

مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران

تابع سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران

مجموعه ۲: مواد و رفتار آنها در حین جوشکاری



جوشکاری فولادهای زنگ نزن

مجموعه منابع تخصصی مهندسی جوش

۱۹



مجموعه منابع تخصصی مهندسی جوش

مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران

■ **مجموعه ۲: مواد و رفتار آن‌ها در حین جوشکاری**

■ **جلد ۱۶: جوشکاری فولادهای زنگ‌زن**

حق چاپ و تکثیر برای مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران محفوظ می باشد.

مجموعه منابع تخصصی مهندسی جوش

مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران

کمیته راهبری و نظارت:

عباس زارعی هنزکی
فریبا نصرتی
امید گل محله
محمود پارسا
کوروش قدر قدر جهرمی

گروه تدوین و گردآوری:

مسعود وطن آرا
محمدرضا وطن آرا
میثم حق شناس

گروه بازخوانی علمی:

رامز وقار
عباس زارعی هنزکی

پیش‌گفتار

جوشکاری یکی از مهمترین فرایندهای ساخت و تولید در صنعت می‌باشد و در صنایع مختلف نظیر خودرو سازی، نفت و گاز، پتروشیمی، تأسیسات و ساختمان و پل‌ها، حمل و نقل، کشتی سازی، صنایع ریلی، نیروگاه‌ها، صنایع دفاعی و هوا و فضا، محصولات پزشکی، الکترونیکی و تجهیزات دقیق و... کاربردهای فراوانی دارد. کشور ایران در حال پیمودن مسیر توسعه صنعتی بوده و ازین رو صنعت جوش برای کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین آموزش منسجم و هماهنگ با جهان در این صنعت، یکی از نیازهای مهم کشور تلقی می‌گردد.

در طول جنگ جهانی دوم و پس از آن، نظر به افزایش حجم تولیدات و به تبع آن افزایش حجم جوشکاری به عنوان یکی از اصلی‌ترین روش‌های ساخت، با بروز مشکلات متعدد در این زمینه، هر یک از کشورهای صنعتی در کشورهای خود، اقدام به ساماندهی صنعت جوش و برش نمودند که این امر از طریق استاندارد سازی فعالیت‌های جوشکاری صورت گرفت. با توجه به تعدد استانداردها و مشکلات ناشی از آن و نیز روند جهانی شدن بازارها، کشورهای صنعتی اروپایی اقدام به تاسیس مرکزی متشکل از نمایندگان کشورهای خود به عنوان فدراسیون جوش اروپا (EWF)^۱ نمودند. بعدها با حضور نمایندگان کشورهای صنعتی نظیر آمریکا و ژاپن و به دنبال آن کشورهای در حال توسعه، سازمان جدیدی تحت عنوان انستیتو بین‌المللی جوش (IIW)^۲ تاسیس گردید. در حال حاضر انستیتو بین‌المللی جوش در تمام کشورهای عضو از جمله ایران دارای نماینده‌ای می‌باشد. این نماینده علاوه بر وظیفه انتقال مشکلات صنعت جوش و برش در کشور خود، جهت بحث و بررسی و ارائه راه حل و نیز انتقال دانش روز جهان و استانداردهای جدید، وظیفه فراهم سازی امکان بهره‌گیری از سیستم آموزش و تایید کیفی هماهنگ IIW را در کشور خود بر عهده دارد.

مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران (IWREC)، وابسته به سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران در سال ۱۳۷۱ با هدف انجام فعالیت‌های پژوهشی و ارائه خدمات علمی، فنی و مهندسی، مشاوره و آموزش در زمینه‌های جوشکاری، بازرسی و کنترل کیفیت تاسیس گردیده است. این مرکز با اخذ نمایندگی انستیتو بین‌المللی جوش (IIW) و فدراسیون جوش اروپا (EWF) و همچنین به عنوان مرجع ملی اعطای مجوز و اعتبار (ANB)^۳ در ایران و اولین مرکز آموزش معتبر بین‌المللی

۱-European Welding Federation

۲-International Institute of Welding

۳-Authorized National Body

جوش در سطح کشور (ATB)^۱، اقدام به چاپ مجموعه کتابهای آموزش تخصصی جوش و برش در سطح مهندسی بین‌المللی جوش (IWE)^۲ نموده‌است.

گردآوری و تالیف این مجموعه کتابها بر اساس راهنمای انستیتو بین‌المللی جوش، در خصوص آموزش‌های هماهنگ جهانی، تحت عنوان ۲۰۰۵ Copyright Rev. ۲/ EWF- ۴۰۹/ ۲۰۰۰- ۰۰۲- Doc. IAB، بوده است و تلاش شده است تا استاندارد آموزشی انستیتو بین‌المللی جوش بر مبنای داشتن خصوصیات زیر در آنها تحقق یابد: ۱- جامع بودن و در بر گرفتن تمامی فعالیتهای صنعت جوش و برش ۲- بر مبنای نظام آموزش هماهنگ جهانی ۳- بهره‌وری بالای آموزش ۴- قابلیت ارزیابی منسجم و هماهنگ.

کتاب حاضر بر اساس مفاد جزوه ۱۶- ۲ در راهنمای ۲/ EWF- ۴۰۹ Rev. ۲/ ۲۰۰۰- ۰۰۲- Doc. IAB انستیتو بین‌المللی جوش، در خصوص جوشکاری فولادهای زنگ نزن، تدوین شده است. همچنین مطالبی فراتر از مفاد جزوه مذکور، جهت تکمیل شدن هر چه بیشتر مبحث، در این کتاب ارائه شده است و به‌عنوان مرجعی جامع و معتبر برای تمامی کسانی که در حال گذراندن دوره‌های مختلف جوش می‌باشند، توصیه می‌شود.

بدیهی است پیشنهادات و انتقادات سازنده خوانندگان گرامی، این مرکز را در بهبود هر چه بیشتر این مجموعه یاری خواهد رساند.

۱- Approved Training Body

۲- International Welding Engineer



فهرست مطالب

۱- مقدمه.....	۱
۱-۱- نامگذاری فولادهای زنگ نزن.....	۲
۲-۱- خواص فولادهای زنگ نزن.....	۲
۲- نمودارهای تعادلی.....	۳
۱-۲- سیستم آهن-کروم.....	۴
۲-۲- سیستم آهن-کروم-کربن.....	۶
۳-۲- سیستم آهن-کروم-نیکل.....	۹
۳- عناصر آلیاژی و دیاگرامهای ساختاری.....	۱۳
۱-۳- عناصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن.....	۱۳
۱-۱-۳- کروم.....	۱۳
۲-۱-۳- نیکل.....	۱۵
۳-۱-۳- منگنز.....	۱۵
۴-۱-۳- سیلیسیم.....	۱۶
۵-۱-۳- مولیبدن.....	۱۶
۶-۱-۳- عناصر کاربیدزا دیگر.....	۱۷
۷-۱-۳- عناصر رسوب سختی.....	۱۷
۸-۱-۳- عناصر بین نشینی (کربن و نیتروژن).....	۱۸
۹-۱-۳- عناصر دیگر.....	۱۹
۲-۳- دیاگرامهای ساختاری.....	۱۹
۱-۲-۳- دیاگرام ساختاری Schaeffer.....	۲۰
۲-۲-۳- دیاگرام ساختاری Delong.....	۲۲
۳-۲-۳- دیاگرامهای ساختاری WRC-1988 و WRC-1992.....	۲۳
۴- کلیات جوش پذیری و جوشکاری فولادهای زنگ نزن.....	۲۶
۱-۴- فرآیندهای جوشکاری.....	۲۷
۲-۴- محافظت در برابر اکسیداسیون.....	۲۷
۳-۴- تمیزکاری قبل و بعد از جوشکاری.....	۲۸
۴-۴- فلزات پرکننده.....	۲۹
۵- فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی.....	۳۳
۱-۵- آلیاژها و مواد مصرفی.....	۳۴
۲-۵- متالورژی فیزیکی و مکانیکی.....	۳۶
۳-۵- متالورژی جوشکاری.....	۴۱
۱-۳-۵- منطقه ذوب.....	۴۱



- ۴۵ ۲-۳-۵- منطقه متأثر از حرارت (HAZ)
- ۴۸ ۳-۳-۵- عملیات حرارتی بعد از جوش (PWHT)
- ۴۹ ۴-۳-۵- راهنمایی جهت انتخاب دمای پیشگرم، بین پاسی و عملیات حرارتی بعد از جوش
- ۵۱ ۴-۵- جوش‌پذیری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی
- ۵۱ ۱-۴-۵- ترک انجمادی و ترک ذوب موضعی
- ۵۲ ۲-۴-۵- ترک بازگرمی
- ۵۲ ۳-۴-۵- ترک ناشی از هیدروژن (HIC)
- ۵۳ ۶- فولادهای زنگ نزن فریتی
- ۵۴ ۱-۶- آلیاژها و مواد مصرفی
- ۵۶ ۲-۶- متالورژی فیزیکی و مکانیکی
- ۵۸ ۱-۲-۶- اثر عناصر آلیاژی بر ریزساختار
- ۵۹ ۲-۲-۶- اثر مارتنزیت
- ۶۰ ۳-۲-۶- پدیده تردی
- ۶۶ ۴-۲-۶- خواص مکانیکی
- ۶۸ ۳-۶- متالورژی جوشکاری
- ۶۸ ۱-۳-۶- منطقه ذوب
- ۷۱ ۲-۳-۶- منطقه متأثر از حرارت (HAZ)
- ۷۳ ۴-۶- جوش‌پذیری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی
- ۷۳ ۱-۴-۶- ترک انجمادی
- ۷۴ ۲-۴-۶- تردی دمای بالا
- ۷۴ ۳-۴-۶- ترک ناشی از هیدروژن (HIC)
- ۷۴ ۵-۶- مقاومت به خوردگی
- ۷۸ ۶-۶- عملیات حرارتی بعد از جوش (PWHT)
- ۷۹ ۷-۶- انتخاب فلز پرکننده
- ۸۱ ۸-۶- فرایندهای جوشکاری قوسی فولادهای زنگ نزن فریتی
- ۸۵ ۷- فولادهای زنگ نزن آستنیتی
- ۸۷ ۱-۷- آلیاژها و مواد مصرفی
- ۸۹ ۲-۷- متالورژی فیزیکی و مکانیکی
- ۹۳ ۱-۲-۷- خواص مکانیکی
- ۹۴ ۳-۷- متالورژی جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی
- ۹۵ ۱-۳-۷- تخمین ریزساختار منطقه ذوب
- ۱۰۵ ۲-۳-۷- منطقه متأثر از حرارت (HAZ)
- ۱۰۷ ۳-۳-۷- دمای پیشگرم و بین پاسی و عملیات حرارتی بعد از جوش



- ۴-۷- جوش پذیری ۱۱۰
- ۱-۴-۷- ترک انجمادی ۱۱۱
- ۲-۴-۷- ترک بازگرمی در فولاد زنگ نزن آستنیتی ۱۱۹
- ۳-۴-۷- ترک ناشی از آلودگی مس ۱۲۰
- ۵-۷- مقاومت به خوردگی ۱۲۱
- ۱-۵-۷- خوردگی مرزدانه ای ۱۲۲
- ۲-۵-۷- خوردگی انتخابی فریت ۱۲۹
- ۳-۵-۷- خوردگی شیاری و حفره ای ۱۳۰
- ۶-۷- انتخاب فلز پرکننده ۱۳۲
- ۷-۷- طراحی اتصال ۱۳۸
- ۸-۷- فرآیندهای جوشکاری قوسی فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۱۳۸
- ۸- فولادهای زنگ نزن دو فازی ۱۴۶
- ۱-۸- آلیاژها و مواد مصرفی ۱۴۷
- ۲-۸- متالورژی فیزیکی ۱۴۸
- ۱-۲-۸- تعادل فازی آستنیت- فریت ۱۴۸
- ۲-۲-۸- واکنشهای رسوب گذاری ۱۵۰
- ۳-۸- خواص مکانیکی ۱۵۰
- ۴-۸- متالورژی جوشکاری فولاد دو فازی ۱۵۱
- ۱-۴-۸- رفتار انجماد ۱۵۱
- ۲-۴-۸- منطقه متأثر از حرارت (HAZ) در فولاد دو فازی ۱۵۲
- ۵-۸- کنترل تعادل فریت-آستنیت ۱۵۴
- ۱-۵-۸- اثرات سرعت سرد شدن ۱۵۵
- ۲-۵-۸- پیش بینی و اندازه گیری فریت ۱۵۶
- ۶-۸- جوش پذیری ۱۵۸
- ۱-۶-۸- ترک انجمادی جوش ۱۵۸
- ۲-۶-۸- ترک ناشی از هیدروژن (HIC) در فولاد دو فازی ۱۵۹
- ۳-۶-۸- تردی دمای میانی ۱۵۹
- ۷-۸- مقاومت به خوردگی در فولاد دو فازی ۱۵۹
- ۱-۷-۸- ترک خوردگی تنشی (SCC) ۱۵۹
- ۲-۷-۸- خوردگی حفره ای ۱۶۰
- ۹- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی ۱۶۱
- ۱-۹- آلیاژها و مواد مصرفی ۱۶۲
- ۲-۹- متالورژی فیزیکی و مکانیکی ۱۶۳



- ۱-۲-۹- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی..... ۱۶۴
- ۲-۲-۹- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی آستنیتی ناپایدار..... ۱۶۸
- ۳-۲-۹- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی آستنیتی..... ۱۶۹
- ۳-۹- متالورژی جوشکاری..... ۱۷۰
- ۱-۳-۹- ریزساختار جوش..... ۱۷۱
- ۲-۳-۹- عملیات حرارتی بعد از جوش (PWHT) در فولاد رسوب سختی..... ۱۷۱
- ۴-۹- جوش پذیری در فولاد رسوب سختی..... ۱۷۳
- ۵-۹- مقاومت در برابر خوردگی..... ۱۷۳
- ۱۷۵- مراجع.....



۱- مقدمه

فولادهای زنگ نزن گروه وسیع و گسترده‌ای از آلیاژهای ویژه‌اند که حاوی ۱۲ تا ۵۰٪ عناصر آلیاژی می‌باشند و بیشتر برای مقاومت در برابر خوردگی توسعه یافته‌اند. از جمله ویژگی‌های دیگر مورد نظر برای این آلیاژها عبارت از شکل‌پذیری عالی، چقرمگی زیاد در دمای اتاق و دمای پایین و مقاومت خوب در برابر پوسته شدن، اکسایش و خزش در دماهای بالاست. کروم عنصر آلیاژی بهبود دهنده مقاومت خوردگی فولادهای زنگ نزن است، ولی بسیاری از عناصر آلیاژی دیگر نیز برای پایدار کردن فازهای دیگر به این فولادها اضافه می‌شوند. همچنین این عناصر، مقاومت خوردگی را افزایش داده و خواص مکانیکی را نیز بهتر می‌کنند.

به طور کلی، فولادهای زنگ نزن را در چهار گروه اصلی می‌توان طبقه‌بندی کرد:

- ۱- فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی^۱
- ۲- فولادهای زنگ نزن فریتی^۲
- ۳- فولادهای زنگ نزن آستنیتی^۳
- ۴- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی^۴
- ۵- فولادهای زنگ نزن دوفازی^۵

فولادهای زنگ نزن آستنیتی، فریتی و دوفازی را نمی‌توان توسط عملیات حرارتی سخت کرد. در این فولادها، با استفاده از عناصر آلیاژی و فرآیند صحیح مکانیکی-حرارتی^۶ تشکیل فازهای مخرب در ارتباط با مقاومت خوردگی و چقرمگی را به حداقل می‌رسانند. به علاوه، استحکام فولادهای زنگ نزن آستنیتی را نیز می‌توان توسط کار سرد و تشکیل مارتنزیت در اثر کرنش افزایش داد. همچنین سختی و استحکام فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی را می‌توان توسط سرد کردن سریع و بازپخت به حداکثر مقدار خود افزایش داد. فولادهای زنگ نزن رسوب سختی نیز، با افزودن عناصری چون Cu، Al و Ti و رسوب یک فاز ثانویه در زمینه مارتنزیت کم کربن ایجاد می‌گردد [۱].

1- Martensitic Stainless Steels

۲- Ferritic Stainless Steels

۳- Austenitic Stainless Steels

۴- Precipitation Hardening Stainless Steels

۵- Duplex Stainless Steels

۶- HTRmo Mechanical

۱-۱- نامگذاری فولادهای زنگ نزن

فولادهای زنگ نزن کارپذیر توسط انستیتوی آهن و فولاد آمریکا (AISI) و با توجه به ترکیب شیمیایی، طبقه‌بندی و علامت گذاری شده‌اند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی Cr-Ni-Mn شامل سریهای ۲xx، فولادهای زنگ نزن آستنیتی Cr-Ni شامل سریهای ۳xxx، و فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی و فریتی کروم دار شامل سریهای ۴xx می‌شوند. انواع فولادهای زنگ نزن رسوب سختی نیز بسته به مقادیر Ni و Cr خود در سریهای ۲xx دسته‌بندی شده‌اند.

تعدادی از فولادهای زنگ نزن کارپذیر هستند که بوسیله AISI طبقه‌بندی نشده‌اند. برخی از آنها مشابه با بعضی از انواع علامتگذاری شده AISI بوده و برخی دیگر با نام های تجاری خود شناخته می‌شوند. در هر یک از انواع فولادهای زنگ نزن، تغییرات کمی نیز می‌توان اعمال کرد مثل کنترل کربن برای مصارف دمای بالا و محیط های خورنده، پایداری سازی شیمیایی بوسیله Al، Nb یا Ti، افزودن S یا Se برای بهبود ماشینکاری و دیگر افزودنی های آلیاژی برای مقاصد خاص. استانداردگذاری فولادهای زنگ نزن مقاوم به خوردگی ریختگی توسط بخش انستیتو ریخته‌گری از جامعه سازندگان فولاد آمریکا انجام می‌گیرد. سیستم نامگذاری آنها براساس سیستم دو حرفی HX، و یا سیستم حرف- عددی Cx-xxx مانند CF-۸ یا CF-۱۲M می‌باشد.

۱-۲- خواص فولادهای زنگ نزن

سیستم آلیاژی و فازهای موجود، خواص مکانیکی و فیزیکی کلی فولاد را کنترل می‌کنند. درجدول ۱ مقایسه‌ای بین خواص فیزیکی چهارگروه از فولادهای زنگ نزن کارپذیر با فولادهای ساده کربنی انجام گرفته است. انبساط حرارتی، هدایت حرارتی و مقاومت الکتریکی تأثیرات قابل ملاحظه‌ای بر میزان جوش پذیری فولاد دارند.

به دلیل بالاتر بودن ضریب انبساط حرارتی و پایین بودن هدایت حرارتی فولادهای زنگ نزن آستنیتی، کنترل اعوجاج در هنگام جوشکاری نسبت به فولادهای ساده کربنی، با دقت بیشتری باید انجام گردد. پایین بودن هدایت حرارتی فولادهای زنگ نزن، نشان دهنده نیاز کمتر آنها به حرارت ورودی در مقایسه با فولادهای کربنی است. همچنین به دلیل بالاتر بودن مقاومت الکتریکی آنها نسبت به فولادهای کربنی، جریان الکتریکی لازم برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای و نواری آنها کمتر است.



جدول ۱: خواص فیزیکی فولادهای زنگ نزن کارپذیر در شرایط آئیل شده [۲]

Property	Units	Stainless steel				
		Cr-Ni austenitic	Cr ferritic	Cr martensitic	Precipitation- hardening	Carbon Steel
Density	lb/in. ³ Mg/m ³	0.28-0.29 7.8-8.0	0.28 7.8	0.28 7.8	0.28 7.8	0.28 7.8
Elastic modulus	10 ⁶ psi GPa	28-29 193-200	29 200	29 200	29 200	29 200
Mean coef. of thermal expansion, 32° to 1000°F (0° to 538°C)	10 ⁻⁶ in./in./°F 10 ⁻⁶ m/m/°C	9.4-10.7 17.0-19.2	6.2-6.7 11.2-12.1	6.4-6.7 11.6-12.1	6.6 11.9	6.5 11.7
Thermal conductivity, 212°F (100°C)	Btu/hr-ft ² °F W/(m·K)	10.8-12.8 18.7-22.8	15.0-15.8 24.4-26.3	16.6 28.7	12.6-13.1 21.8-23.0	34.7 60
Specific heat, 32°-212°F (0°-100°C)	Btu/(lb·°F) J/(kg·K)	0.11-0.12 460-500	0.11-0.12 460-500	0.10-0.11 420-460	0.10-0.11 420-460	0.12 480
Electrical resistivity	10 ⁻⁹ Ω-m	69-102	59-67	55-72	77-102	12
Melting range	°F °C	2550-2650 1400-1450	2700-2790 1480-1530	2700-2790 1480-1530	2560-2625 1400-1440	2800 1538

فولادهای زنگ نزن آستنیتی اصولاً غیرمغناطیس بوده (نفوذپذیری مغناطیسی آنها حدود ۱/۰۲ است)، اما کار سرد انجام گرفته بر روی آنها جهت بهبود استحکام، موجب افزایش نفوذپذیری مغناطیسی آنها می‌شود. فولادهای زنگ نزن فریتی و مارتنزیتی دارای نفوذپذیری مغناطیسی بین ۱۱۰۰-۶۰۰ هستند، اما انواع رسوب سختی ضریب نفوذشان زیر ۱۰۰ می‌باشد [۲].

۲- نمودارهای تعادلی

برای اینکه آلیاژهای آهنی خاصیت زنگ نزن داشته باشند، میزان کروم آنها باید بیشتر از ۱۲ درصد وزنی باشد. در این حالت، افزایش مقاومت خوردگی مستلزم توانایی کروم به تشکیل و بقای لایه‌ای اکسیدی چسبنده بر روی سطح است. این لایه بسیار نازک بوده (با ضخامتی در حد چند اتم) و به طور موثر فولاد را در بسیاری از محیط‌های خورنده حفاظت یا رویین می‌کند. بنابراین فولادهای زنگ نزن مقادیر زیادی کروم دارند، و لذا نقطه شروع برای شناخت و مطالعه ریزساختار و ارتباط فازی در این فولادها نمودار تعادلی آهن-کروم است [۱].

