	—	—
—	S31260	0.03	1.00	0.030	0.030	0.75	24.0-26.0	5.5-7.5	2.5-3.5	0.10-0.30	0.20-0.80	0.10-0.50
—	S32520	0.030	1.50	0.035	0.020	0.80	24.0-26.0	5.5-8.0	3.0-4.0	0.20-0.35	0.50-2.00	—
CD4MCu	—	0.04	1.00	0.04	0.04	1.00	24.5-26.5	4.75-6.00	1.75-2.25	—	2.75-3.25	—
CD4MCuN	—	0.04	1.00	0.04	0.04	1.00	24.5-26.5	4.7-6.0	1.7-2.3	0.10-0.25	2.7-3.3	—
255	S32550	0.04	1.50	0.040	0.030	1.00	24.0-27.0	4.5-6.5	2.9-3.9	0.10-0.25	1.50-2.50	—
2507	S32750	0.030	1.20	0.035	0.020	0.80	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32	0.50	—
—	S32760	0.030	1.00	0.030	0.010	1.00	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-4.0	0.20-0.30	0.50-1.00	0.50-1.00
CD3M-WCuN	—	0.03	1.00	0.030	0.025	1.00	24.0-26.0	6.5-8.5	3.0-4.0	0.20-0.30	0.5-1.0	0.5-1.0

۳-۲-۲ متالورژی فیزیکی فولادهای زنگ نزن دوفازی

فولادهای زنگ نزن دوفازی و سوپر دوفازی، بر پایه سیستم آلیاژی Fe-Cr-Ni-Mo-N هستند. ترکیب شیمیایی این فولادها به گونه ای تنظیم می گردد که ریزساختار فلز پایه به صورت اسمی دارای ۵۰ درصد فریت و ۵۰ درصد آستنیت باشد. اما تمام فولادهای زنگ نزن دوفازی تقریباً به صورت ۱۰۰ درصد فریتی منجمد می شوند و ریزساختار آستنیتی-فریتی محصول استحاله حالت جامد آستنیت است. به طور کلی، تاثیر عناصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن با توجه به اینکه عنصر فریت زا یا آستنیت زا باشد، به صورت کرم معادل و نیکل معادل بیان می شود. تاکنون روابط تجربی زیادی برای محاسبه کرم معادل و نیکل معادل ذکر شده است. برای مثال اولین بار شفلر^۱ در سال ۱۹۴۹ روابط ۱-۲ را ارائه کرد.

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb \quad \text{روابط (۱-۲)}$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30C + 0.5Mn$$

از سال ۱۹۴۹ به بعد محققان زیادی سعی در تصحیح روابط کرم معادل و نیکل معادل داشته اند و پیشرفت هایی نیز در این زمینه حاصل شده است. در حال حاضر، کرم معادل و نیکل معادل که در نمودارهای WRC 1992 نیز مورد استفاده قرار می گیرند، معتبرترین و دقیق ترین روابط بدست آمده در این زمینه است که به صورت روابط ۲-۲ تعریف می شوند.

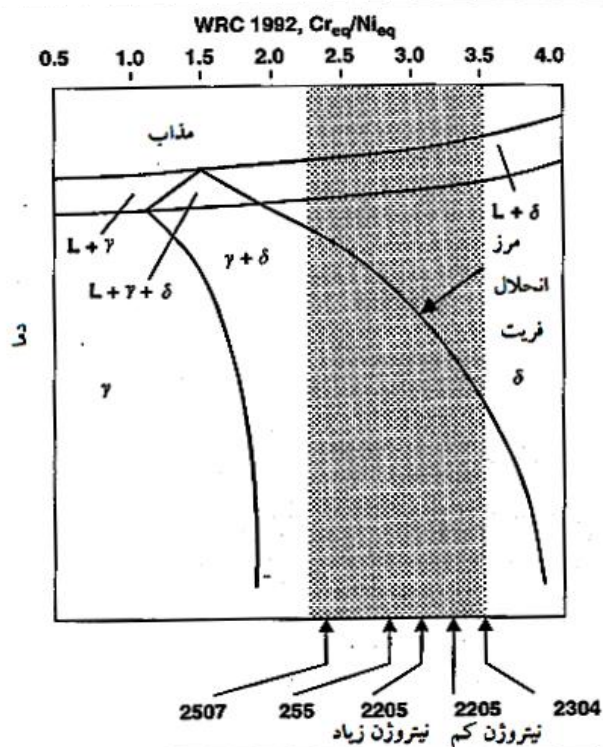
$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb \quad \text{روابط (۲-۲)}$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu$$

فولادهای زنگ نزن دوفازی در مقایسه با فولادهای زنگ نزن آستنیتی به طور معمول دارای نسبت عناصر فریت زا به آستنیت زای بالاتری هستند. تا اینکه فولادهای زنگ نزن دوفازی به صورت ۱۰۰ درصد فریتی منجمد یابند. شکل ۲-۲، نشان می دهد که آلیاژی که کرم معادل WRC 1992 آن ها از ۱/۸۵ برابر نیکل معادل یا بیشتر باشد،