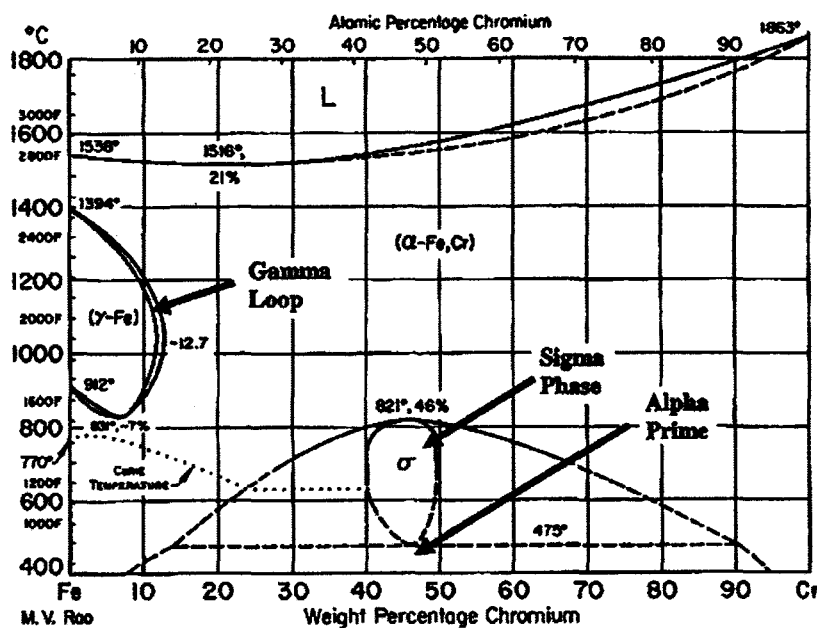
نکته قابل توجه آنست که نمودارهای تعادلی تنها تقریبی از ریزساختار ایجاد شده در فلز جوش

می‌باشند زیرا:

(۱) فولاد زنگ نزن و فلزات پرکننده دارای عناصر آلیاژی مختلفی هستند که موثر بر شکل نمودار می‌باشند و (۲) نمودارهای تعادل براساس شرایط تعادلی بر ترسیم شده‌اند، در حالیکه شرایط سریع گرم و سرد شدن جوشها، شرایط غیرتعادلی را همراه خواهد داشت [۳].

۲-۱- سیستم آهن-کروم

شکل ۱ نمودار تعادلی آهن-کروم را نشان می‌دهد. مشابه با نمودار تعادلی آهن-کربن، آهن چندشکلی^۱ محور سمت چپ (آهن خالص) این نمودار را تشکیل می‌دهد. کروم عنصری است که موجب پایداری ساختار فریت با شبکه bcc می‌شود، بنابراین با افزایش میزان کروم نواحی پایداری فازهای دمای بالا (فریت دلتا) و دمای پایین (فریت آلفا) گسترش می‌یابند. در حدود ۱۲ درصد کروم، فریت bcc کاملاً از دمای اتاق تا دمای ذوب پایدار می‌شود. با گسترش ناحیه پایداری فریت، ناحیه پایداری آستنیت محدود شده و یک ناحیه‌ای اصطلاحاً موسوم به حلقه گاما^۲ را به وجود می‌آورد. شکل ۲ نشان می‌دهد که عناصر تثبیت کننده دیگر فریت مانند وانادیم و مولیبدن، مشابه با کروم عمل کرده و در صورت آلیاژ شدن با آهن تشکیل حلقه گاما می‌دهند.

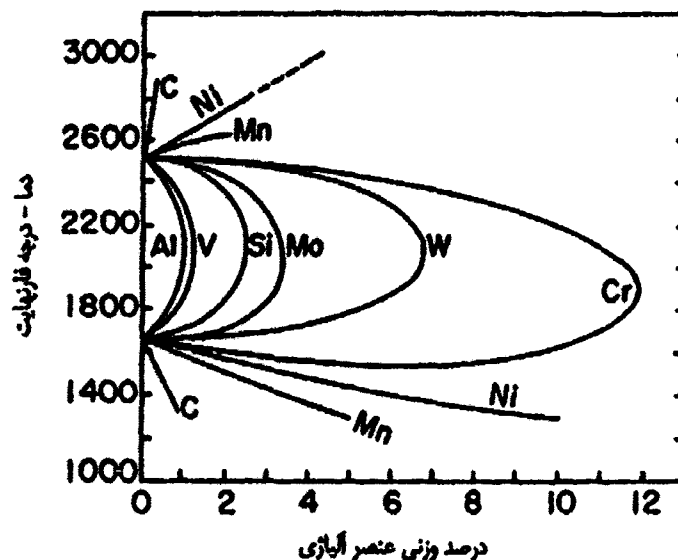


شکل ۱: نمودار تعادلی آهن کروم [۳].

- 1-Allotropic
- 2-Gamma Loop



نمودار آهن-کروم اساس و پایه فولادهای مارتنزیتی و فریتی را تشکیل می‌دهد. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی باید توانایی تبدیل شدن به آستنیت را داشته باشند، تا اینکه در ضمن سرد شدن به مارتنزیت تبدیل شوند. بنابراین، ترکیب شیمیایی فولادهای مارتنزیتی باید در گستره حلقه گاما باشد (که توسط عناصر آلیاژی دیگر گسترش می‌یابد) و همچنین درصد کروم آنها به نحوی تعیین شود که خاصیت زنگ نزن بودن را نیز داشته باشند. فولادهای زنگ نزن فریتی با مقادیر بسیار بیشتر کروم (در مقایسه با فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی) آلیاژ شده، و بنابراین مطابق شکل ۱، فریت در تمام دماها پایدار است. فولادهای زنگ نزن فریتی و مارتنزیتی حاوی عناصر آلیاژی دیگری بجز کروم‌اند، اثرات این عناصر آلیاژی در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت [۱].



شکل ۲: حلقه های گاما تشکیل شده در سیستمهای مختلف دوتایی آهن [۱].

در دماهای کم نمودار فازی آهن-کروم گستره‌ای کامل از محلولهای جامد، وجود ندارد، بلکه دارای فازی میانی است که "فاز سیگما^۱" نام دارد و در کمتر از دمای 821°C تشکیل می‌شود و در حدود ۴۶٪ کروم متمرکز می‌گردد. فاز سیگما دارای ساختار بلوری تتراگونال سخت و شکننده است و در آلیاژهایی حاوی بیش از ۲۰٪ کروم به آسانی تشکیل می‌گردد. به دلیل اینکه این فاز در دماهای نسبتاً کم تشکیل می‌شود، سینتیک ایجاد آن کند بوده و رسوب آن نیاز به زمان کافی در دمای ۶۰۰

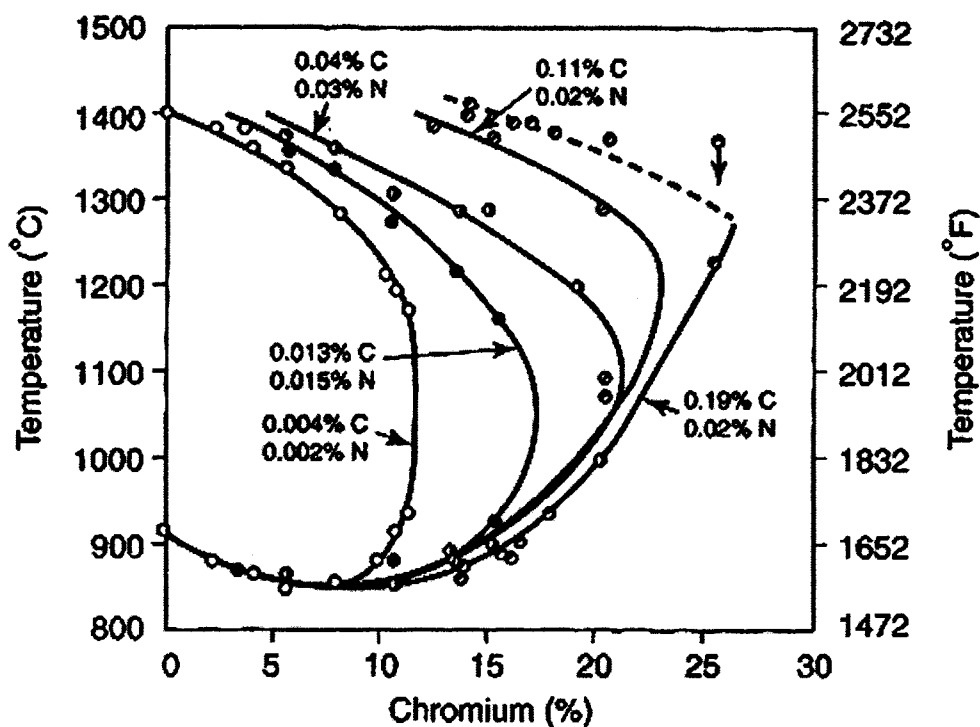
1-Sigma Phase



تا 800°C دارد. از آنجا که فاز سیگما می‌تواند منجر به ساختارهایی ترد و یا دارای خواص مکانیکی متغیر شود، وجود آن در آلیاژهای مهندسی می‌تواند مشکل‌زا باشد.

۲-۲- سیستم آهن-کروم-کربن

افزودن کربن به سیستم آهن-کروم، شرایط تعادل فازی را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهد. از آنجا که کربن یک عنصر پایدار کننده آستنیت می‌باشد، حلقه گاما گسترش پیدا می‌کند و آستنیت در دماهای بالاتر و در مقادیر بالاتر کروم پایدار می‌ماند. اثر کربن بر گسترش محدوده فاز آستنیت در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: اثر کربن بر گسترش محدوده فاز آستنیت [۳].

این پدیده در ایجاد فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی نقش مهمی را ایفا می‌کند، زیرا جهت تشکیل مارتنزیت در هنگام سرد شدن، لازم است فولاد در دمای بالا آستنیتی باشد. برای گروه فریتی اندازه



حلقه گاما باید کنترل شود تا در درجه حرارتهای بالا یا میزان کمی از آستنیت تشکیل شود یا آستنیتی تشکیل نگردد.

به منظور آنکه سیستم سه تایی Fe-Cr-C برحسب تابعی از دما مشاهده شود، ضروریست که یکی از عناصر در مقدار مشخصی ثابت شود. بدین ترتیب نمودارهای فازي شبه دوتایی^۱ تهیه شد. این گونه دیاگرامها به دیاگرامهای شبه دوتایی معروف هستند، زیرا در واقع تجسمی دوبعدی از یک سیستم سه بعدی می باشند. به همین دلیل نمی توان از این دیاگرامها در حالاتی مشابه با دیاگرامهای دو تایی استفاده کرد. به عنوان مثال خطوط مرزی^۲ در دیاگرامهای شبه دوتایی، نمی توانند تعادل فازي را پیش بینی کنند، زیرا ممکن است این خطوط لزوماً در صفحه دیاگرام واقع نباشند. این دیاگرامها بیشتر در فهم بهتر تعادل و تغییرات فازي در سیستمهای سه جزئی کاربرد دارند. در شکل ۴ دو دیاگرام شبه دوتایی مربوط به دو سیستم با ۱۳٪ و ۱۷٪ کروم، کربن متغیر نشان داده شده است.

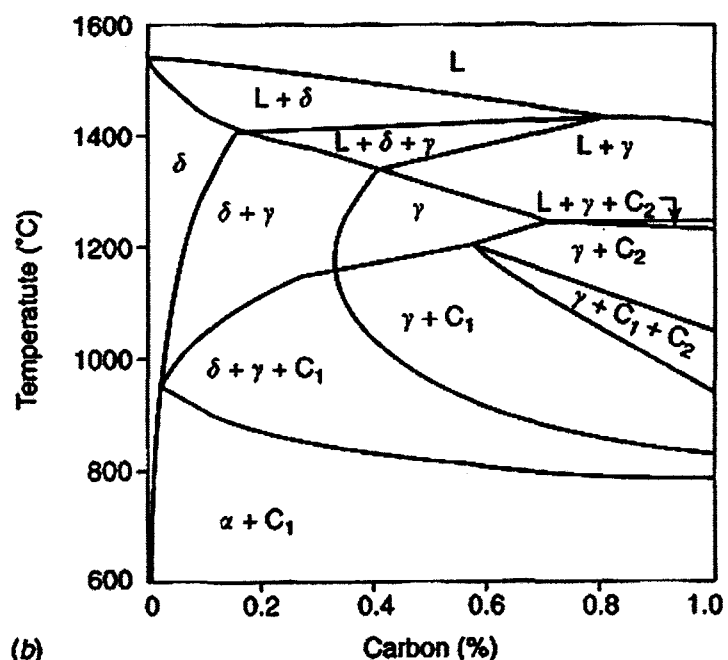
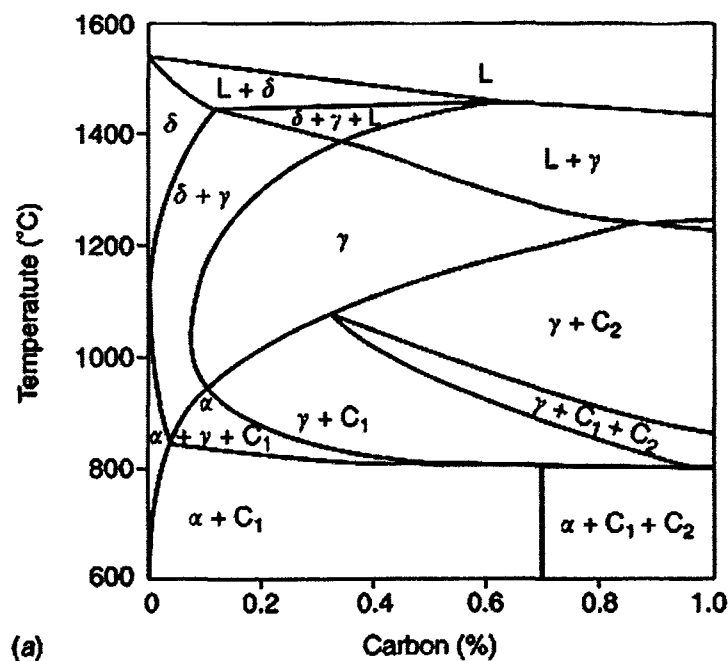
در این حالت، دیاگرام پیچیده تر از حالت ساده آهن-کربن می باشد که دلیل عمده آن نقش میزان کربن و همچنین حضور محدوده های دو یا سه فازي ایجاد شده است. در اثر افزایش مقدار کربن، دو نوع کاربرد متفاوت، یعنی $(Cr,Fe)_{23}C_6$ و $(Cr,Fe)_7C_3$ در دیاگرام ظاهر می شوند.

در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی و فریتی کم کروم، می توان از دیاگرام شبه دوتایی ۱۳٪ کروم در تشریح ریزساختار و پایداری فازي استفاده کرد. در مقادیر بسیار کم کربن (کمتر از ۰/۱٪)، آلیاژهای سه تایی در دماهای بالا کاملاً فریتی می باشند. چنانچه آلیاژ با سرعت کافی سرد شود، ساختار عمدتاً به صورت فریتی باقی می ماند. در مورد دیاگرام ۱۳٪ کروم، این روش مبنای ایجاد فولادهای زنگ نزن کم کروم مانند فولاد نوع ۴۰۹ می باشد.

در مقادیر کربن بالاتر از ۰/۱٪، در دماهای بالا آستنیت تشکیل شده و مخلوطی از آستنیت و فریت را در محدوده های درست زیر دمای انجماد خواهیم داشت. در حین سرد کردن و در دماهای زیر ۱۲۰۰°C، ساختار تماماً آستنیتی خواهد بود. اگر سرعت سرد کردن به اندازه کافی زیاد باشد آستنیت به مارتنزیت تبدیل خواهد شد که این، اساس تشکیل فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی کم کروم مانند نوع ۴۱۰ می باشد.

۱-Pseudo binary Phase Diagram

۲-Tie-Lines



شکل ۴: دیاگرام شبه دوتایی Fe-Cr-C (a) ۱۳٪ کروم و (b) ۱۷٪ کروم
 $(Cr, Fe)_{23}C_6 = C_1$ و $(Cr, Fe)_7C_3 = C_2$ می‌باشد [۳].

مطابق با شکل ۴b با افزایش مقدار کروم (۱۷٪) در سیستم Fe-Cr-C، محدوده فاز فریت گسترش یافته و محدوده آستنیت کوچکتر می‌شوند. این امر نتیجه اثر فریت‌زایی کروم است. فریت تشکیل شده در دمای بالا پایدارتر بوده و برای تشکیل آستنیت در این دما مقادیر کربن بالاتری مورد

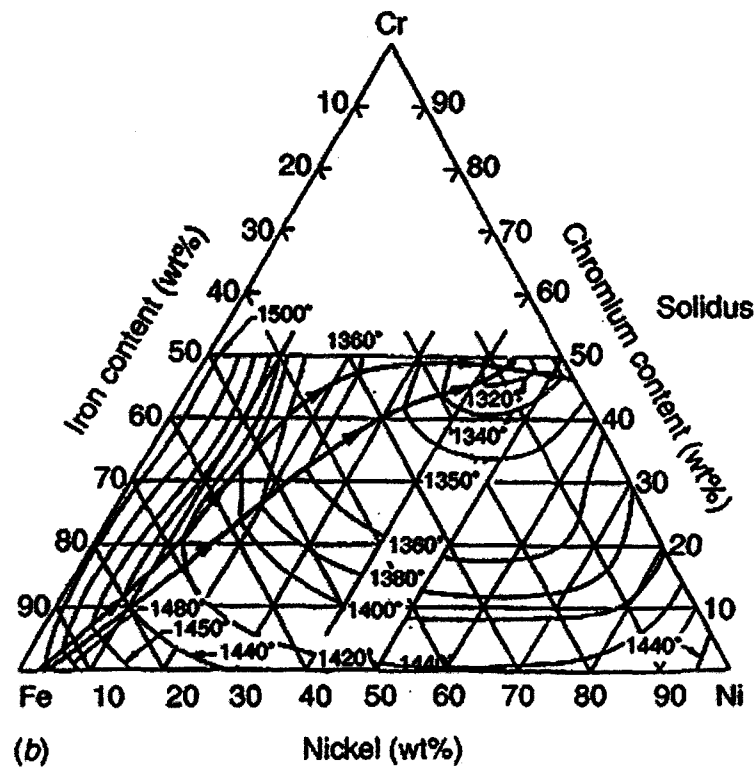
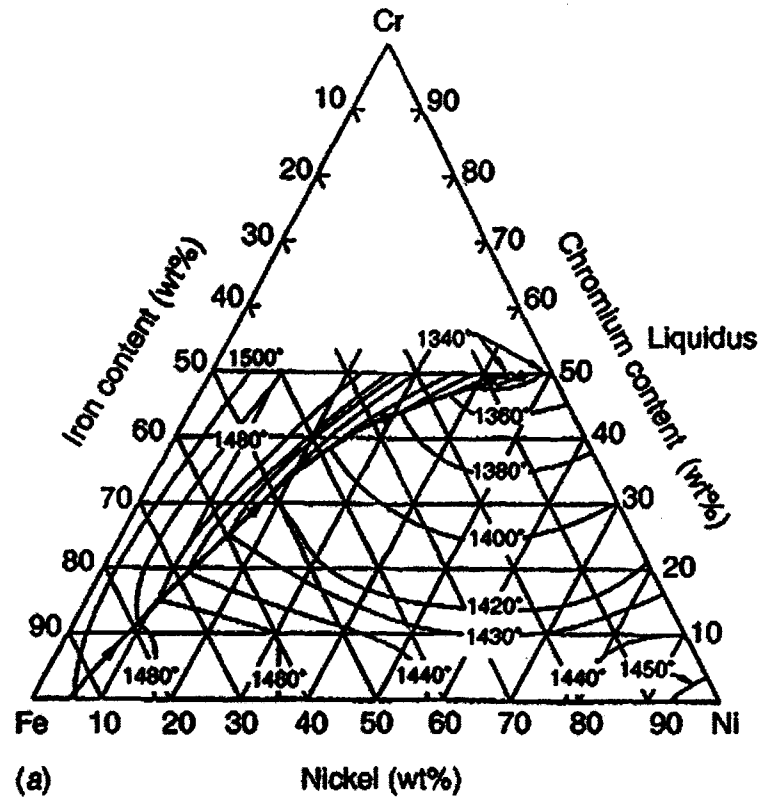


نیاز است. این دیاگرام مبنای تولید فولادهای زنگ نزن فریتی با کروم متوسط، مانند نوع ۴۳۰ و آلیاژهای مارتنزیتی پرکربن با کروم متوسط مانند نوع ۴۴۰ می باشد [۳].

۲-۳- سیستم آهن-کروم-نیکل

پس از کروم، عنصر آلیاژی دیگری که بیشترین اثر بر روی انواع خاصی از فولادهای زنگ نزن دارد، نیکل است. اضافه شدن نیکل به آهن موجب پایداری آهن با شبکه بلوری fcc شده و لذا ناحیه مربوط به فاز گاما را گسترش می دهد. نمودار تعادلی آهن-نیکل نشان می دهد که با وجود مقدار کافی از نیکل، آستنیت در تمام دماهای بالاتر از دمای اتاق پایدار است. در آلیاژ دوتایی آهن-نیکل، به منظور پایداری شدن کامل آستنیت در حدود ۳۰ درصد نیکل لازم است. علت این امر تا حدودی مربوط به این واقعیت می شود که، در نزدیکی دمای اتاق نفوذ آهن و نیکل آنقدر آهسته است که امکان تشکیل مخلوطی از آستنیت و فریت وجود نخواهد داشت. با این حال، اگر کروم در حد مورد نیاز برای تشکیل فولاد زنگ نزن وجود داشته باشد، مقدار به مراتب کمتری نیکل برای پایداری آستنیت نیاز است. در نتیجه، آلیاژهای حاوی ۱۸ درصد وزنی کروم و ۸ درصد وزنی نیکل از دماهایی زیر دمای اتاق تا دمای ذوب کاملاً آستنیتی اند. این نوع فولادها، گروه بسیار مهمی از فولادهای تحت عنوان فولادهای زنگ نزن آستنیتی را تشکیل می دهند.

تقریباً تمام فولادهای زنگ نزن حاوی سه جزء و یا بیشترند، بنابراین روابط فازی آنها برحسب دما و ترکیب شیمیایی توسط نمودارهای سه جزئی مشخص می شوند. در شکل ۵، طرح هایی از سطوح مذاب و جامد سیستم سه تایی آهن-نیکل-کروم برای گستره های ترکیب شیمیایی مورد نظر، برای فولادهای زنگ نزن را نشان می دهد. باتوجه به این سطوح، رفتار انجماد آلیاژهای سیستم سه تایی ذکر شده قابل شرح می باشد [۱].



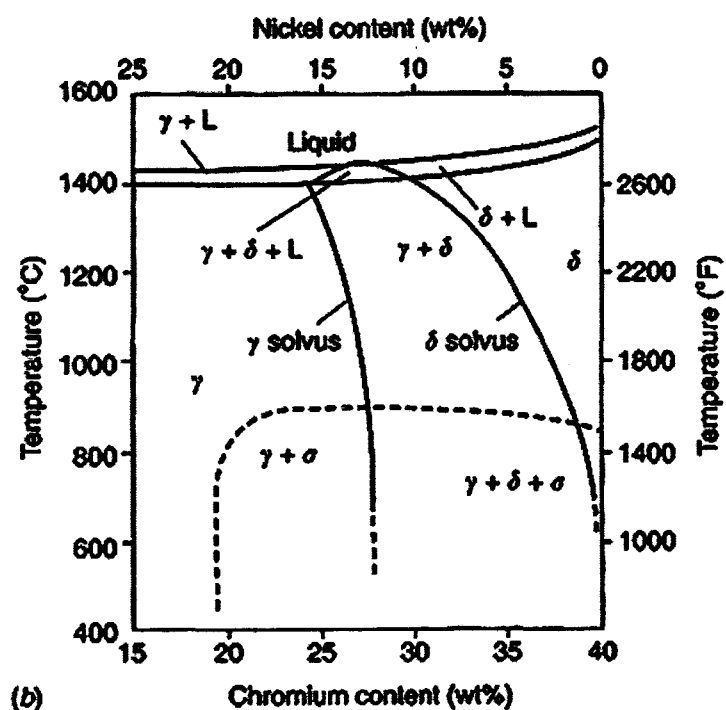
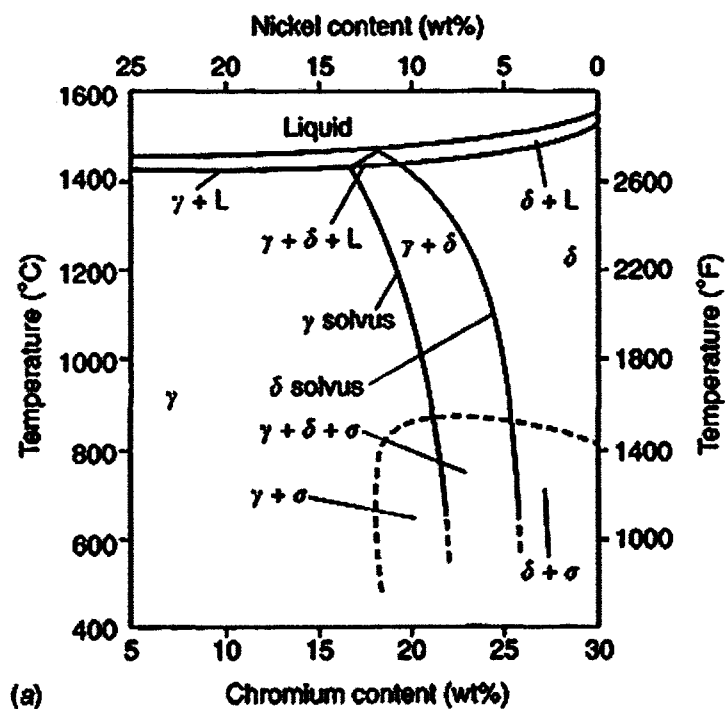
شکل ۵: طرحهایی از سطوح مذاب و جامد سیستم سه تایی آهن-کروم-نیکل [۳].



در سطح لیکیدوس یک خط تیره و ممتد دیده می‌شود که از نقطه‌ای نزدیک گوشه Fe خالص در مثلث تا ضلع Cr-Ni کشیده شده است. این خط محدوده ترکیباتی که به صورت فریت اولیه در جریان سرد شدن باقی خواهند ماند (بالا و سمت چپ خط) را از محدوده ترکیبات که در اثر سرد شدن بصورت آستنیت اولیه باقی می‌ماند جدا می‌کند. در دیاگرام یک نقطه یوتکتیک سه تایی با ترکیب $48\text{Cr}-44\text{Ni}-8\text{Fe}$ دیده می‌شود.

در سطح سالییدوس نیز دوتا از این خطوط تیره دیده می‌شوند که سطح بین آن دو، محدوده‌ای است که در آن آستنیت و فریت جامد به طور مشترک در فاز مذاب وجود دارند و در بالا و پایین این محدوده نیز فاز جامد واقع است. این منطقه، نواحی تک فازی آستنیت و فریت را از هم جدا می‌کند. با در نظر گرفتن یک مقطع با مقدار Fe ثابت در نمودار سه گانه فازی از دمای لیکیدوس تا دمای اتاق، یک نمودار فازی شبه دوتایی از Fe-Cr-Ni ایجاد می‌شود. در شکل ۶ دو نمودار با ۶۰ و ۷۰٪ وزنی Fe که براساس مقاطع سه گانه ایزوترم یا همدمای ایجاد شده است، مشاهده می‌شود. به دلیل اینکه این سیستم یک سیستم سه تایی است، مناطق فازی در سه بعد تشکیل می‌شوند که موجب پیدایش مناطق سه فازی می‌گردد و این مناطق در دیاگرامهای فازی دوتایی معمولی تشکیل نمی‌گردند.

منطقه مثلثی کوچک ایجاد شده بین خطوط لیکیدوس و سالییدوس یک منطقه سه فازی متشکل از آستنیت+فریت+مذاب است که آلیاژهای آستنیتی منجمد شده در سمت چپ را از آلیاژهای فریتی جدا می‌کند. در حالت جامد، در مقادیر کروم بیشتر از ۲۰٪، فاز فریت در دماهای بالا پایدار است. در محدوده بین ۲۰ تا ۲۵٪ کروم، با کاهش دما، بخشی از این فریت به آستنیت تبدیل می‌گردد. فاز آستنیتی (که در سمت چپ مثلث سه فازی قرار دارند) حین سرد شدن تا دمای اتاق به فرم آستنیتی باقی خواهند ماند. آلیاژهایی که درست در داخل و سمت چپ مثلث سه فازی و به فرم فریتی سرد منجمد می‌گردند لزوماً باید از میان منطقه دوفازی آستنیت-فریت سرد شوند، به همین دلیل بخشی از فریت آنها به آستنیت تبدیل خواهد شد. ساختار ایجاد شده هر چه از سمت راست مثلث دورتر باشد (نسبت Cr/Ni بیشتر باشد) فریت بوجود آمده پایدارتر خواهد بود تا جایی که در طرف راست هر یک از دیاگرامها ساختاری کاملاً فریتی خواهیم داشت. در بخشهای ۷ و ۸ از این دیاگرامها در تشریح تغییرات فازی و تحولات در ریزساختار فولادهای زنگ نزن آستنیتی و دوفازی استفاده خواهد شد [۳].



شکل ۶: مقاطع شبه دوتایی سیستم سه تایی آهن-کروم-نیکل (a) ۶٪ Fe، (b) ۷٪ Fe [۳]



۳- عناصر آلیاژی و دیاگرامهای ساختاری

فولادهای زنگ نزن به غیر از کروم، کربن و نیکل، حاوی عناصر آلیاژی دیگری هستند که به منظور بهبود خواص مکانیکی و خوردگی یا کنترل ریزساختار به آنها اضافه می‌شود. در این بخش مروری بر اثر عناصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن و توسعه دیاگرامهای ساختاری جهت پیش‌بینی ریزساختار، براساس ترکیب شیمیایی خواهد شد.

۳-۱- عناصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن

فولادهای زنگ نزن آلیاژهای پایه آهن می‌باشند که مقدار آهن در ترکیب آنها بین ۵۰ تا ۸۸٪ وزنی متغیر است. عناصر آلیاژی اصلی که به فولاد زنگ نزن افزوده می‌شوند، عبارتند از کروم و کربن برای انواع فریتی و مارتنزیتی، همچنین نیکل، برای انواع آستنیتی و دو فازی. ضمناً تمام این فولادها دارای منگنز و سیلیسیم می‌باشند که به جهت مقاصد خاصی به آنها افزوده می‌شوند. از عناصر آلیاژی دیگری که به این فولادها افزوده می‌شوند می‌توان به مولیبدن، نایوبیم، تیتانیم، آلومینیم، مس، تنگستن، نیتروژن و عناصر دیگر اشاره کرد که به جهت بهبود خواص شکل پذیری و ساخت، ایجاد خواص ویژه، افزایش مقاومت به خوردگی و یا تأثیر گذاشتن بر روی ریزساختار، به فولادها اضافه می‌گردند. عناصر ناخالصی از جمله نیتروژن، اکسیژن، گوگرد و فسفر نیز عموماً در فولادها یافت می‌شوند. هر یک از این افزودنیها و ناخالصیها تأثیر جداگانه‌ای بر جوش پذیری و کارایی آلیاژ به دست آمده، دارند. در اکثر موارد میزان عناصر موجود در فلز پایه یا افزودنی‌ها به دقت اندازه‌گیری و کنترل می‌گردد تا از حصول نتیجه و خواص مورد نظر در آلیاژ به دست آمده اطمینان حاصل شود. در این بخش به تأثیر این عناصر آلیاژی بر روی خواص و کارایی فولاد زنگ نزن، اشاره می‌شود.

۳-۱-۱- کروم

هدف اصلی از افزودن کروم به فولاد افزایش مقاومت به خوردگی در آن است. تأثیر کروم بخصوص در محیط‌های اکسید کننده مثل اسید نیتریک بسیار مطلوب خواهد بود. با افزودن کروم، اکسید استوکیومتری $(Fe, Cr)_2O_3$ بر روی سطح فولاد شکل می‌گیرد. در واقع حضور کروم پایداری اکسید را افزایش می‌دهد زیرا تمایل کروم به جذب اکسیژن بیشتر از آهن است. با افزایش میزان کروم



به میزان ۱۰/۵٪، فولاد تبدیل به فولاد زنگ نزن می شود. مقادیر بیشتر کروم به جهت پایداری اکسید در محیط هایی با قدرت خوردگی بیشتر لازم است.

کروم همچنین اثر فریت زایی دارد. همانطور که در اشاره شد، آلیاژهای آهن-کروم که بیش از ۱۲٪ کروم داشته باشند، کاملاً فریتی خواهند بود. در آلیاژهای Fe-Cr-C و Fe-Cr-Ni-C افزایش میزان کروم موجب بوجود آمدن فریت و حفظ آن در گروه های مارتنزیتی، آستنیتی و دوفازی می گردد. در آلیاژهای فریتی، کروم اصلی ترین گزینه برای پایدارسازی ریزساختار فریتی است.

کروم یک عامل کاربیدزای قوی نیز هست. متداول ترین کاربید پرکروم، $M_{23}C_6$ است که در آن M غالباً کروم می باشد ولی ممکن است درصدی از آن شامل آهن یا مولیبدن نیز باشد. در اکثر فولادهای زنگ نزن این کاربید یافت می شود. همچنین ممکن است کاربید Cr_7C_3 نیز ایجاد شود اما تولید این کاربید چندان و بارز نیست. کاربید و کربونیتريدهای $[M_{23}(C,N)_6]$ پیچیده دیگری نیز ممکن است تولید شوند. ضمناً کروم با نیتروژن ترکیب شده و نیتريد تشکیل می دهد که رایج ترین آنها Cr_2N است که در انواع فولاد فریتی و دوفازی دیده می شود. کروم همچنین عامل اصلی در شکل گیری ترکیبات بین فلزی است که اکثر آنها میل به ترد کردن فولاد زنگ نزن خواهند داشت. متداول ترین این ترکیبات فاز سیگما (σ) می باشد که در سیستم Fe-Cr به صورت ترکیبی از این دو فاز در دمای زیر $815^\circ C$ ایجاد می شود. این فاز تقریباً در همه انواع فولادهای زنگ نزن می تواند شکل بگیرد اما بیشتر در آلیاژهای پرکروم آستنیتی، فریتی، و دوفازی دیده می شود. کروم همچنین در فازهای بین فلزی چی^۱ و لاوله^۲ نیز حضور دارد.

از دیدگاه خواص مکانیکی، کروم می تواند به عنوان یک اتم جانشین در شبکه های کریستالی fcc و bcc باشد که این امر تا حدودی موجب استحکام بخشی محلول جامد در فولاد خواهد شد. مقادیر بالای کروم در آلیاژهای فریتی به خصوص زمانیکه کربن و نیتروژن در سیستم حضور داشته باشند، می تواند منجر به کاهش چقرمگی و شکل پذیری گردد. برای داشتن خواص مکانیکی قابل قبول در جوشکاری انواع فولادهای فریتی پرکروم می بایست کربن و نیتروژن آنها را به طور قابل توجهی کاهش داده شود.

۱- Chi(χ)

۲- Laves



۳-۱-۲- نیکل

نقش اصلی نیکل در فولادها، خاصیت آستنیت زایی آن است که باعث ایجاد ساختاری غالباً آستنیتی یا آستنیتی-فریتی در آلیاژهای حاوی آن می‌گردد. با افزودن مقادیر کافی از نیکل، محدوده فاز آستنیت به طور قابل توجهی گسترش پیدا کرده و این فاز تا دمای اتاق و حتی پایین‌تر پایدار می‌ماند. نیکل عامل کاربیدزای قوی نبوده و معمولاً موجب ایجاد ترکیبات بین فلزی نمی‌گردد. تحقیقات نشان می‌دهد که افزودن این عنصر به آلیاژهای فریتی موجب بهبود کلی در مقاومت به خوردگی، بخصوص در محیط‌های کاهنده یا احیایی مثل اسید سولفوریک می‌گردد. با این حال نیکل در کاهش مقاومت به شکست ناشی از خوردگی همراه با تنش (SCC) تأثیر دارد. نیکل یک عامل موثر در استحکام بخشی محلول جامد است اما تأثیر اصلی آن در افزایش میزان چقرمگی در انواع فولادهای فریتی و مارتنزیتی است. افزودن ۲٪ نیکل به فولاد زنگ نزن پرکروم فریتی تا حد قابل توجهی دمای انتقال نرمی به تردی (DBTT) را کاهش می‌دهد.

۳-۱-۳- منگنز

منگنز تقریباً به تمامی فولادها افزوده می‌شود. در فولادهای زنگ نزن آستنیتی میزان این فلز عموماً بین ۱ تا ۲٪ است. در انواع فریتی و مارتنزیتی نیز این مقدار معمولاً کمتر از ۱٪ می‌باشد. از این فلز برای جلوگیری از پارگی داغ^۱ در حین ریختگری استفاده می‌شود. این حالت نوعی از ترک خوردگی هنگام انجماد است که به دلیل تشکیل ترکیبات یوتکتیک سولفید آهن با دمای ذوب پایین روی می‌دهد. چون منگنز نسبت به آهن راحتتر با گوگرد ترکیب می‌شود، افزودن مقادیر کافی از آن موجب تشکیل سولفید پایدار منگنز (MnS) و در نتیجه رفع مشکل پارگی داغ می‌گردد. منگنز عموماً به عنوان یک عنصر آستنیت‌زا تلقی می‌گردد، اما میزان آستنیت‌زایی بستگی به مقدار آن و همچنین نیکل موجود دارد. منگنز در جلوگیری از تبدیل آستنیت به مارتنزیت در دماهای پایین و پایداری آن بسیار موثر است، اما توانایی آستنیت‌زایی منگنز در دماهای بالا به ترکیب کلی آلیاژ بستگی دارد. به عنوان مثال در فولادهای زنگ نزن آستنیتی مانند نوع ۳۰۴، توانایی منگنز در ایجاد آستنیت در مقابل فریت بسیار کم است. تأثیر منگنز بر خواص مکانیکی بسیار ناچیز است. این عنصر به میزان کمی موجب استحکام بخشی محلول جامد شده و تأثیر بسیار کمی هم بر روی تردی دارد.

^۱-Hot Shortness



۳-۱-۴- سیلیسیم

این عنصر نیز تقریباً در تمام فولادهای زنگ نزن حضور داشته و هدف اصلی از افزودن آن اکسیدزدایی در هنگام ذوب است. در اغلب آلیاژها مقدار این عنصر بین ۰/۳ تا ۰/۶٪ است. گاهی اوقات در فرآیند اکسید زدایی، آلومینیم جایگزین سیلیسیم می‌شود که در مورد فولادهای زنگ نزن بسیار کم اتفاق می‌افتد. مشاهده شده است که افزودن سیلیسیم به میزان ۴ تا ۵٪ مقاومت به خوردگی را افزایش داده و ضمناً وجود این عنصر به میزان ۱ تا ۳٪ در برخی آلیاژهای مقاوم حرارت، مقاومت آنها را در برابر پوسته شدن ناشی از اکسیداسیون در دماهای بالا، بهبود می‌بخشد. اثر این عنصر بر فریت یا آستنیت‌زایی هنوز به درستی مشخص نشده است. در فولادهای زنگ نزن آستنیتی افزودن سیلیسیم تا ۱٪ وزنی تأثیری بر تعادل فازي ندارد اما به نظر می‌رسد مقادیر بیشتر آن فریت‌زایی را تشویق می‌کند. در فولادهای زنگ نزن فریتی و مارتنزیتی نیز سیلیسیم به ایجاد فریت کمک می‌کند.

سیلیسیم عامل تشکیل تعدادی از ترکیبات بین فلزی (سیلیسیدهای آهن) $(Fe_5Si_3, Fe_3Si, Fe_2Si, FeSi)$ و همچنین ترکیب بین فلزی Cr_3Si می‌شود که همگی تمایل به ترد کردن ساختار را دارند. سیلیسیم در جریان انجماد گرایش به جدایش دارد که این امر موجب پیدایش ترکیب های یوتکتیک با دمای ذوب پایین بخصوص در ترکیب با نیکل می‌گردد. به همین دلایل همواره سعی می‌شود میزان این عنصر کمتر از ۱٪ وزنی در ترکیب نگه داشته شود. سیلیسیم سیالیت فولاد مذاب را به خوبی افزایش می‌دهد. به همین دلیل گاهی از این عنصر در مقادیر بالاتر برای فلزات پرکننده جوش استفاده می‌شود. بعضی از فولادهای زنگ نزن بخصوص انواع آستنیتی آن در حالت مذاب، سیالیت کمی دارد که افزودن سیلیسیم تا حد زیادی به سیال شدن فولاد کمک می‌کند.

۳-۱-۵- مولیبدن

این عنصر به برخی از فولادهای زنگ نزن افزوده شده و تأثیر و عملکرد آن بستگی به نوع فولاد دارد. در انواع فریتی، آستنیتی و دوفازی افزودن مولیبدن تا ۲٪ وزنی و یا حتی بیشتر (در انواع سوپر آستنیتی) موجب افزایش مقاومت به خوردگی بخصوص خوردگی های شیاری و حفره‌ای می‌گردد. ضمناً در فولادهای زنگ نزن آستنیتی مولیبدن باعث افزایش استحکام در دماهای بالا می‌شود. به عنوان مثال افزودن ۲٪ مولیبدن به آلیاژ استاندارد 18Cr-8Ni موجب ۴۰٪ افزایش در میزان استحکام کششی در دمای $760^{\circ}C$ می‌گردد. این عنصر همچنین می‌تواند اثر منفی نیز داشته باشد،



بدین صورت که آلیاژهای مولیبدن دار به سختی تحت کارگرم قرار می گیرند. مولیبدن ضمناً در بعضی از فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی نقش کاربیدزایی دارد. افزودن کمتر از ۰/۵٪ از این عنصر به فولاد خصوصیات مربوط به سختکاری ثانویه را افزایش می دهد که موجب افزایش استحکام کششی و تسلیم در دمای اتاق و بهبود خواص در دمای بالا می گردد. مولیبدن یک عنصر فریت زا بوده و حضور آن موجب تولید و حفظ فریت در ریزساختار می شود. این پدیده در فولادهای مارتنزیتی می تواند یک مشکل باشد زیرا فریت باقی مانده در دمای اتاق موجب کاهش چقرمگی و شکل پذیری می گردد.

۳-۱-۶- عناصر کاربیدزا

علاوه بر کروم و مولیبدن برخی دیگر از عناصر نیز در فولادهای زنگ نزن قابلیت کاربیدزایی دارند. این عناصر شامل نایوبیم، تیتانیم، تنگستن، تانتالم و وانادیم می باشند. نایوبیم و تیتانیم به فولادهای زنگ نزن آستنیتی افزوده می شوند تا موجب پایداری کربن و جلوگیری از خوردگی بین دانه های گردند. هر دوی این عناصر یک کاربید از نوع MC تشکیل می دهند که در طی فرآیند جوشکاری و عملیات حرارتی مقاوم بوده و در نتیجه از تشکیل کاربیدهای پرکروم $M_{23}C_6$ که موجب شروع خوردگی بین دانه های می شوند جلوگیری می کند. این پدیده به طور مفصل در بخش ۷ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تنگستن تانتالم و وانادیم نیز به برخی از فولادهای زنگ نزن خاص افزوده می شوند تا با ایجاد یک توزیع مناسب کاربید در فولاد، استحکام لازم را در دمای بالا ایجاد کنند. تمامی این عناصر با درگیر کردن و خنثی کردن کربن که یک عامل آستنیت زای قوی است موجب تشکیل فریت می شوند.