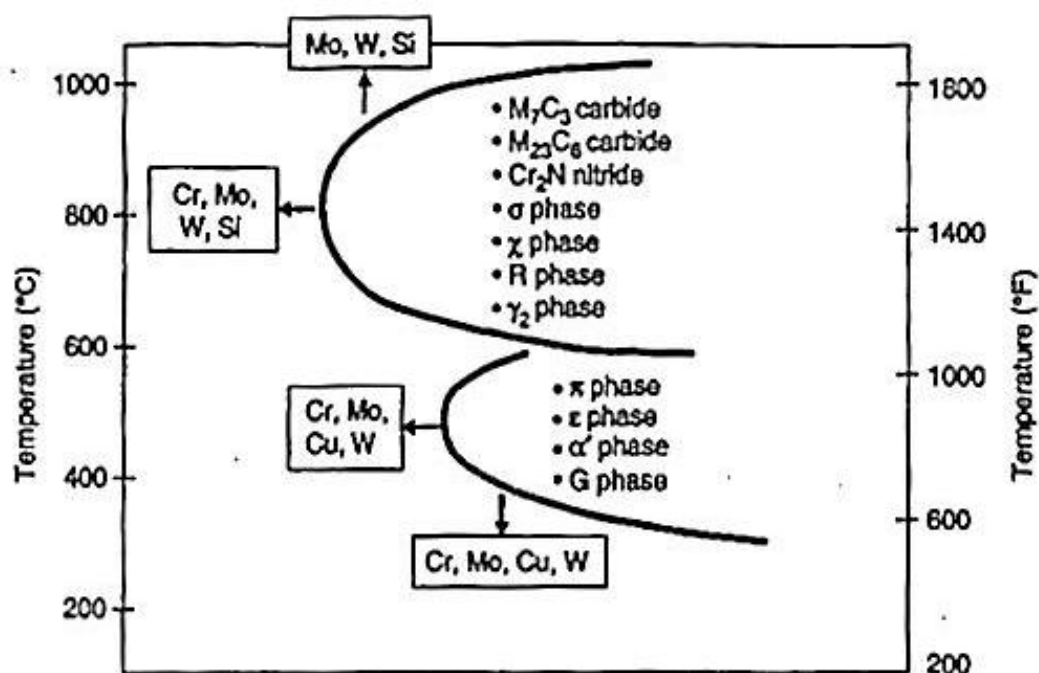
^۱ Schaeffler

به صورت کاملاً فریتی منجمد می شوند. برای فولادهای زنگ نزن دوفازی معمولاً نسبت کرم معادل به نیکل معادل $2/25$ تا $3/5$ برابر می باشد. همچنین شکل ۲-۲ محدوده هاشور خورده ای را نشان می دهد که به عنوان محدوده فولادهای زنگ نزن دوفازی تجاری شناخته می شود. در دماهای بالا (بالای مرز انحلال فریت)، آلیاژ ۱۰۰ درصد فریتی است و آستنیت فقط می تواند در زیر خط انحلال فریت، جوانه زنی و رشد کند [۱].



شکل ۲-۲. ناحیه دما بالای نمودار فازی شبه دوتایی برای ترکیبات فولادهای زنگ نزن دوفازی، ناحیه هاشور خورده محدوده آلیاژهای تجاری [۱].

البته ساختار ایده ال برای فولادهای زنگ نزن دوفازی به صورت ساختار آستنیت-فریت خالص است. در عمل ساختار کاملاً متفاوت است مخصوصاً اگر ابعاد قطعه خیلی بزرگ باشد یا با نرخ سرد شدن زیاد جوشکاری رو به رو شده باشد که در این صورت نمی توان به ساختار مطلوب دست پیدا کرد. در فولادهای زنگ نزن دوفازی به دلیل حضور عناصر آلیاژی زیاد وضعیت بدتر می شود. در طی سرد کردن تا دمای اتاق در محدوده دمایی زیر ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد واکنش های رسوبی مختلفی رخ می دهند که تمام این واکنش های رسوبی وابسته به دما و زمان می باشند [۱۱]. شکل ۲-۳، شماتیکی از دیگرام TTT برای رسوب فازهای ثانویه را نشان می دهد [۱]. در واقع فاز فریت اساساً در فولادهای زنگ نزن دوفازی ناپایدار است که به علت داشتن عناصر آلیاژی زیادی است. از این رو، در محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، رسوبات مختلفی تشکیل می شوند. معمولاً رسوبات تشکیل شده به دو محدوده دمایی تفکیک می شوند، که شامل محدوده زیر دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد و بین ۶۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی گراد است، که در شکل ۲-۳ نیز دیده می شود [۹۱]. همان گونه که در شکل ۲-۳ دیده می شود رسوب های مختلفی در محدوده دمایی متفاوت و در زمان های مختلف تشکیل می شود. همچنین در جدول ۲-۳، فهرستی از فازهایی که در فولادهای زنگ نزن دوفازی مشاهده می شوند، آورده شده است [۸].



شکل ۲-۳. تشکیل رسوب در فولادهای زنگ نزن دوفازی [۱].

جدول ۲-۳. فهرست رسوبات، فولادهای زنگ نزن دوفازی [۸].

Type of precipitate	Nominal chemical formula	Temperature range of stability, °C	Space group	Lattice parameter, nm
Austenite (γ)	-	-	$Fm\bar{3}m$	0.358-0.362
Ferrite (α)	-	-	$Im\bar{3}m$	0.286-0.288
σ -phase	Fe-Cr-Mo	600-1000	$P4_2/mnm$	$a=0.879, c=0.454$
Chromium nitride	Cr_2N	700-900	$P\bar{3}1m$	$a=0.480, c=0.447$
χ -phase	$Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$	700-900	$I\bar{4}3m$	$a=0.892$
R-phase	Fe-Cr-Mo	550-700	$R\bar{3}$	$a=1.090, c=1.934$
π -phase	$Fe_7Mo_{13}N_4$	550-600	$P4_132$	
τ -phase	Not determined	550-650	Fmmm	$a=0.405, b=0.484, c=0.286$
ϵ -Cu	Cu	300-550	$Fm\bar{3}m$	$a=0.361$
$M_{23}C_6$	-	950-1050	$Fm\bar{3}m$	$a=1.056-1.065$