۳-۱-۷- عناصر رسوب سختی

با افزودن آلومینیم، تیتانیم، مس و مولیبدن به فولادهای زنگ نزن واکنشی رسوبی رخ می دهد که موجب افزایش سختی آلیاژ می شود. آلیاژهای مارتنزیتی قابل رسوب سختی دارای مس، آلومینیم و مولیبدن بوده و می توان با عملیات حرارتی استحکام تسلیم آنها در دمای اتاق را به بیش از ۱۳۷۵Mpa رساند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی رسوب سختی نیز عموماً دارای تیتانیم و آلومینیم بوده و رسوبهای Ni_3Ti و Ni_3Al (γ') که مشابه رسوبهای سختی ساز ایجاد شده در سوپرآلیاژهای پایه نیکل می باشد در آنها تشکیل می گردد. آلومینیم در محلول جامد یک عامل فریت زای قوی است.



از سوی دیگر مس یک عنصر آستنیت زای ضعیف می‌باشد. از رسوب مس تقریباً می‌توان برای سختکاری فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی مانند نوع 17-4pH استفاده کرد.

۳-۱-۸- عناصر بین نشینی (کربن و نیتروژن)

کربن در انواع فولادها موجود است. اما برخلاف فولادهای کربن-منگنزدار و کم آلیاژ ساختمانی، در فولادهای زنگ نزن معمولاً میزان کربن در حد کمتر از ۰/۱٪ کنترل می‌شود. تنها استثنا فولادهای مارتنزیتی هستند که کربن در آنها موجب استحکام بخشی در اثر استحاله می‌گردد. کربن باعث استحکام بخشی بین نشین در محلول بخصوص در دماهای بالا می‌گردد. در اکثر آلیاژها همانطور که ذکر شد کربن با سایر عناصر ترکیب شده و تشکیل کاربید می‌کند به عنوان مثال در صورت تشکیل کاربیدهای پرکروم $M_{23}C_6$ کاهش قابل توجهی در میزان مقاومت به خوردگی رخ می‌دهد و از این رو آلیاژهای کم کربن^۱ با کربن کمتر از ۰/۰۰۴٪ تولید می‌شوند.

نیتروژن نیز با این که غالباً به عنوان یک ناخالصی در اکثر فولادهای زنگ نزن حضور داشته و شناخته می‌شود اما در برخی از انواع آستنیتی و تقریباً تمام فولادهای دو فازی این عنصر به صورت عمدی افزوده می‌شود. مشابه کربن، نیتروژن نیز یک عامل قوی در استحکام بخشی محلول جامد بوده و افزودن ۰/۱۵٪ از آن به آلیاژهای آستنیتی، استحکام را در حد قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. اثر استحکام بخشی نیتروژن در آستنیت به خصوص در دماهای زیر صفر قابل توجه است. در فولادهای زنگ نزن دو فازی هدف از افزودن نیتروژن، مهمتر از اثر استحکام بخشی آن، افزایش مقاومت به خوردگی بخصوص انواع شیاری و حفراهی می‌باشد. برخی از فولادهای دو فازی تا حدود ۰/۳٪ نیتروژن دارند. حلالیت نیتروژن در فولادهای زنگ نزن بخصوص در فاز فریت کم است. افزودن منگنز به فولادهای زنگ نزن آستنیتی حلالیت نیتروژن را در آنها بالا می‌برد. در مورد انواع فریتی و دوفازی با گذر از حد حلالیت، رسوبهای Cr_2N در فاز فریت تشکیل می‌شود که این مورد را می‌توان در جوش و نواحی HAZ این آلیاژها و در حالتی که میزان قابل توجهی از آستنیت نتوانسته باشد در هنگام سرد کردن از دمای بالای ۱۱۰۰°C تشکیل شود، مشاهده کرد.

کربن و نیتروژن در بین عناصر بیشترین تأثیر آستنیت زایی را دارد و بنابراین در صورتیکه نیاز به یک ساختار دقیق وجود داشته باشد می‌بایست مقدار این عناصر به خوبی کنترل شود. این عمل بوسیله کنترل مقدار هر یک از آنها در ترکیب آلیاژ و یا افزودن عناصر کاربیدزا (Ti, Nb) یا نیتريدزا

^۱-L-grade



(Ti,Al) که تأثیر نیتروژن و کربن را در شبکه خنثی می‌کنند انجام پذیر است. در حین جوشکاری قوسی اگر پوشش موجود مطلوب و کافی نباشد ممکن است ورود نیتروژن اتمسفر به قطعه کار ترکیب مطلوب فلز را برهم زند. در آلیاژهای پرنیتروژن آستنیتی و دو فازي نیز از دست دادن نیتروژن در حین جوشکاری می‌تواند مشکل ساز باشد. در جوشکاری فولادهای زنگ نزن دو فازي گاهی اوقات برای رسیدن به مقادیر مورد نظر، گاز نیتروژن را در محیط وارد می‌کنند.

۳-۱-۹- عناصر دیگر

عناصر دیگری نیز وجود دارند که برای مقاصد خاصی به فولادهای زنگ نزن افزوده می‌شوند. مانند گوگرد، سلنیم و سرب عناصری هستند که به انواع فولادهای ماشینکاری شونده^۱ اضافه می‌شوند تا قابلیت ماشینکاری فولاد افزایش یابد. این امر باعث افزایش سرعت ماشینکاری و عمر تجهیزات نیز می‌شود. این عناصر مقاومت به خوردگی و قابلیت جوش پذیری فولادها را کاهش می‌دهند. با این حال می‌توان با کنترل رفتار انجماد (به نحوی که ابتدا فریت اولیه تشکیل شود) تأثیر گوگرد را خنثی کرد که در بخش ۷ توضیح داده خواهد شد. تنگستن نیز برای افزایش مقاومت به فولادهای زنگ نزن اضافه می‌شود و به نظر می‌رسد که این فلز خاصیت فریت زایی داشته باشد. آلومینیم به بعضی از انواع فریتی کم کروم اضافه می‌شود و مقاومت کلی در برابر خوردگی را در آنها بهبود می‌بخشد. کبالت نیز یک عنصر استحکام بخش محلول جامد بوده و در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی می‌تواند دمای شروع مارتنزیت (M_s) را افزایش دهد. ضمناً این عنصر خاصیت آستنیت زایی دارد [۳].

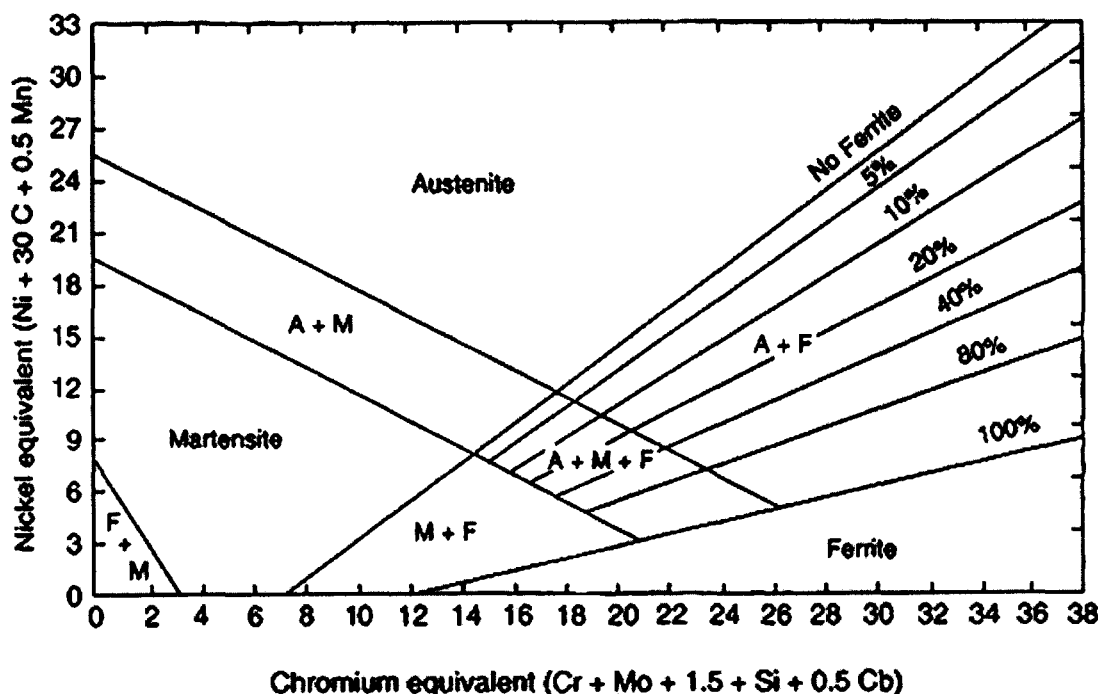
۳-۲- دیاگرامهای ساختاری

پیش‌بینی ساختار کریستالی و خواص مکانیکی یک فولاد زنگ نزن، مانند امکان بروز ترک‌های گرم، مقاومت به خوردگی و غیره، موضوع مورد بحثی است که در این بخش به مطالعه آن پرداخته خواهد شد. وجود دیاگرام‌های ساختاری تجربی، می‌تواند عملاً در این پیش‌بینی، نقش به سزایی داشته باشد.

1-Free-Machining

۳-۲-۱- دیاگرام ساختاری Schaeffler

Schaeffler در سال ۱۹۴۹ میلادی، دیاگرام ساختاری معروف خود را مطرح کرد (شکل ۷). دیاگرام ساختاری که قبل از این دیاگرام مطرح بود، مربوط به پیش‌بینی ریزساختار فولادهای کار شده کروم-نیکل و معادلات قبلی، معادلاتی بود که دقیقاً مرتبط با جوشکاری بود. Schaeffler در تحقیقات خود، سعی بر آن داشت که با ترکیب این اطلاعات، دیاگرام ساختاری تهیه کند که براساس ترکیب شیمیایی، پیش‌بینی مناسبی از ریزساختار فلز جوش را ارائه کند. دیاگرام Schaeffler شامل دو محور عمود بر هم که در آن محور عمودی معرف درصد نیکل معادل ($Ni_{eq} = Ni \text{ equivalent}$) و محور افقی نشان دهنده درصد کروم معادل ($Cr_{eq} = Cr \text{ equivalent}$) می‌باشد.



شکل ۷: دیاگرام ساختاری Schaeffler-۱۹۴۹ تاکنون [۳].

عناصر پایدار کننده آستنیت و عناصر پایدارکننده فریت، به ترتیب در فرمول نیکل معادل و کروم معادل قرار می‌گیرند و اثر این عناصر بر پایداری فازهای ذکر شده با توجه به ضریب عنصر مشخص می‌گردد. فرمول برای نیکل و کروم معادل به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳]:

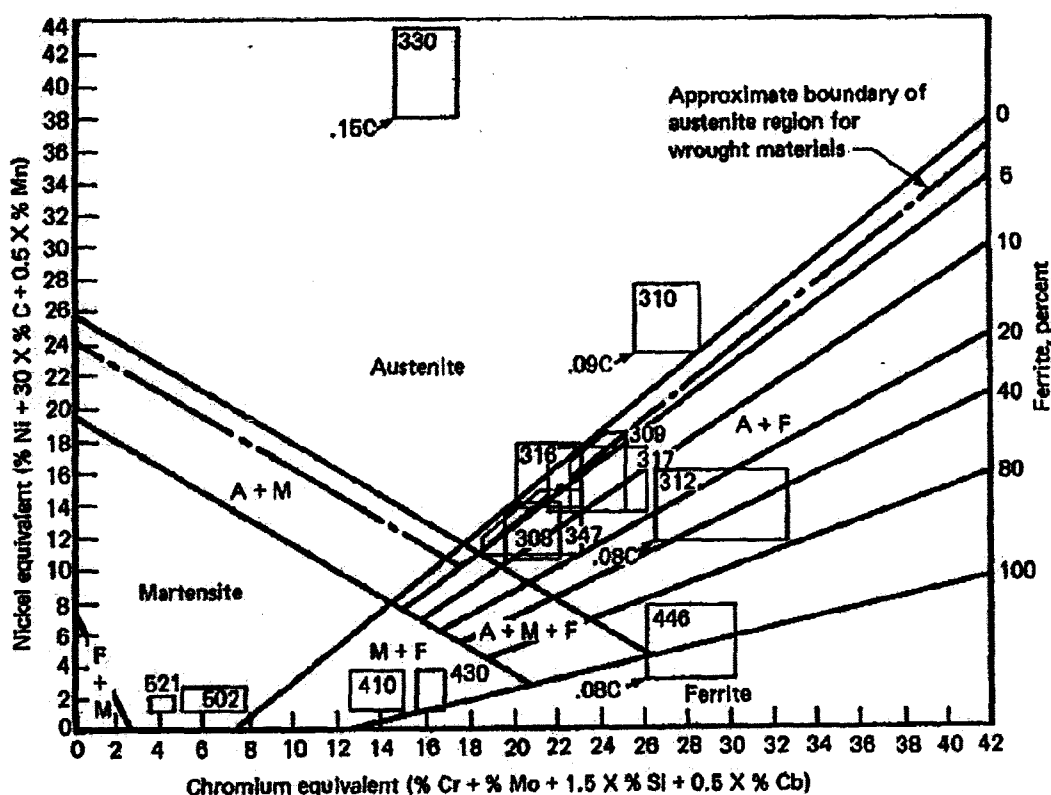
$$Ni_{eq} = Ni + 0.5Mn + 30C$$

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb$$



برای استفاده از این دیاگرام، ابتدا باید از روی آنالیز شیمیایی فولاد زنگ نزن پایه، مقدار Ni_{eq} و Cr_{eq} را محاسبه کرد، سپس با انتقال اعداد به دست آمده، می‌توان پیش‌بینی کرد که فولاد زنگ نزن مورد نظر، دارای چه فاز یا ساختار متالورژیکی است و درصد هر یک از فازهای موجود در ساختار آن چقدر می‌باشد. دیاگرام Schaeffler به طور تجربی روی ۳۰۰ نوع فولاد زنگ نزن با ترکیبات شیمیایی متفاوت آزمایش شده که نتیجه آن برای همه این فولادها مثبت بوده است. از اینرو می‌توان گفت که دیاگرام مذکور یک منبع پیش‌بینی بسیار مهم برای جوشکاری و انتخاب پارامترهای فولادهای زنگ نزن است [۴]. در شکل ۸، موقعیت برخی از فولادهای زنگ نزن در دیاگرام Schaeffler نشان داده شده است. با استفاده از روابط تعادلی Schaeffler (Nieq, Creq) Seferian، با استفاده از فرمول زیر میزان فریت دلتا را در فلز جوش آستینیتی محاسبه کرد:

$$\text{delta ferrite} = 3(Cr_{eq} - 0.93Nieq - 6.7)$$



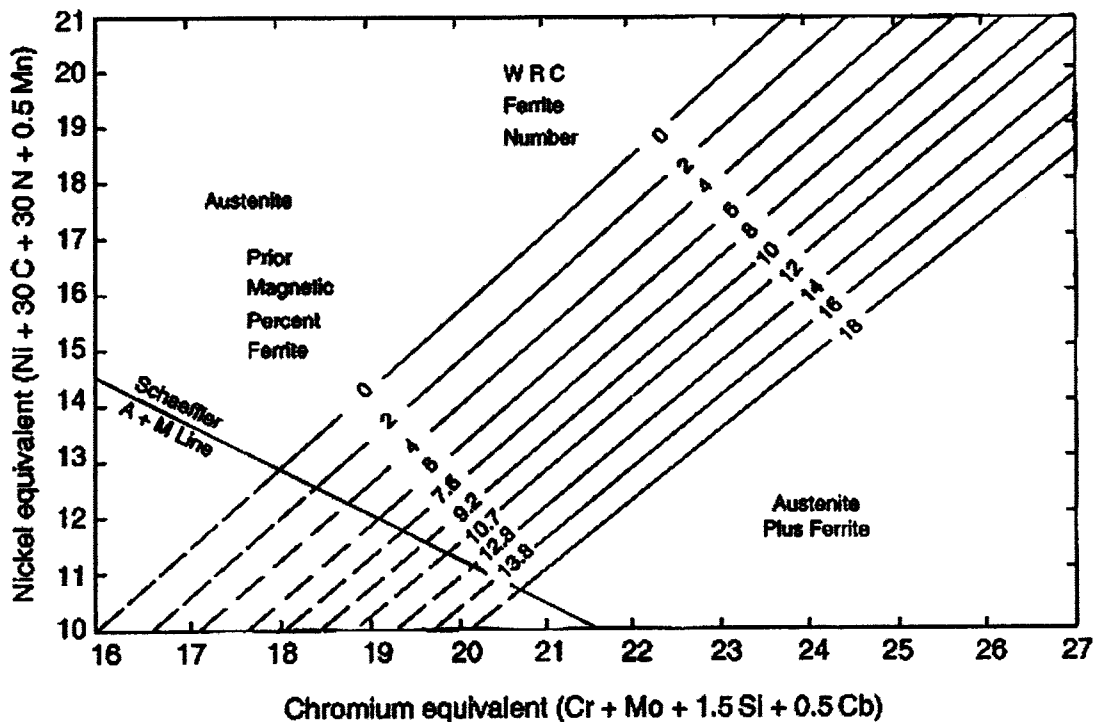
شکل ۸: دیاگرام Schaeffler جهت تخمین ریزساختار فلز جوش فولاد زنگ نزن [۲].

۳-۲-۲- دیاگرام ساختاری Delong

Delong و همکارانش در سال ۱۹۷۴ میلادی، به جای پیش‌بینی ساختار فلز جوش برای تمام محدوده ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن، بخش ویژه‌ای از دیاگرام Schaeffler که مربوط به فولادهای زنگ نزن سری ۳۰۰ می‌شود را مورد بررسی قرار دادند و توانستند پیش‌بینی قابل قبولی از میزان فریت در فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی را داشته باشند. همچنین در دیاگرام Delong، اثر نیتروژن بر ریزساختار فلز جوش و میزان فریت در نظر گرفته شد. بدین ترتیب در فرمول نیکل معادل، مقدار ۳۰ برابر درصد نیتروژن موجود در فولاد زنگ نزن اضافه شد و با تغییر فرمول، موقعیت خطوط دیاگرام تحت تأثیر قرار گرفت. فرمول جدید نیکل معادل براساس رابطه زیر ارائه شد:

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

در شکل ۹ دیاگرام ساختاری Delong مشاهده می‌شود.



شکل ۹: دیاگرام ساختاری Delong از سال ۱۹۷۴ میلادی تاکنون [۳].



به منظور افزایش قابلیت پیش‌بینی میزان فریت پارامتری با نام عدد فریت^۱ (FN) به دیاگرام افزوده شد. مقادیر عدد فریت براساس اندازه‌گیریهای مغناطیسی حاصل شد. (به دلیل مغناطیسی بودن فریت دلتا با شبکه bcc و غیرمغناطیسی بودن آستنیت با شبکه fcc). واحدهای FN را نمی‌توان به طور مستقیم به درصد فریت در دیاگرام Schaeffler نسبت داد، اگرچه در مقادیر زیر ۸، عدد فریت و درصد فریت مشابه هستند. دیاگرام Delong، نسبت به تغییرات حرارت ورودی در محدوده نرمال که همراه جوشکاریهای قوسی می‌باشد، غیرحساس می‌باشد. از اینرو با درجه دقت قابل قبولی مورد استفاده برای فرآیندهایی چون SMAW، GTAW، GMAW و SAW می‌باشد [۳].

برای استفاده از این دیاگرام، ابتدا باید از طریق ترکیب شیمیایی فلز پایه، مقدار Cr_{eq} و Ni_{eq} را محاسبه کرد. اگر مقدار نیتروژن در فلز جوش مشخص نبود، باید به ترتیب زیر عمل کرد:

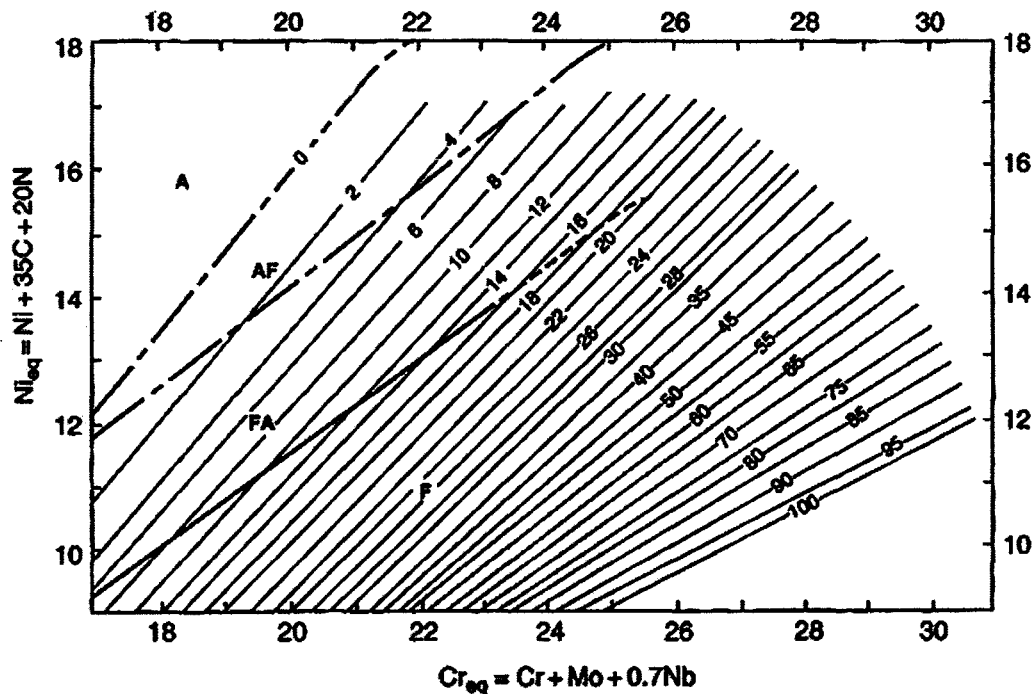
۱- در فرآیندهای GTAW و SMAW مقدار نیتروژن موجود در فلز جوش ۰/۰۶ درصد فرض شود.

۲- در فرآیند GMAW و SAW مقدار نیتروژن را باید ۰/۰۸ درصد فرض کرد [۴].

۳-۲-۳- دیاگرامهای ساختاری WRC-1988 و WRC-1992

در اواسط دهه ۸۰، تلاشهایی به منظور اصلاح و توسعه دیاگرامهای Schaeffler و Delong جهت افزایش دقت پیش‌بینی فریت در فلز جوش فولادهای زنگ نزن انجام شد. در سال ۱۹۸۸، در تحقیقی که توسط WRC پایه‌ریزی شد، Siewert و همکارانش، دیاگرام پیش‌بینی جدیدی را که محدوده ترکیب شیمیایی آن از عدد فریت ۰ تا ۱۸ در دیاگرام Delong به ۰ تا ۱۰۰ تغییر کرده بود، پیشنهاد کردند. این دیاگرام، دیاگرام WRC-1988 نامیده شد (شکل ۱۰).

1-Ferrite Number



شکل ۱۰: دیاگرام ساختاری WRC-1988 که شامل مرزهای حالت انجماد نیز می‌باشد [۳].

در فرمول جدیدی که برای بدست آوردن نیکل معادل در نظر گرفته شد، ضریب منگنز حذف گردید و تخمین بهتری از FN برای فلزات جوش پر آلیاژ بدست آمد. همچنین اطلاعات بدست آمده جهت تخمین و مقایسه دیاگرام WRC-1988 و دیاگرام Delong مورد استفاده قرار گرفت و مشخص شد که دیاگرام جدید به طور قابل توجهی دقیق‌تر است. فرمولهای تعادلی WRC-1988 به صورت زیر می‌باشد:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb$$

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

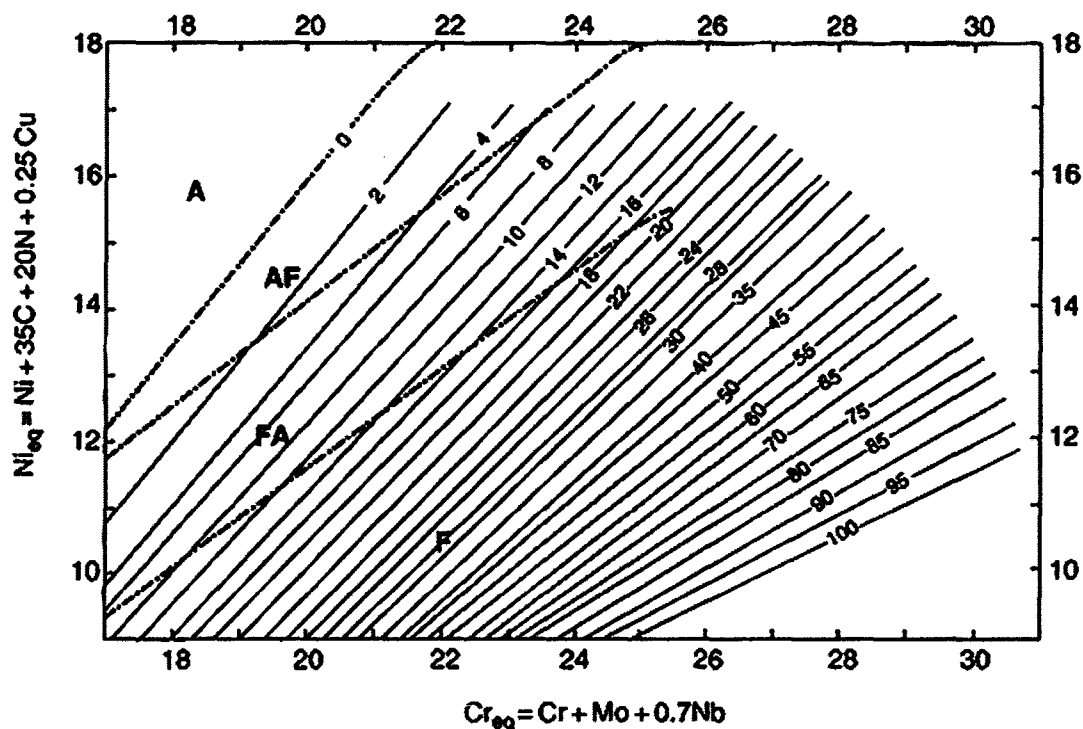
بعد از معرفی دیاگرام WRC-1988، اثر مس بر میزان فریت، به دلیل استفاده از فولادهای زنگ نزن دوفازی که حاوی حدوداً ۲٪ مس می‌باشند، به عنوان موضوع مهمی مورد بررسی قرار گرفت. تحقیقات نشان داد در صورتیکه مس یک عنصر آلیاژی مهم باشد، با آوردن ضریب آن در فرمول نیکل معادل WRC-1988، دقت بیشتری در پیش بینی FN حاصل خواهد شد. مقدار ضریب مس ۰/۲۵ تا ۰/۳۰ پیشنهاد شد. در سال ۱۹۹۲، گروهی از محققین دیاگرام جدیدی را پیشنهاد دادند که دقیقاً



مشابه دیاگرام WRC-1988 بود، به جز آنکه در فرمول نیکل معادل برای مس ضریب ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است [۳].

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

دیاگرام WRC-1992 در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: دیاگرام ساختاری WRC ۱۹۹۲ [۳].

اگرچه دیاگرام ساختاری WRC سال ۱۹۹۲ میلادی برای اغلب فولادهای زنگ نزن پیش بینی بسیار دقیق و صحیحی از عدد فریت (FN) ارائه می‌کند، دیاگرام ساختاری Schaeffler مأخذ بسیار مطمئنی برای پیش بینی برحسب مارتنزیت در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی است، زیرا دیاگرام WRC سال ۱۹۹۲ براساس درصد منگنز موجود در فولاد تنظیم نشده است. منگنز روی استحاله فازی فریت به آستنیت به ویژه در دماهای خیلی بالا (در حین سرد شدن پس از جوشکاری) تأثیر چندانی ندارد. بنابراین، همانگونه که مشخص است اثری از منگنز در Ni_{eq} دیاگرام WRC سال ۱۹۹۲ دیده نمی‌شود، اما وجود منگنز تأثیر به سزایی روی استحاله‌های فازی آستنیت به مارتنزیت در

دماهای پایین و در حین سرد شدن پس از جوشکاری دارد. بدون در نظر گرفتن اثر منگنز در Ni_{eq} هرگز نمی‌توان مرز و محدوده فاز مارتنزیت را در دیاگرام‌های ساختاری مشخص کرد. بنابراین همانگونه که گفته شد، برای بررسی آثار مارتنزیتی در فولادهای زنگ نزن، بهترین مأخذ استفاده از دیاگرام Schaeffler است [۴].

در حال حاضر، دیاگرام WRC-1992، قابل اطمینان‌ترین و دقیق‌ترین دیاگرام موجود جهت پیش‌بینی عدد فریت در فلز جوش فولادهای زنگ نزن آستنیتی و دوفازی می‌باشد.

۴- کلیات جوش‌پذیری و جوشکاری فولادهای زنگ نزن

خواص متالورژیکی هر یک از گروه های فولاد زنگ نزن در کل بیانگر خصوصیات جوش‌پذیری هر یک از فولادهای آن گروه نیز می‌باشد. به عنوان مثال جوش‌پذیری فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی تحت تأثیر سختی پذیری آنهاست که رابطه مستقیم با ترک سرد دارد. در فولادهای زنگ نزن فریتی، اتصالات جوشکاری شده، به دلیل عدم وجود دگرگونی آلوتروپیک (فازی) عامل درشت شدن دانه‌ها می‌شود که کاهش داکتیلیته را به همراه دارد. جوش‌پذیری فولادهای زنگ نزن آستنیتی همچون دیگر آلیاژهای تک فازی با ساختار کریستالی FCC، تابع میزان حساسیت آنها به ترک گرم است. در فولادهای زنگ نزن رسوب سختی شده نیز جوش‌پذیری، تابع مکانیزم هایی است که در ارتباط با واکنشهای سخت کاری می‌باشند.

فولادهای زنگ نزن را تقریباً با اکثر روشهای موجود می‌توان جوشکاری کرد اما محدودیت هایی نیز وجود دارد. به عنوان فولادهایی که دارای آلومینیم یا تیتانیم هستند را فقط باید با روشهای گاز محافظ می‌توان جوشکاری کرد. میزان کارایی اتصال جوش داده شده به توانایی فرآیند جوشکاری در ایجاد ساختاری با خواص مکانیکی یکنواخت در فلز جوش، HAZ، و فلز پایه در شرایط جوشکاری شده یا عملیات حرارتی شده پس از جوش، بستگی دارد. این خواص مکانیکی در فولادهای فریتی، مارتنزیتی یا رسوب سختی شده می‌تواند بسیار متفاوت باشد.



۴-۱- فرآیندهای جوشکاری

فولادهای زنگ نزن را می‌توان به آسانی با روشهای جوشکاری قوسی، پرتوالکترونی، لیزر، مقاومتی و اصطکاکی، جوشکاری کرد. فرآیندهای GTAW, GMAW, FCAW و SMAW نیز از جمله روشهای متداول هستند. از روشهای PAW و SAW نیز در اتصال این فولادها استفاده می‌شود. هر چند که با استفاده از فرآیند SAW می‌توان جوشهای سالمی ایجاد کرد اما با این حال محدودیتهایی نیز وجود دارد. به طور کلی کنترل ساختار فلز جوش ایجاد شده توسط این روش سخت‌تر از سایر روشهای جوشکاری است و دلایل آن تغییرات ولتاژ قوس، همچنین گرمای ورودی بیشتر و سرعت انجماد کمتر از سایر روشهای جوشکاری قوسی است. این شرایط باعث ایجاد فلز جوش با دانه‌های درشت و معمولاً چقرمگی کم خواهد شد. در فرآیند جوشکاری قوسی زیر پودری، در هر یک از فولادهای زنگ نزن، فلاکسهای خاصی قابل استفاده است. بوسیله این فلاکسها می‌توان عناصری همچون Cr, Ni, Mo و Co را به فلز جوش اضافه کرد.

جوشکاری اکسی استیلن فقط در مورد تعمیرات ضروری که تجهیزات جوشکاری قوسی مناسب موجود نباشد، پیشنهاد می‌شود. در صورت استفاده، شعله‌ای خنثی یا با مقدار کمی استیلن (احیا کننده) مناسب خواهد بود. همچنین استفاده از فلاکس با قدرت زیاد جهت انحلال اکسید کروم ضروری است. کنترل دقیقی بر روی شعله، همراه با حداقل حوضچه جوش و گرمای ورودی مناسب نیز می‌بایست صورت گیرد.

۴-۲- محافظت در برابر اکسیداسیون

روش مناسب جوشکاری برای فولادهای زنگ نزن روشی است که در آن فلز مذاب جوش در حین تشکیل قوس الکتریکی و انجماد در مقابل اتمسفر موجود کاملاً محافظت شود. در برخی از روشهای جوشکاری لازم است که برای حذف اکسید کروم و اکسیدهای سطحی مقداری فلاکس اضافه شود تا دو سطح به هم متصل شده و حوضچه تشکیل گردد. اکسید کروم ماده دیرگدازی می‌باشد که در دماهای بالاتر از دمای ذوب فولادهای زنگ نزن ذوب می‌گردد. فلورایدیها مؤثرترین عامل در حذف اکسید کروم در حین جوشکاری می‌باشند. برای فولادهای زنگ نزن از فلورایدیهای کلسیم و سدیم در پوشش الکترودها و فلاکسهای فرآیند SAW استفاده می‌شود.



فلوراید باقی مانده در سرباره جوش، کاملاً خورنده بوده و می‌تواند موجب خوردگی فلز در حین کار در دماهای بالا شود. به همین دلیل سرباره موجود می‌بایست پیش از عملیات حرارتی پس از جوش یا کار در دماهای بالا براده‌برداری یا با استفاده از برس حذف شود. در فرآیندهای جوشکاری با گاز محافظ به ندرت از فلاکسها استفاده می‌شود زیرا گاز محافظ خود موجب جلوگیری از اکسیداسیون می‌باشد.

۴-۳- تمیزکاری قبل و بعد از جوشکاری

مقادیر نسبتاً بالای کروم در فولادهای زنگ نزن موجب پیدایش اکسیدهای مقاوم می‌شود که می‌بایست پیش از جوشکاری حذف شوند. آلودگی‌های سطحی در فولادهای زنگ نزن نسبت به فولادهای کربنی یا کم‌آلیاژ، تأثیر بیشتری در فرآیند جوشکاری دارند. برای داشتن جوش سالم، سطوح مورد نظر برای اتصال می‌بایست قبلاً تمیز شوند. تمیز کردن شامل شیار جوش و نواحی مجاور آن حداقل تا فاصله ۱۳mm می‌باشد. در جوشکاری مقاطع ضخیمتر، توصیه می‌شود محدوده وسیعتری تمیز گردد.

میزان تمیزکاری لازم بستگی به کیفیت مورد نظر جوش و روش جوشکاری به کار برده شده دارد. در روشهای جوشکاری با گاز محافظ به دلیل عدم وجود فلاکس می‌بایست دقت بیشتری کرد. آلودگی‌های کربنی می‌توانند تأثیر مخربی بر خواص متالورژیکی و مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن داشته باشند. بنابراین باید از تجمع کربن ناشی از آلودگی‌های سطحی یا سطوح مجاور جلوگیری کرد. سطوح مورد نظر برای جوشکاری می‌بایست از تمامی هیدروکربنها و آلودگی‌های دیگر مثل روانسازهای برشکاری، گریس، روغن، واکس و آستری، بوسیله حلالهای مناسب پاک شود. لایه‌های نازک اکسیدی ممکن است بوسیله آب نمک پاک شوند اما معمولاً نیاز به روشهای مکانیکی است. تکنیکهای قابل قبول تمیزکاری پیش از جوشکاری عبارتند از:

۱- استفاده از برسهای فولادی زنگ نزن که برای مصارف دیگر به کار نرفته باشند.

۲- پاشش^۱ شن یا ماسه تمیز

۳- ماشینکاری یا سنگ زنی با استفاده از ابزار مناسب و مایعات برش غیرکلرایدی

عملیات تمیزکاری پس از جوشکاری در صورت وجود سرباره جوش لازم است. بهترین روش برای پاک کردن سطح جوش استفاده از برس سیمی یا پولیش مکانیکی است.

1-Blasting



۴-۴- فلزات پرکننده

الکترودهای روپوش دار و سیم جوشهای فولادهای زنگ نزن که تحت استانداردهای AWS پوشش داده شده‌اند به همراه ترکیب شیمیایی مورد نیاز هر یک در جدول های ۲، ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. در بعضی موارد ترکیب شیمیایی الکتروده، سیم جوش و یا رسوب فلزی ایجاد شده توسط الکتروده خاص، با ترکیب شیمیایی فلز پایه کمی تفاوت دارد. این تفاوت‌های اختیاری در واقع اصلاحاتی است که در خواص شیمیایی فلزات پرکننده جوش در نظر گرفته می‌شود تا ساختار مناسب در فلز جوش بدون هیچ گونه ترک یا عدم پیوستگی نامطلوب ایجاد شود.

پوشش الکتروده فولادهای زنگ نزن قابلیت جذب رطوبت از محیط را دارند که می‌تواند موجب حفره دار شدن فلز جوش و همچنین در فولادهای مارتنزیتی کروم دار موجب ترک ناشی از خوردگی شود. این الکترودها در صورت خارج شدن از پوشش بسته بندی و یا کوره‌های پخت می‌بایست، پیش از استفاده در کوره‌هایی با دمای بین ۹۰ تا ۱۲۰°C نگهداری شوند. الکترودهایی که پیش از جوشکاری در محیط مرطوب قرار داشته‌اند می‌بایست طبق شرایط توصیه شده دوباره پخته شوند. الکتروده فولادهای زنگ نزن توپودری به دو صورت بدون گاز محافظ و با گاز محافظ CO₂ یا آرگون ۲+٪ اکسیژن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در جدول ۵ نوع محافظ به همراه یک عدد پسوند نشان داده شده است. گازهای محافظ دیگری نیز ممکن است توسط تولید کنندگان به کار گرفته شود [۲].

• طبقه بندی الکترودهای فولاد زنگ نزن بر حسب کاربرد در SFA-5.4:

پنج طبقه بندی کاربردی برای الکترودهای این سری تهیه و استاندارد گردیده که با یک عدد دو رقمی مندرج در انتهای سمت راست مشخصات الکتروده نشان داده می‌شود (EXXX-XX). این عدد، در حقیقت نوع پوشش الکتروده را نمایش داده و خواص مکانیکی الکتروده را عنوان می‌کند. این پنج طبقه عبارتند از:

الف) گروه (EXXX-15): این الکتروده فقط قابل استفاده با جریان DCEP بوده و اغلب در کلیه وضعیت‌های جوشکاری کاربرد دارند. پوشش این الکترودها نیز به طور معمول قلیایی است.

ب) گروه (EXXX-16): پوشش الکترودهای گروه ۱۶، به طور معمول از مواد یونیزه شونده مثل پتاسیم که قوس الکتریکی پایداری پدید می‌آورند تهیه می‌شود. پوشش آنها رتیلی بوده و با جریان AC یا DCEP، و در تمام وضعیت‌های جوشکاری کاربرد دارند. گرده جوش حاصل از جوشکاری با این الکترودها مقعر می‌باشد.



جدول ۲: ترکیب شیمیایی الکترودهای روپوش دار فولادهای زنگ نزن [۲].

AWS Classification ^a	Chemical composition, weight percent ^b									
	C	Cr	Ni	Mo	Co plus Th	Mn	Si	P	S	N
E209 ^c	0.06	20.5-24.0	9.5-12.0	1.5-3.0	-	4.0-7.0	0.90	0.03	0.03	0.10-0.30
E219	0.06	19.0-21.5	5.5-7.0	0.75	-	8.0-10.0	1.00	0.03	0.03	0.10-0.30
E240	0.06	17.0-19.0	4.0-6.0	0.75	-	10.5-13.5	1.00	0.03	0.03	0.10-0.20
E307	0.04-0.14	18.0-21.5	9.0-10.7	0.5-1.5	-	3.3-4.75	0.90	0.04	0.03	-
E308	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E308H	0.04-0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E308L	0.04	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E308Mo	0.08	18.0-21.0	9.0-12.0	2.03-3.0	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E308MoL	0.04	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E309	0.15	22.0-25.0	12.0-14.0	0.75	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E309L	0.04	22.0-25.0	12.0-14.0	0.75	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E309Cb	0.12	22.0-25.0	12.0-14.0	0.75	0.70-1.00	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E309Mo	0.12	22.0-25.0	12.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E310	0.08-0.20	25.0-28.0	20.0-22.5	0.75	-	1.0-2.5	0.75	0.03	0.03	-
E310H	0.35-0.45	25.0-28.0	20.0-22.5	0.75	-	1.0-2.5	0.75	0.03	0.03	-
E310Cb	0.12	25.0-28.0	20.0-22.0	0.75	0.70-1.00	1.0-2.5	0.75	0.03	0.03	-
E310Mo	0.12	25.0-28.0	20.0-22.0	2.0-3.0	-	1.0-2.5	0.75	0.03	0.03	-
E312	0.15	28.0-32.0	8.0-10.5	0.75	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E316	0.08	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E316H	0.04-0.08	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E316L	0.04	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E317	0.08	18.0-21.0	12.0-14.0	3.0-4.0	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E317L	0.04	18.0-21.0	12.0-14.0	3.0-4.0	-	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E318	0.08	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-2.5	6 × C, min to 1.00 max	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E320	0.07	19.0-21.0	32.0-36.0	2.0-3.0	8 × C, min to 1.00 max	0.5-2.5	0.60	0.04	0.03	3.0-4.0
E320LR	0.035	19.0-21.0	32.0-36.0	2.0-3.0	8 × C, min to 0.40 max	1.50-2.50	0.30	0.020	0.015	3.0-4.0
E330	0.18-0.25	14.0-17.0	33.0-37.0	0.75	-	1.0-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E330H	0.35-0.45	14.0-17.0	33.0-37.0	0.75	-	1.0-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E347	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75	8 × C, min to 1.00 max	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E349 ^c	0.13	18.0-21.0	8.0-10.0	0.35-0.65	0.75-1.2	0.5-2.5	0.90	0.04	0.03	-
E410	0.12	11.0-13.5	0.60	0.75	-	1.0	0.90	0.04	0.03	-
E410NbMo	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.40-0.70	-	1.0	0.90	0.04	0.03	-
E430	0.10	15.0-18.0	0.60	0.75	-	1.0	0.90	0.04	0.03	-
E630	0.05	16.0-16.75	4.5-5.0	0.75	0.15-0.30	0.25-0.75	0.75	0.04	0.03	3.25-4.0
E16-8-2	0.10	14.5-16.5	7.5-9.5	1.0-2.0	-	0.5-2.5	0.60	0.03	0.03	-

a. Refer to AWS A5.4-81, Specification for Covered Corrosion Resisting Chromium and Chromium-Nickel Welding Electrodes.

b. Single values shown are maximum percentages except where otherwise specified.

c. Suffix-15 electrodes are classified with direct current, electrode positive. Suffix-16 electrodes are classified with alternating current and direct current, electrode positive. Electrodes up to and including 5/32 in. (4.0mm) in size are usable in all positions. Electrodes 3/16 in. (4.8mm) and larger are usable only in the flat and horizontal-fillet positions.

d. Vanadium shall be 0.10 to 0.30 percent.

e. Titanium shall be 0.15 percent max and tungsten shall be from 1.25 to 1.75 percent.

پ) گروه (EXXX-17): در پوشش الکترودهای گروه ۱۷ با جایگزین کردن مقادیری سیلیسیم به جای تیتانیوم گروه ۱۶، ترکیبی از روکش‌های رتیلی-اسیدی به دست می‌آید که با جریان‌های AC یا DCEP قابل استفاده بوده و امکان جوشکاری در کلیه وضعیت‌ها را داراست. در جوش‌های گوشه با وضعیت جوشکاری افقی، الکترودهای گروه ۱۷ دارای قابلیت ایجاد قوس الکتریکی با انتقال اسپری و کیفیت سطح جوش بسیار مناسب می‌باشند. سرباره حاصل از این الکترودها سبب می‌شود تا حوضچه جوش به آهستگی سرد شده و جوش حاصل، از خواص مکانیکی بسیار مطلوبی برخوردار گردد. گرده جوش حاصل از استفاده از این الکترودها نیز کاملاً محذب است. تنها اشکال این



خانواده از پوشش الکترودهای زنگ نزن، این است که در قطرهای ضخیم تر از ۵mm، امکان جوشکاری در وضعیت های عمودی و سقفی را به خوبی ندارند.

جدول ۳: ترکیب شیمیایی مفتول و سیم جوشهای فولاد زنگ نزن [۲].

AWS Classification	Composition, percent ^a										
	C	Cr	Ni	Mo	Cb plus Ti	Mn	Si	P	S	N	Cu
ER209 ^a	0.03	20.5-24.0	9.5-12.0	1.5-3.0	-	4.0-7.0	0.90	0.03	0.03	0.10-0.30	0.75
ER218	0.10	16.0-18.0	8.0-9.0	0.75	-	7.0-9.0	3.5-4.5	0.03	0.03	0.08-0.18	0.75
ER219	0.05	19.0-21.5	5.5-7.0	0.75	-	8.0-10.0	1.00	0.03	0.03	0.10-0.30	0.75
ER240	0.05	17.0-19.0	4.0-6.0	0.75	-	10.5-13.5	1.00	0.03	0.03	0.10-0.20	0.75
ER307	0.04-0.14	19.5-22.0	8.0-10.7	0.5-1.5	-	3.3-4.75	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER308 ^a	0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER308H	0.04-0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER308L ^a	0.03	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER308Mo	0.08	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER308MoL	0.04	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER309 ^a	0.12	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER309L	0.03	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER310	0.08-0.15	25.0-28.0	20.0-22.5	0.75	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER312	0.15	28.0-32.0	8.0-10.5	0.75	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER316 ^a	0.08	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER316H	0.04-0.08	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER316L ^a	0.03	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER317	0.08	18.5-20.5	13.0-15.0	3.0-4.0	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER317L	0.03	18.5-20.5	13.0-15.0	3.0-4.0	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER318	0.08	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	8 × C min to 1.0 max	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER320	0.07	19.0-21.0	32.0-36.0	2.0-3.0	8 × C min to 1.0 max	2.5	0.60	0.03	0.03	-	3.0-4.0
ER320LR ^a	0.025	19.0-21.0	32.0-36.0	2.0-3.0	8 × C min to 0.40 max	1.5-2.0	0.15	0.015	0.020	-	3.0-4.0
ER321 ^a	0.08	18.5-20.5	9.0-10.5	0.75	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER330	0.18-0.25	15.0-17.0	34.0-37.0	0.75	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER347 ^a	0.08	19.0-21.5	9.0-11.0	0.75	10 × C min to 1.0 max	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER349 ^a	0.07-0.13	19.0-21.5	8.0-9.5	0.35-0.65	1.0-1.4	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75
ER410	0.12	11.5-13.5	0.6	0.75	-	0.6	0.50	0.03	0.03	-	0.75
ER410NiMo	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.4-0.7	-	0.6	0.50	0.03	0.03	-	0.75
ER420	0.25-0.40	12.0-14.0	0.6	0.75	-	0.6	0.50	0.03	0.03	-	0.75
ER430	0.10	15.5-17.0	0.6	0.75	-	0.6	0.50	0.03	0.03	-	0.75
ER630	0.05	16.0-16.75	4.5-5.0	0.75	0.15-0.30	0.25-0.75	0.75	0.04	0.03	-	3.25-4.00
ER26-1	0.01	25.0-27.5	h	0.75-1.50	-	0.40	0.40	0.02	0.02	0.015	0.20 ^b
ER16-8-2	0.10	14.5-16.5	7.5-9.5	1.0-2.0	-	1.0-2.5	0.30-0.65	0.03	0.03	-	0.75

a. Refer to AWS A5.9-S1, Specification for Corrosion Resisting Chromium and Chromium-Nickel Bars and Composite Metal Cored and Stranded Welding Electrodes and Rods.

b. Single values shown are maximum percentages except where otherwise specified.

c. Vanadium—0.10-0.30 percent

d. These grades are available in high silicon classifications that have the same chemical composition requirements as tabulated here with the exception that the silicon content is 0.65 to 1.00 percent. These high silicon classifications are designated by the addition 'Si' to the standard classification designations in the table. The fabricator should consider carefully the use of high silicon filler metals in highly restrained fully austenitic welds. A discussion of the problem is presented in the Appendix to the specification.

e. Carbon shall be reported to the nearest 0.01 percent except for the classification E320LR for which carbon shall be reported to the nearest 0.005 percent.

f. Titanium—9 × C min to 1.0 max

g. Titanium—0.10 to 0.30 percent; niobium—1.25 to 1.75 percent

h. Nickel, max—0.5 minus the copper content, percent



جدول ۴: ترکیب شیمیایی الکترودهای توپودری فولادهای زنگ نزن [۲].

AWS Classification ^a	Composition, percent ^d										
	C	Cr	Ni	Mo	Co plus Ta	Mn	Si	P	S	Fe	Cu
E307T-X	0.13	18.0-20.5	9.0-10.5	0.5-1.5	0.5-1.5	3.3-4.75	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E308T-X	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E308LT-X	d	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E308MoT-X	0.08	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E308MoLT-X	d	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E309T-X	0.10	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E309CbLT-X	d	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	0.70-1.00	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E309LT-X	d	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E310T-X	0.20	25.0-28.0	20.0-22.5	0.5	-	1.0-2.5	1.0	0.03	0.03	Rem	0.5
E312T-X	0.15	28.0-32.0	8.0-10.5	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E316T-X	0.08	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E316LT-X	d	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E317LT-X	d	18.0-21.0	12.0-14.0	3.0-4.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E347T-X	0.08	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	8 x C min to 1.0 max	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E409T-X ^e	0.10	10.5-13.0	0.60	0.5	-	0.80	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E410T-X	0.12	11.0-13.5	0.60	0.5	-	1.2	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E410NiMoT-X	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.40-0.70	-	1.0	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E410NiTiT-X ^e	d	11.0-12.0	3.6-4.5	0.05	-	0.70	0.50	0.03	0.03	Rem	0.5
E430T-X	0.10	15.0-18.0	0.60	0.5	-	1.2	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E307T-3	0.13	19.5-22.0	9.0-10.5	0.5-1.5	-	3.3-4.75	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E308T-3	0.08	19.5-22.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E308LT-3	0.03	19.5-22.0	9.0-11.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E308MoT-3	0.08	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E308MoLT-3	0.03	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E309T-3	0.10	23.0-25.5	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E309LT-3	0.03	23.0-25.5	12.0-14.0	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E309CbLT-3	0.03	23.0-25.5	12.0-14.0	0.5	0.70-1.00	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E310T-3	0.20	25.0-28.0	20.0-22.5	0.5	-	1.0-2.5	1.0	0.03	0.03	Rem	0.5
E312T-3	0.15	28.0-32.0	8.0-10.5	0.5	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E316T-3	0.08	18.0-20.5	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E316LT-3	0.03	18.0-20.5	11.0-14.0	2.0-3.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E317LT-3	0.03	18.5-21.0	13.0-15.0	3.0-4.0	-	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E347T-3	0.08	19.0-21.5	9.0-11.0	0.5	8 x C min to 1.0 max	0.5-2.5	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E409T-3 ^e	0.10	10.5-13.0	0.60	0.5	-	0.80	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E410T-3	0.12	11.0-13.5	0.60	0.5	-	1.0	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E410NiMoT-3	0.06	11.0-12.5	4.0-5.0	0.40-0.70	-	1.0	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5
E410NiTiT-3 ^e	0.04	11.0-12.0	3.6-4.5	0.5	-	0.70	0.5	0.03	0.03	Rem	0.5
E430T-3	0.10	15.0-18.0	0.60	0.5	-	1.0	1.0	0.04	0.03	Rem	0.5

a. Refer to AWS A5.22-80, Specification for Flux Cored Corrosion Resisting Chromium and Chromium-Nickel Electrodes.

b. The letter 'X' as specifically presented in this table indicates a classification covering the shielding designation for both the '1' and '2' categories. See Table 2.5 for details on these suffixes.

c. Single values shown are maximum percentages.

d. The carbon content is 0.04% maximum when the suffix 'X' is 1, and 0.03% maximum when the suffix X is 2.

e. Titanium—10 x C min to 1.5% max

جدول ۵: گازهای محافظ خارجی تولید شده برای الکترودهای توپودری زنگ نزن [۲].

AWS designation	External shielding ^a
EXXXT-1	CO ₂
EXXXT-2	Ar+2%O ₂
EXXXT-3	None

ت) گروه (EXXX-25): این گروه پوشش‌ها، از هر نظر شبیه گروه ۱۵ هستند، با این تفاوت که مغزۀ این الکترودها معمولاً فولاد کربنی بوده و برای جوشکاری، به شدت جریان بالاتری نیاز دارند. این الکترودها با جریان DCEP قابل استفاده بوده و فقط در وضعیت‌های افقی و تخت کاربرد دارند.



ث) گروه (XXXX-۲۶): این گروه از روکش‌های الکتروود، مشابه گروه ۱۶ بوده و تنها تفاوت آن‌ها، در جنس مغزۀ الکتروود گروه ۲۶ است که اغلب فولاد کربنی می‌باشد، بنابراین کلیۀ توضیحاتی که در مورد گروه ۲۵ داده شد، در این خصوص نیز صدق می‌کند [۴].

۵- فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی

فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، آلیاژهای Fe-Cr-C می‌باشند که در سرعت‌های سرد شدن سریع قادر به استحاله آلوتروپیک آستنیت به مارتنزیت می‌باشند. در جوشکاری نیز جهت ایجاد مارتنزیت در ریزساختار فلز جوش و HAZ سرعت‌های سرد شدن باید به اندازه کافی سریع باشد. برای دستیابی به حداکثر انعطاف پذیری و قابلیت ماشینکاری ممکن است فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی آنیل شوند تا با آستنیت‌زدن و آرام سرد کردن، ساختار آنها فریتی شود. هر چند این فولادها، به طور معمول با ساختار مارتنزیتی استفاده می‌شوند [۳]. استحکام فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی در محدوده وسیعی می‌تواند قرار گیرد، به طوریکه استحکام تسلیم آنها از ۲۷۵ Mpa در حالت آنیل تا ۱۹۰۰ Mpa در حالت کوئنچ-تمپر (رده‌های کربن بالا) متغیر می‌باشد.

به طور معمول در اکثر کاربردهای مهندسی، تمپر کردن فولاد کوئنچ شده برای به دست آوردن چقرمگی و شکل پذیری مناسب، ضروری است. با این کار سختی بالاتری را نیز می‌توان بدست آورد که در مصارف سایشی و اصطکاک فلز با فلز سودمند است.

در مجموع مقاومت به خوردگی فولادهای مارتنزیتی به اندازه انواع دیگر فولادهای زنگ نزن نمی‌باشد که دلیل آن مقدار کروم کمتر (۱۲ تا ۱۴٪) و کربن بیشتر نسبت به سایر گروه‌ها است. این نوع فولادها عموماً در شرایطی به کار گرفته می‌شوند که در آن ترکیبی از استحکام و مقاومت به خوردگی در محیط اتمسفری مورد نظر باشد. کمتر بودن میزان کروم و دیگر عناصر آلیاژی در فولادهای مارتنزیتی نیز قیمت آنها را در مقایسه با سایر انواع پایین‌تر خواهد آورد.

مصارف عمومی فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی شامل این موارد می‌باشد: پره توربینهای گازی، بخاری و موتورهای جت که در دمای نسبتاً پایین کار می‌کنند، لوله‌های بخار، توربینهای آبی بزرگ، لوله‌ها و شیرهای تأسیسات استخراج و پالایشی مواد نفتی و پوشش غلطک‌های ریختگری مداوم. امروزه کاربرد فولادهای سوپر مارتنزیتی کم کربن نیز در خطوط لوله نفت و گاز دائماً بیشتر می‌گردد. از انواع پرکربن و پرکروم نیز در ساخت ابزار جراحی، کارد و چنگال، چرخ دنده و محورها استفاده می‌شود.



فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی معمولاً به دلیل تغییر و از دست دادن خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی، در دماهای بالاتر از 650°C به کار برده نمی‌شوند. به دلیل شکل‌گیری مارتنزیت تمپر نشده در حین سرد شدن پس از جوشکاری، آلیاژهای مارتنزیتی کمترین میزان جوش پذیری را در فولادهای زنگ نزن دارند. همانند اکثر فولادهای ساختمانی، فولادهای مارتنزیتی، بخصوص آنهایی که بیش از ۰/۱ کربن دارند نیز باید با احتیاط تحت عملیات جوشکاری قرار گیرند.

۵-۱- آلیاژها و مواد مصرفی

در جدول ۶ لیستی از فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی کارپذیر و ریختگی ارائه شده است. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی برحسب میزان حساسیت آنها به ترک ناشی از هیدروژن یا ترک سرد به سه دسته تقسیم می‌شوند. این تقسیم بندی بر مبنای میزان کربن فولاد است که سختی مارتنزیت را در شرایط پس از جوشکاری مشخص می‌کند. این سختی خود مستقیماً بر روی قابلیت ترک سرد تأثیر می‌گذارد. گروهی که دارای کمترین میزان نقص و ایراد می‌باشند فولادهایی هستند که کمتر از ۰/۰۶٪ وزنی کربن داشته و سختی آنها حداکثر HRC ۳۵ می‌باشد. روش مناسب برای جوشکاری این فولادها مشابه با فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا می‌باشد.

گروه دوم فولادهایی با ۰/۰۶ تا ۰/۳٪ کربن هستند. سختی پس از جوش این گروه بین ۳۵ تا HRC ۵۵ بوده و احتمال ترک خوردگی در آنها بیشتر می‌باشد و بنابراین نیاز به عملیات پیشگرم حداکثر تا دمای 315°C دارند. سومین گروه نیز فولادهایی با بیش از ۰/۳٪ کربن و سختی ۵۵ تا HRC ۶۵ می‌باشند که نیاز به دستورالعمل‌های جوشکاری خاص برای جلوگیری از ترک خوردگی دارند. آلیاژهای مارتنزیتی مختلفی با حدود ۱۱/۵ تا ۱۸٪ کروم موجود می‌باشند. انواع ساختمانی این فولادها دارای میزان کربن بین ۰/۱ تا ۰/۲۵٪ می‌باشند. برخی از آلیاژها عناصر دیگری همچون مولیبدن، وانادیم و تنگستن دارند که با تشکیل کاربیدهای پایدار، استحکام فولادها را در دمای بالا افزایش می‌دهند. افزودن نیکل نیز باعث افزایش چقرمگی می‌شود. انواع ۴۴۰ دارای کربن بالا بوده و در مواردی که سختی و مقاومت به سایش و خوردگی بالایی نیاز باشد کاربرد دارند. بهتر است که فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی با فلزات پرکننده‌ای جوش داده شوند که استحکام آنها کاملاً یا تقریباً با فولاد مورد نظر هماهنگ^۱ باشد. در این صورت این فلزات جوش به عملیات‌های حرارتی اعمال شده بر روی فولاد، پس از جوشکاری واکنشی مشابه نشان خواهند داد. با این حال تمام فلزات پایه، فلز

۱-Match



پرکننده مناسب و هماهنگی در استاندارد AWS ندارند. در جدول ۷ طبقه‌بندی AWS فلزات پرکننده جوش آورده شده است که در آن، هر یک از فلزات جوش فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی با فلز پایه‌ای که با آن هماهنگ می‌باشد دسته‌بندی و نشان داده شده است.

جدول ۶: ترکیب شیمیایی گروهی از فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی کار شده و ریختگی [۳].

Type	UNS No.	Composition (wt%)*					
		C	Cr	Mn	Si	Ni	Other
403	S40300	0.15	11.5–13.0	1.00	0.50	—	—
410	S41000	0.15	11.5–13.5	1.00	1.00	—	—
410NiMo	S41500	0.05	11.4–14.0	0.50–1.00	0.60	3.5–5.5	0.50–1.00 Mo
414	S41400	0.15	11.5–13.5	1.00	1.00	1.25–2.50	—
416	S41600	0.15	12.0–14.0	1.25	1.00	—	0.15 S min., 0.6 Mo
420	S42000	0.15 min	12.0–14.0	1.00	1.00	—	—
422	S42200	0.20–0.25	11.5–13.5	1.00	0.75	0.5–1.0	0.75–1.25Mo, 0.75–1.25W, 0.15–0.3V
431	S43100	0.20	15.0–17.0	1.00	1.00	1.25–2.50	—
440A	S44002	0.60–0.75	16.0–18.0	1.00	1.00	—	0.75 Mo
440B	S44003	0.75–0.95	16.0–18.0	1.00	1.00	—	0.75 Mo
440C	S44004	0.95–1.20	16.0–18.0	1.00	1.00	—	0.75 Mo
CA-15	—	0.15	11.5–14.0	1.00	1.50	1.00	0.50 Mo
CA-6NM	—	0.06	11.5–14.0	1.00	1.00	3.5–4.5	0.40–1.0 Mo

*A single value is a maximum.

جدول ۷: فلزات پرکننده فولاد زنگ نزن مارتنزیتی براساس استاندارد AWS [۳].

AWS Classification	UNS No.	Composition (wt%)*						Base Metal
		C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	
E410-XX	W41010	0.12	11.0–13.5	1.0	0.90	0.7	0.75	410, CA-15
ER410	S41080	0.12	11.5–13.5	0.6	0.5	0.6	0.75	410, CA-15
E410TX-X	W41031	0.12	11.0–13.5	0.60	1.0	0.60	0.5	410, CA-15
E410NiMo-XX	W41016	0.06	11.0–12.5	1.0	0.90	4.0–5.0	0.40–0.70	410NiMo, CA-6NM
ER410NiMo	S41086	0.06	11.0–12.5	0.6	0.5	4.0–5.0	0.4–0.7	410NiMo, CA-6NM
E410NiMoTX-X	W41036	0.06	11.0–12.5	1.0	1.0	4.0–5.0	0.40–0.70	410NiMo, CA-6NM
ER420	S42080	0.25–0.40	12.0–14.0	0.6	0.5	0.6	0.75	420

*A single value is a maximum.

گاهی اوقات از فلزات پرکننده آستنیتی (۳۰۸، ۳۰۹ و ۳۱۰) برای جوشکاری فلزات پایه مارتنزیتی استفاده می‌شود، بخصوص زمانی که پدیده ترک هیدروژنی در فلز جوش مشکل ساز باشد. حلالیت هیدروژن در فاز آستنیت بالاتر بوده و تا حد زیادی در مقابل ترک هیدروژنی مصون است.



کاربرد دیگر فلز پرکننده آستنیتی در هنگامی است که فلز پایه مارتنزیتی آنیل شده باشد و فلز جوش در شرایط جوش داده شده^۱ مورد استفاده قرار گیرد.

انحلال فلز پایه مارتنزیتی در فلز پرکننده فولاد زنگ نزن آستنیتی ناشی از رقیق شدن، موجب پیدایش ساختار دوفازی از فریت و آستنیت می شود که بسیار نرمتر از ساختار فلز پایه است مگر اینکه فلز پایه آنیل شده باشد. در عملیات حرارتی پس از جوشکاری فلزات جوش حاوی فاز فریت، می بایست احتیاط لازم اعمال شود زیرا در محدوده دمای تمپر متداول و استاندارد ممکن است تردی ناشی از فاز سیگما رخ دهد.

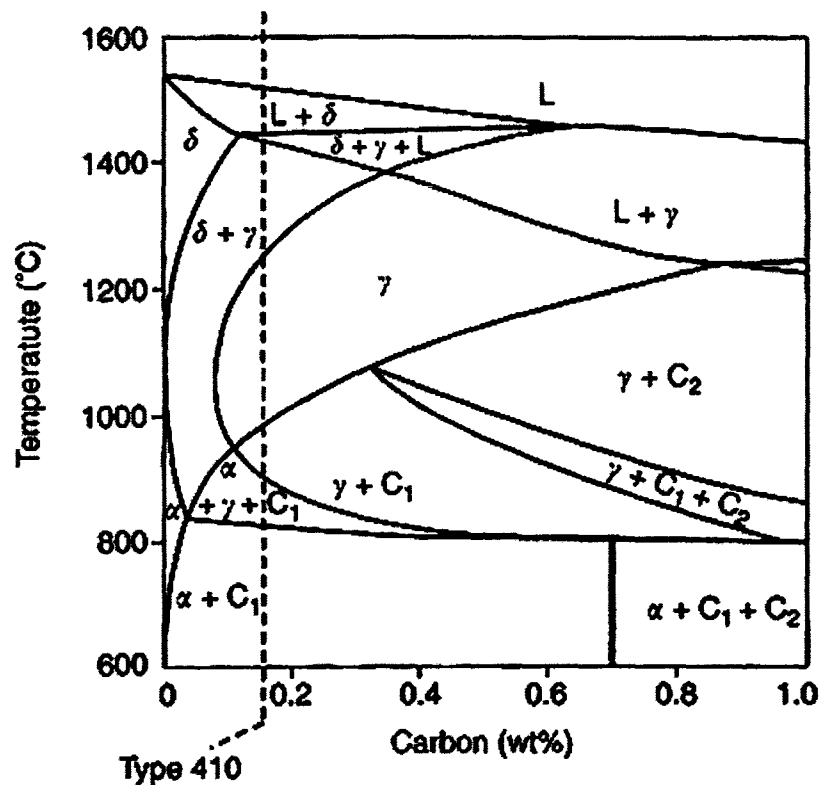
فلزات پرکننده پایه نیکل نیز از لحاظ متالورژیکی به خوبی با آلیاژهای مارتنزیتی هماهنگ بوده و در صورتیکه انحلال فلز پایه در جوش پایین نگه داشته شود، می توان ساختاری کاملاً آستنیتی در حوضچه جوش داشت. عموماً از فلزات پرکننده نامشابه به دلیل کاهش استحکام و افزایش هزینه ها استفاده نمی شود. از این فلزات در مواردی می توان بهره گرفت که هدف اتصال فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی به آلیاژهای آستنیتی می باشد و نیاز به تغییر در ضریب انبساط حرارتی داشته و یا استحکام فلز جوش از ضعیف ترین جزء بیشتر باشد.

۵-۲- متالورژی فیزیکی و مکانیکی

در غلظت های کمتر از ۱۲٪ کروم، تحت شرایط تعادلی، آستنیتی که داخل حلقه گاما تشکیل شده است، تبدیل به فریت خواهد شد (شکل ۱). اما اگر سرعت سرد شدن بالا باشد، استحاله آستنیت به مارتنزیت رخ خواهد داد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شد، حضور عناصر کربن و نیتروژن که پایدارکننده آستنیت اند، حلقه گاما را در سیستم آهن-کروم گسترش می دهد، بنابراین مقادیر بیشتر کربن و نیتروژن امکان داشتن فولاد زنگ نزن مارتنزیتی با درصد بیشتری کروم را فراهم می کند.

با توجه به آنچه در بخش ۲ توضیح داده شد، سیستم سه تایی Fe-Cr-C بهترین توصیف را از تغییر فازهایی که در طی فرآیند گرم و سرد شدن در جوشکاری فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی رخ می دهد را ارائه می کنند. می توان از یک مقطع شبه دوتایی این سیستم که دقیقاً در ۱۳٪ کروم واقع شده برای مشخص کردن پایداری فازی از دمای انجماد تا دمای اتاق استفاده کرد (شکل ۱۲). این فولادها در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲۵٪ کربن، به صورت فریت جامد می شوند اما در انتهای انجماد مقداری آستنیت و یا مخلوطی از فریت و آستنیت شکل می گیرد.

۱-As-Welded

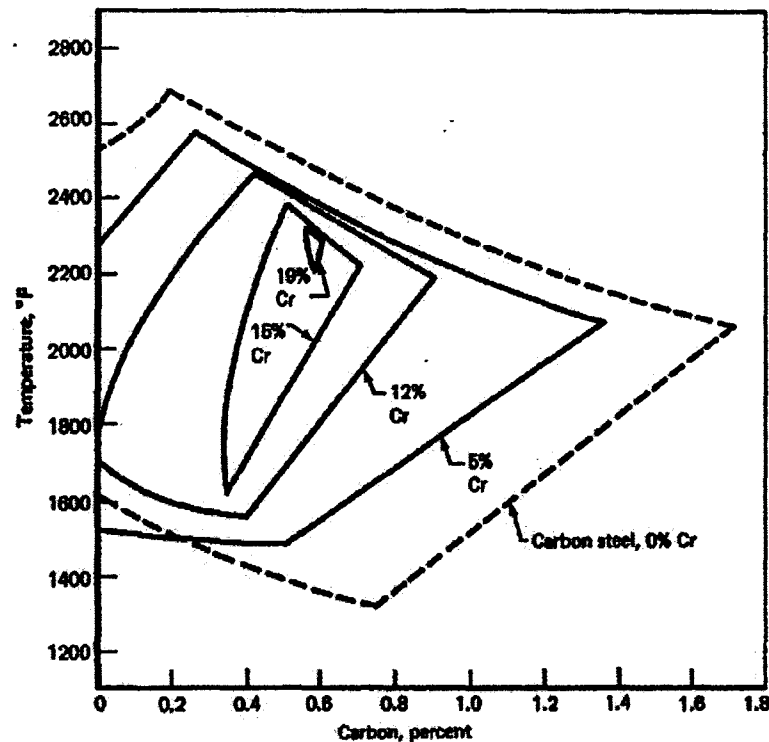


شکل ۱۲: دیاگرام شبه دوتایی Fe-13Cr همراه با درصد کربن اسمی فولاد ۴۱۰ [۳].

از روی دیاگرام می‌توان پیش بینی کرد که در حین سرد شدن از دمای انجماد و در این محدوده از درصد وزنی کربن تمام فریت به آستنیت تبدیل می‌شود. در دمای زیر 800°C فازهای تعادلی شامل فریت و کاربید (Cr_{23}C_6) خواهند بود.

در شرایط عادی سرد شدن در جوشکاری، آستنیتی که در دمای بالا وجود دارد به مارتنزیت تبدیل می‌شود. در بسیاری از فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، مقداری فریت به وجود می‌آید که در دمای بالا ساختار خود را حفظ می‌کنند. حضور فریت تابعی از تعادل عناصر فریت زا و آستنیت زا در سیستم است. در مقادیر بالاتر کربن، فاز آستنیت گسترش یافته و در نتیجه ساختاری کاملاً مارتنزیتی تشکیل خواهد شد. کربن بیشتر موجب ایجاد مارتنزیتی سخت‌تر و شکننده‌تر می‌شود که تمایل به ترک ناشی از هیدروژن و تردی دارد.

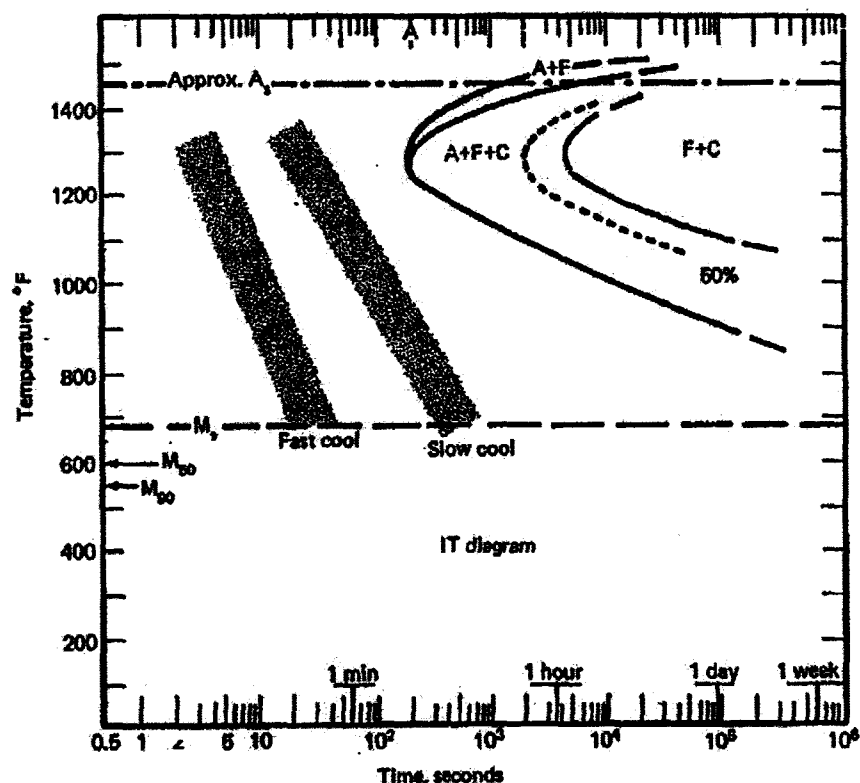
فولادهای زنگ نزن، با بیش از ۱۷٪ کروم، به دلیل کاهش منطقه پایداری آستنیت (شکل ۱۳)، قابلیت مارتنزیتی شدن بسیار کمی دارند.



شکل ۱۳: اثر میزان کروم بر محدوده آستنیت در دمای بالا [۲].

با استفاده از نمودار دگرگونی همدمما همانند نمودار شکل ۱۴ که مربوط به فولاد نوع ۴۱ می‌باشد، می‌توان ریزساختارهایی را که در جریان سرد کردن از دمای محدوده فاز آستنیت، در فلز جوش و ناحیه HAZ شکل می‌گیرند، پیش‌بینی کرد. در فولاد نوع 410 دماغه منحنی شکل‌گیری فریت در زمانهای پس از ۱۰۰ ثانیه ظاهر می‌شود. در نتیجه در اغلب فرآیندهای جوشکاری ذوبی، ایجاد ساختاری غالباً مارتنزیتی با سختی بالا (۴۵HRC) در فلز جوش و بخشهایی از HAZ بسیار محتمل است.

از شکل ۱۴ می‌توان این نکته را دریافت که اگر آستنیت دمای بالا را در مدت کمتر از ۲۰۰ ثانیه و یا حدود ۳ دقیقه به دمای زیر ۷۰۰°C رسانده و سپس در دمایی کمی بیشتر از دمای Ms نگهداری کنیم، فلز به دست آمده می‌تواند تا یک هفته یا حتی بیشتر آستنیتی باقی بماند. این ویژگی می‌تواند در انتخاب دمای پیشگرم و دمای بین پاسی در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی بسیار سودمند باشد.



شکل ۱۴: نمودار دگرگونی همدمای برای فولاد زنگ نزن ۴۱۰ [۲].

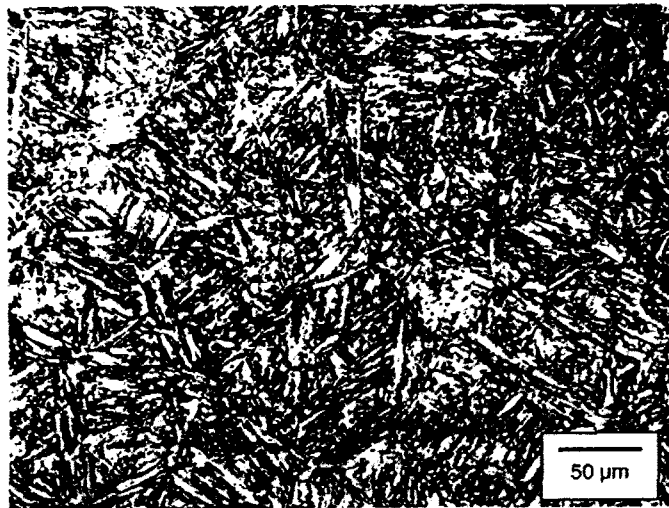
تحت این شرایط می‌توان چندین پاس جوش ایجاد کرد در حالی که ساختار آنها همچنان آستنیتی باقی بماند و این امر کرنشهای ناشی از انقباض را به خوبی برطرف می‌کند. در همین زمان هیدروژن نیز به آرامی می‌تواند خارج شود (زیرا ضریب نفوذ هیدروژن در آستنیت کمتر از فریت و مارتنزیت است). با تمام شدن عملیات جوشکاری و سرد شدن جوش، بیشتر حجم آستنیتی فلز جوش به مارتنزیت تبدیل می‌شود. این تغییر حالت با انبساط توام خواهد بود زیرا چگالی مارتنزیت کمتر از آستنیت بوده و بنابراین فلز جوش در دمای محیط با تنش فشاری روبرو خواهد بود، که منجر به ترک خوردگی نخواهد شد.

عناصر آلیاژی بر روی دمای Ms فولادها اثر می‌گذارند. برای نشان دادن ارتباط Ms با ترکیب شیمیایی فولادها، روابط مختلفی ارائه شده است که در زیر یکی از این روابط ارائه شده است:

$$Ms(^{\circ}C) = 540 - (497C + 6.3Mn + 36.3Ni + 10.8Cr + 46.6Mo)$$

به طور کلی تمامی عناصر آلیاژی به جز کبالت، دمای M_s را کاهش می‌دهند. در اغلب فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، حاوی ۰/۱ تا ۰/۲۵٪ کربن، دمای M_s نسبتاً بالا و در حدود ۲۰۰ تا ۴۰۰°C می‌باشد. به دلیل اینکه دمای M_F یا پایان تشکیل مارتنزیت به طور معمول در حدود ۱۰۰°C زیر M_s می‌باشد، استحاله در دمای محیط کامل می‌شود. فولادهایی با عناصر آلیاژی بیشتر، بخصوص فولادهای حاوی ۰/۴٪ نیکل یا بیشتر، ممکن است دارای دمای M_F کمتر از دمای محیط باشد. در نتیجه مقداری آستنیت باقیمانده در ریزساختار وجود خواهد داشت که سبب افزایش چقرمگی خواهد شد. در شکل ۱۵ فلز پایه فولاد زنگ نزن با ریزساختار مارتنزیت تمپر شده نشان داده شده است. این ساختار شامل فریت و کاربید می‌باشد. عملیات تمپر تشکیل کاربیدهای آلیاژی غنی از کروم را تشویق می‌کند. همچنین موجب انتقال ساختار کریستالی bct مارتنزیت به ساختار bcc فریت خواهد شد.

حداقل خواص مکانیکی مورد نیاز برای گروهی از فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی در شرایط آنیل شده یا تمپر شده در جدول ۸ آمده است.



شکل ۱۵: ریزساختار فولاد زنگ نزن ۴۱۰ کوئنچ-تمپر شده [۳].



جدول ۸: حداقل خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی [۳].

Type	Condition	Tensile Strength		Yield Strength		Elongation (%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	
403	Annealed	485	70	275	40	20
	Intermediate temper	690	100	550	80	15
	Hard temper	825	120	620	90	12
410	Annealed	485	70	275	40	20
	Intermediate temper	690	100	550	80	15
	Hard temper	825	120	620	90	12
420	Annealed	690	100	—	—	15
	Tempered at 204°C (400°F)	1720	250	1480	215	8
431	Annealed	760	110	—	—	—
	Intermediate temper	795	115	620	90	15
	Hard temper	1210	175	930	135	13
440C	Annealed	760	110	450	65	14
	Tempered at 315°C (600°F)	1970	285	1900	275	2

۵-۳- متالورژی جوشکاری

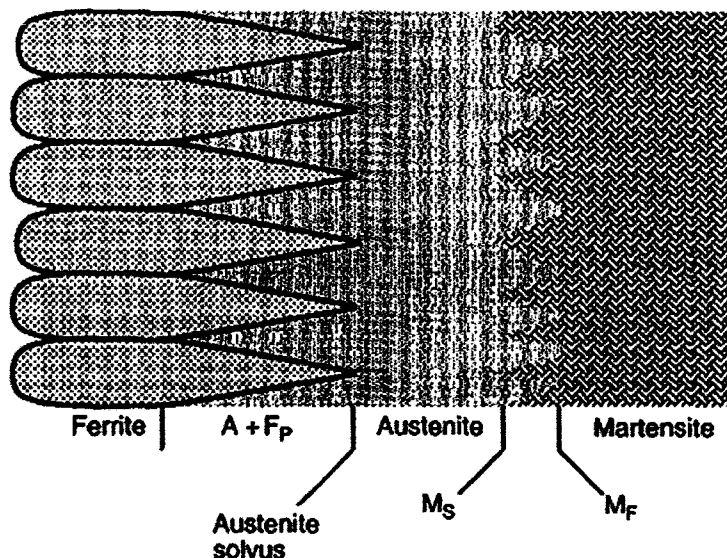
۵-۳-۱- منطقه ذوب

مرزهای ذوب^۱ در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی با ۱۱ تا ۱۴٪ کروم و ۰/۱ تا ۰/۲۵٪ کربن به صورت فریت دلتا جامد می‌شود. جدایش کربن و سایر عناصر آلیاژی در جریان انجماد می‌تواند منجر به تشکیل آستنیت و یا مخلوطی از فریت و آستنیت در پایان انجماد گردد. در طی سرد شدن فلز جوش در حالت جامد، آستنیت تمام فریت موجود را مصرف کرده و در نتیجه ریزساختاری کاملاً آستنیتی را در دمای زیر ۱۱۰۰°C خواهیم داشت. در مراحل بعدی سرد شدن آستنیت به مارتنزیت تبدیل خواهد شد. این تغییر حالتها را می‌توان به صورت توالی زیر بیان کرد که شمای کلی آن در شکل ۱۶ آمده است:

ریزساختار کاملاً مارتنزیتی: مسیر استحاله ۱

مارتنزیت $L \rightarrow L + F_p \rightarrow F_p \rightarrow F_p + A \rightarrow A$

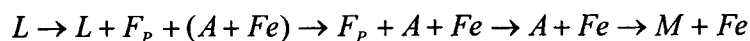
۱-Fusion Zones



شکل ۱۶: رفتار استحاله منطقه ذوب کاملاً مارتنزیتی (F_p: فریت اولیه) [۳].

ریزساختار این توالی در شکل ۱۸a نشان داده شده است. اگر در پایان انجماد مقداری فریت شکل گرفته باشد، این فریت ممکن است به طور کامل توسط عناصر فریت‌زا به خصوص (Mo, Cr) تقویت و غنی شود و به هیچ وجه در دماهای پایینتر از دمای انجماد به آستنیت تبدیل نمی‌شود. این فریت در امتداد دانه‌های انجمادی و مرزهای ریز دانه‌ها مستقر شده و ریزساختار نهایی جوش ترکیبی از مارتنزیت و فریت یوتکتیک خواهد بود. زیرا فرض می‌شود که فریت در اثر واکنش یوتکتیک در پایان انجماد ایجاد شده است. مقدار فریت بستگی به نسبت عناصر فریت‌زا به عناصر آستنیت‌زا و همچنین شرایط انجماد دارد. این ترتیب استحاله به صورت توالی زیر بیان شده و به صورت شماتیک در شکل ۱۷ آورده شده است:

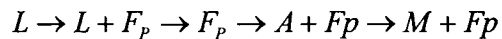
ریز ساختار دوفازی شامل مارتنزیت+فریت یوتکتیک: مسیر استحاله ۲



ریزساختار به دست آمده از این توالی نیز در شکل ۱۸c نشان داده شده است. همچنین ممکن است بخشی از فریت اولیه، به طور کامل در دماهای بالا به آستنیت تبدیل نشده و در حین سرد شدن تا دمای اتاق در ساختار حفظ شده باشد. ترتیب این تغییر شکل نیز بدین صورت است:

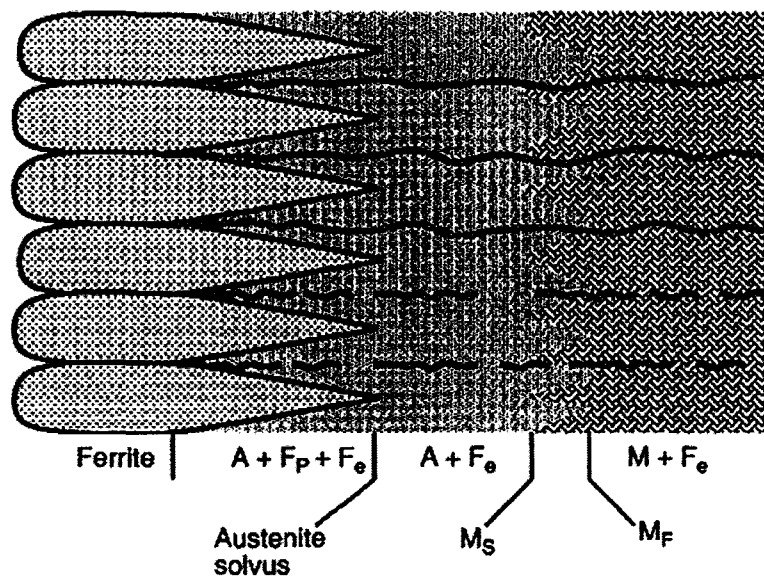


ساختار دوفازی شامل مارتنزیت + فریت اولیه: مسیر استحاله ۳



ساختار بدست آمده از این استحاله در شکل ۱۸b آورده شده است.

در جریان فرآیند سرد کردن بسته به سرعت آن ممکن است مقداری رسوبات کاربیدی تشکیل شود. این کاربیدها معمولاً از نوع $M_{23}C_6$ یا M_7C_3 می باشد که M در آنها عموماً Cr یا Fe می باشد. کاربید M_7C_3 اکثراً منحصر به آلیاژهای با کربن بالاتر (بیش از ۰/۳٪) است.



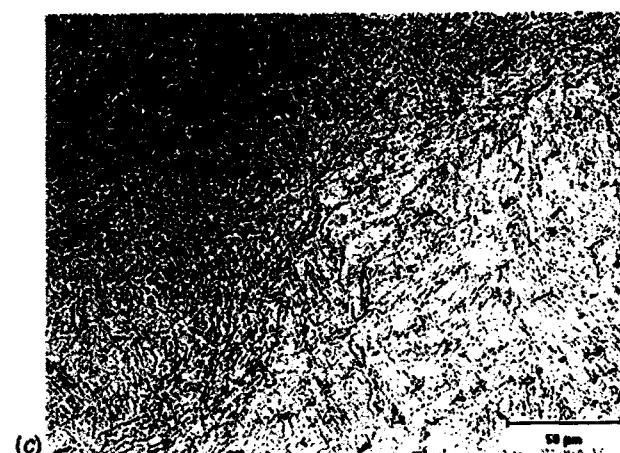
شکل ۱۷: رفتار استحاله منطقه ذوب شامل مارتنزیت و فریت. (Fp: فریت اولیه، Fe: فریت یوتکتیک) [۳].



(a)



(b)



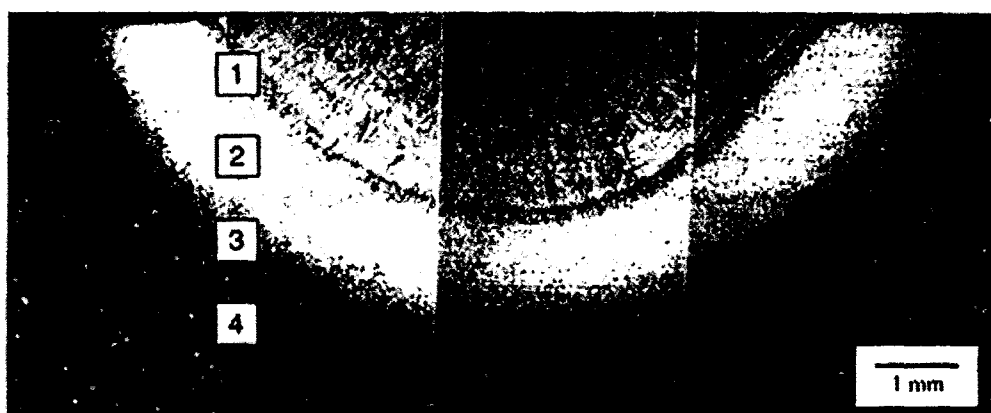
(c)

شکل ۱۸: ریزساختار منطقه ذوب فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی (a) نوع ۴۱۰ کاملاً مارتنزیتی (b) مارتنزیت همراه فریت باقیمانده در فولاد ۴۱۰ (منطقه تیره مارتنزیت، منطقه روشن فریت) (c) مارتنزیت همراه با فریت یوکتیک در آلیاژ ۱۲Cr-۱Mo (منطقه تیره فریت) [۳].



۵-۳-۲- منطقه متأثر از حرارت (HAZ)

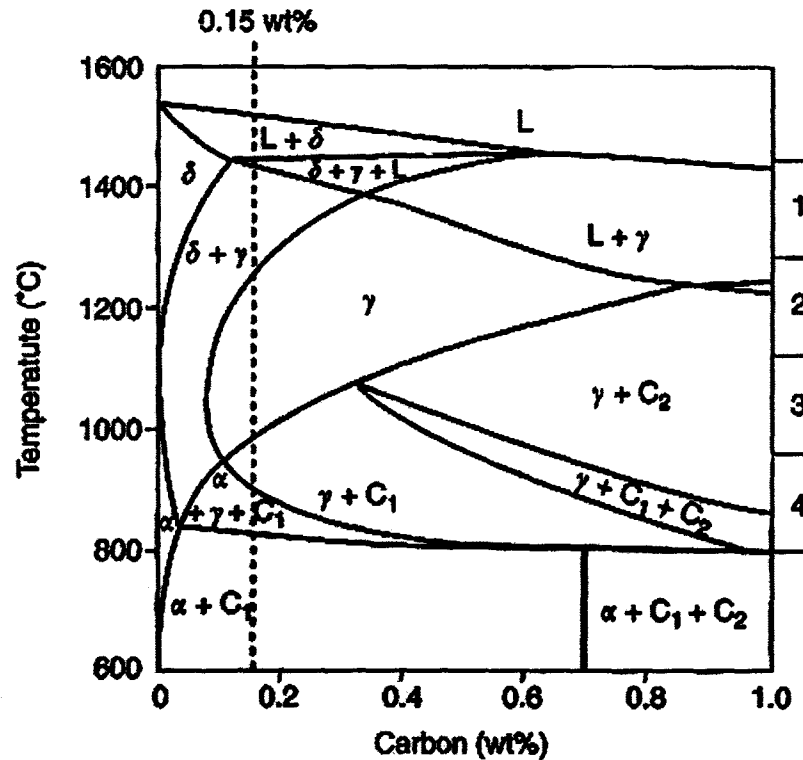
در شرایط جوشکاری شده^۱ منطقه HAZ فولاد زنگ نزن مارتنزیتی را می توان به ۴ منطقه مجزا تقسیم کرد. در شکل ۱۹، ماکروگراف جوش (بدون فیلر) فولاد زنگ نزن 12Cr-1Mo، این چهار ناحیه نشان داده شده است. شکل ۲۰ نیز نمودار مشابهی با شکل ۱۲ می باشد که جهت تعیین ریزساختار فولاد کم کربن (۰/۱۵٪) ارائه شده است. از این نمودار به منظور شرح مناطق HAZ در شکل ۲۰ استفاده خواهد شد.



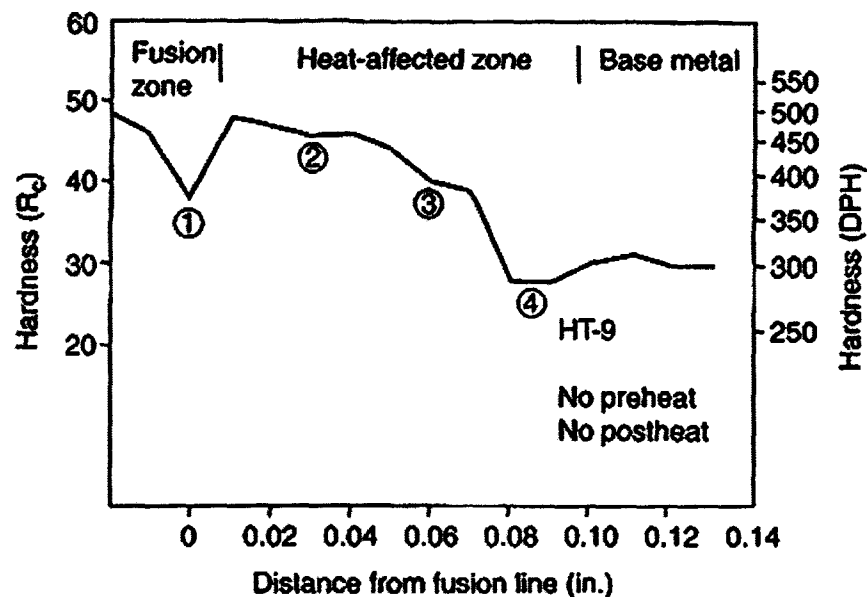
شکل ۱۹: ماکروگراف یک جوش (بدون فیلر) در فولاد زنگ نزن 12Cr-1Mo، نشان دهنده مناطق مجزای HAZ [۳].

در منطقه ای از HAZ که مجاور مرز ذوب می باشد (ناحیه ۱)، در دمای بالا، حجم قابل توجهی از ریزساختار شامل آستنیت می باشد. اما مقداری فریت نیز در مرزهای دانه آستنیت وجود دارد. به دلیل آنکه کربن عنصر پایدارکننده آستنیت است، افزایش کربن به بالاتر از ۰/۱۵٪ منطقه فاز آستنیت را گسترش و میزان فریت در ریزساختار را کاهش می دهد. در سرد شدن تا دمای اتاق، آستنیت به مارتنزیت استحاله پیدا می کند و فریت در ریزساختار باقی می ماند. میزان فریتی که در دمای اتاق حضور دارد بستگی به میزان فریت اولیه و سرعت حل شدن این فریت در زمانیکه در منطقه فاز آستنیت سرد می شود، دارد. حضور فریت، نرم شدن جزئی ساختار ناحیه اول را به همراه خواهد داشت. در شکل ۲۱ منحنی تفکیک سختی نواحی مختلف HAZ و فلز پایه نشان داده شده است.

۱-As-Weld



شکل ۲۰: نمودار فازی شبه پایدار فولاد ۱۳٪Cr، نشان دهنده چهار منطقه ریزساختار HAZ در فولاد زنگ نزن مارتنزیتی با ۰/۱۵٪C



شکل ۲۱: مقایسه سختی مناطق مختلف ناحیه HAZ در آلیاژ ۱۲Cr-۱Mo-۰.۵W-۰.۳V-۰.۲C جوشکاری شده به روش GTAW (شرایط جوشکاری بدون پیشگرم یا پسگرم) [۳].



در ناحیه دوم HAZ، ریزساختار در دمای بالا، کاملاً آستنیتی خواهد بود. دما در این منطقه به اندازه کافی جهت حل کردن کاربیدهای فلز پایه کافی خواهد بود و از طرفی رشد دانه‌های آستنیت رخ خواهد داد. در سرد شدن، این منطقه به طور کامل مارتنزیتی خواهد شد. به دلیل آنکه تجمع کربن در این منطقه صورت می‌گیرد، سختی حداکثر مربوط به این ناحیه می‌باشد.

ناحیه سوم HAZ نیز در هنگام جوشکاری داخل منطقه آستنیتی قرار می‌گیرد، اما به دلیل آنکه دما پائینتر از ناحیه دوم است، حل شدن کاربیدها کامل نبوده و رشد دانه‌های آستنیت قابل توجه نمی‌باشد. کاهش رشد دانه‌های آستنیت علاوه بر کاهش دما، متأثر از حضور کاربیدهای حل نشده فلز پایه نیز می‌باشد. حل نشدن کامل کاربیدها موجب کاهش غلظت کربن در آستنیت و در نتیجه کاهش سختی مارتنزیت ایجاد شده می‌گردد.

در ناحیه چهارم، عدم استحاله یا استحاله کمی به آستنیت رخ می‌دهد و ریزساختار مربوط به فلز پایه کوئنچ-تمپر شده می‌باشد. در این محدوده دمایی (۸۰۰ تا ۹۵۰°C) رشد کاربیدها صورت می‌گیرد و در نتیجه میزان سختی نسبت به فلز پایه، کمی کاهش پیدا می‌کند.

اگر آلیاژی با درصد کربن بالاتر در نظر گرفته شوند، منطقه آستنیت+ فریت در شکل ۲۰، کوچکتر شده و سرانجام ناپدید می‌گردد. در نتیجه در این ناحیه نیز، تنها مارتنزیت به وجود خواهد آمد و فریت نیز در ریزساختار مشاهده نخواهد شد. در مقادیر کربن کم، میزان فریتی که در ریزساختار HAZ، نزدیک مرز ذوب، تشکیل خواهد شد، قابل توجه خواهد بود.

در صورتیکه بیش از مقدار کمی فریت در فولاد زنگ نزن مارتنزیتی وجود داشته باشد، تفاوت خواص مکانیکی بین فریت و مارتنزیت باید در نظر گرفته شود. در کار گرم فولاد زنگ نزن، این موضوع از اهمیت زیادی برخوردار نیست، زیرا مناطق فریتی و مارتنزیتی، نسبت به جهت نورد گرم یکسان هستند و در نتیجه توزیع کرنش در این دو منطقه یکنواخت خواهد بود. اما در فلز جوش، مناطق فریتی تمایل دارند که به صورت عمود بر سطح، جهت گیری نکنند، در نتیجه در اثر اعمال هرگونه کرنشی موازی سطح، تمایل به تمرکز این کرنش در منطقه فریتی وجود دارد و در تنش و تغییر طول کم، شکست رخ خواهد داد. از اینرو پیش‌بینی میزان فریت در فولاد زنگ نزن مارتنزیتی مهم است. برای اینکار می‌توان به دیاگرام Blam Forth، برای فلزات جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی و فریتی مراجعه کرد.

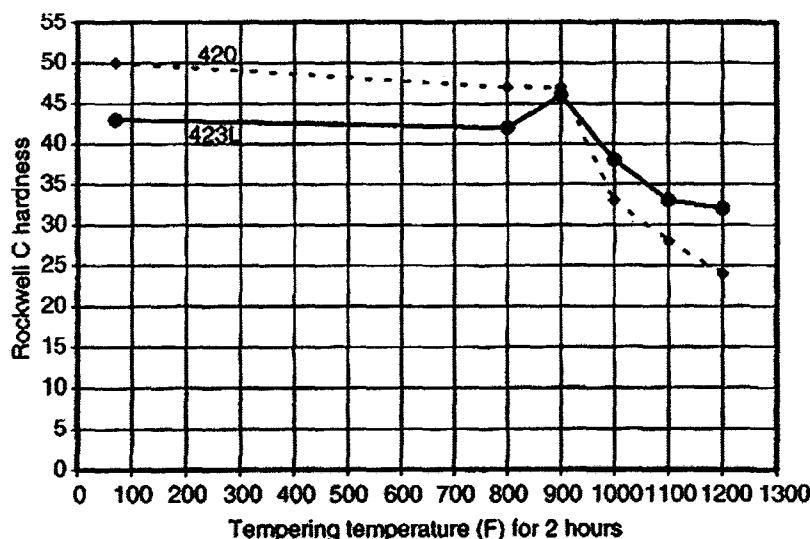
۵-۳-۳- عملیات حرارتی بعد از جوش (PWHT)

در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی معمولاً عملیات حرارتی پس از جوش (PWHT) امری الزامی است. حتی در مقادیر کربن کمتر از ۰/۱٪ نیز ممکن است سختی فلز جوش داده شده از ۳۵HRC تجاوز کند. PWHT در اصل برای تمپر کردن مارتنزیت به کار می‌رود اما در صورت وجود مقادیر بالایی از تنش پسماند، این عمل تا حدودی این تنشها را نیز از بین می‌برد. PWHT معمولاً در محدوده دمای بین ۴۸۰ تا ۷۵۰°C صورت می‌گیرد، هر چند که گاهی این دما به ۲۰۰°C نیز ممکن است برسد. تقریباً هیچ گونه نرم شوندگی^۱ بوسیله تمپرینگ در دمای زیر ۴۸۰°C روی نمی‌دهد، اما می‌توان از آن برای بهبود و افزایش چقرمگی و پایداری ابعادی بعد از ماشینکاری استفاده کرد. زمان عملیات حرارتی به ضخامت قطعه مورد نظر بستگی داشته اما عموماً بین ۳۰ دقیقه تا ۲ ساعت کافی است.

با توجه به آنکه هدف اصلی عملیات حرارتی بعد از جوش تمپر کردن مارتنزیت می‌باشد، با توجه به دمای پیشگرم و نمودار TTT فولاد جوش داده شده، باید از حصول ساختار مارتنزیتی جوش، اطمینان حاصل شود. (جوش تا زیر دمای Ms سرد شده باشد). به طور معمول قبل از عملیات PWHT، سرد شدن جوش تا دمای ۱۰۰°C لازم است.

از نظر متالورژیکی، تمپر کردن می‌تواند موجب تغییر شکل مارتنزیت به فریت و کاربیدهای بسیار ریز گردد. این تغییر حالت موجب کاهش استحکام و در عین حال افزایش داکتیلیته و چقرمگی می‌شود. در صورتیکه کاربیدهایی غیر از کاربید کروم در دماهای میانی شکل بگیرد، مقداری سختکاری ثانویه به وجود خواهد آمد که در برابر تمپر یا نرم شدن مارتنزیت مقابله می‌کند. در نتیجه این پدیده و در صورت انتخاب دمای PWHT مناسب، فلز جوشی با درصد کربن کمتر، شامل دیگر عناصر آلیاژی همراه با کروم به وجود می‌آید که مقدار سختی و استحکام آن با فلز پایه‌ای با میزان کربن، بالاتر مشابه است (شکل ۲۲). در شکل، سختکاری ثانویه در دمای ۴۸۰°C و نرم شوندگی تدریجی در دماهای بالاتر از آن برای فولاد ۴۲۳L و مقایسه آن با رفتار فولاد ۴۲۰ با میزان کربن بیشتر نشان داده شده است. باید دقت شود که آلیاژهای پرکروم، بیش از زمان لازم تمپر نشود، زیرا ممکن است فاز سیگما تشکیل گردد که موجب ترد شدن ساختار می‌گردد.

۱-Softening



شکل ۲۲: تمپر کردن فلزات جوش فولاد زنگ نزن مارتنزیتی [۳].

نوع ۴۲۰: ۰/۲٪C، ۰/۲٪Mn، ۰/۵٪Si، ۰/۵٪Cr و ۱۲٪

نوع ۴۲۳L: ۰/۱۵٪C، ۰/۲٪Mn، ۰/۴٪Si، ۱۱/۵٪Cr، ۲٪Ni، ۱٪Mo، ۰/۱۵٪V

برای بهینه کردن خواص نسبت به فلز پایه می‌توان کل ساختار را تحت عملیات حرارتی محلول سازی^۱ SHT قرار داده و سپس کوئنچ و تمپر کرد. عملیات محلول سازی، کل ساختار مجدداً آستنیتی شده، تمام یا درصد زیادی از فریت در فلز جوش یا HAZ حل شده و در نتیجه باعث ایجاد یک ساختار کاملاً یکنواخت مارتنزیتی در حین کوئنچ کردن می‌شود. پس از این مرحله به راحتی می‌توان انواع مختلفی از عملیات تمپر کردن را برای بدست آوردن استحکام، شکل پذیری و یا چقرمگی مورد نظر اعمال کرد. متأسفانه به دلیل محدودیت در اندازه و تجهیزات لازم، این روش معمولاً عملی نیست. لذا SHT موجب پیدایش اعوجاج در اجزای بزرگ و پیچیده می‌شود.

۵-۳-۴- راهنمایی جهت انتخاب دمای پیشگرم، بین پاسی و عملیات حرارتی بعد از جوش

همانند فولادهای ساختمانی، برای جلوگیری از ترک ناشی از هیدروژن، کنترل دقیقی بر عملیات پیشگرم و حفظ دمای بین پاسی مورد نیاز است. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی که کمتر از ۰/۰۶٪ کربن دارند (مانند CA-6Ni-Mo، 410Ni-Mo و سوپر مارتنزیتی) و ضخامت آنها کم است، نیازی به پیشگرم و کنترل دمای بین پاسی ندارند و در مقاطع با ضخامت بالای ۱۲mm، حداقل دمای

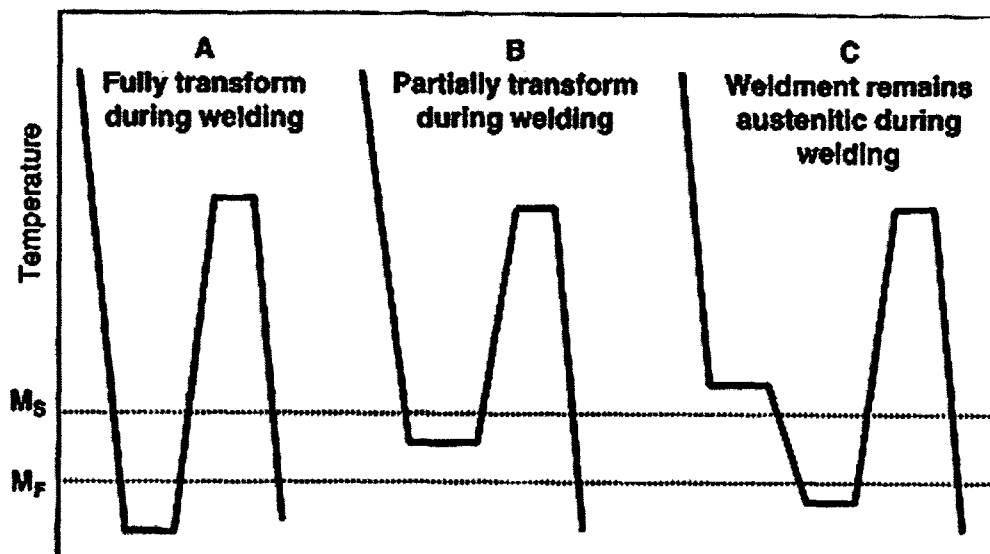
۱-Solution Heat Treatment

پیشگرم 120°C مورد نیاز است. در آلیاژهایی با 0.06% تا 0.13% کربن که تقریباً اکثر فولادهای ساختمانی را در برمی گیرند، کنترل دمای پیشگرم و بین پاسی الزامی است. در مقاطع نازک دمای پیشگرم و بین پاسی معمولاً زیر Ms انتخاب می شود تا ساختار کاملاً به مارتنزیت تبدیل شده و هیدروژن نیز نفوذ و خارج شود.

در مقاطع ضخیم تر این دماها بالاتر از Ms انتخاب می شود تا از ترک خوردگی احتمالی در حین ساخت جلوگیری شود. بعد از عملیات جوشکاری کل سازه به آرامی تا دمای اتاق سرد می شود تا هیدروژن در حین تبدیل فاز زمان کافی برای نفوذ و خروج را داشته باشد. زیرا حلالیت هیدروژن در فاز آستنیت بالا بوده و به همین دلیل اگر تغییر فاز آرامتر صورت گیرد، ترک هیدروژنی کمتر اتفاق خواهد افتاد.

آلیاژهایی با کربن بیش از 0.13% نیز به همان دلایل ذکر شده باید در دماهای پیشگرم و بین پاسی بالاتر از Ms قرار گیرند. سپس می توان این آلیاژها را مستقیماً تا محدوده دمای آستنیت گرم کرد، با سرعت کافی سرد کرد تا مارتنزیت شکل گیرد و آنگاه عملیات تمپر را انجام داد. این دستورالعمل سبب بهینه شدن خواص فلز جوش نسبت به فلز پایه خواهد شد. دستورالعمل بعدی برای این فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی پرکربن که دمای پیشگرم و دمای بین پاسی آنها بالاتر از Ms می باشد، بدین صورت است که کل منطقه جوش بلافاصله (بدون سرد شدن) تا دمایی که آستنیت در آن دما بتواند به سرعت به فریت و کاربید تبدیل شود (اگر مقدار نیکل کم یا صفر باشد، این دما معمولاً 700°C است) گرم می شود و ساعتها در این دما نگه داشته می شود تا دگرگونی همدمای تعادلی اتفاق بیفتد. در این روش فلز جوش تغییر فاز داده و فلز پایه نیز به شدت تمپر می شود. بنابراین کل مجموعه جوش در حین سرد کردن نرم خواهد بود و می توان به راحتی آن را با ماشینکاری به ابعاد لازم رسانده و سپس دوباره آستنیتی و سختکاری کرد.

می توان دماهای پیشگرم و بین پاسی را طوری تنظیم کرد که مارتنزیتی شدن در جریان سرد شدن جوش، ترغیب یا بازداشته شود. همانند فولادهای ساختمانی، معمولاً مقداری پیشگرم برای حذف رطوبت سطحی لازم است که دمای 120°C را می توان به عنوان یک حداقل در نظر گرفت. در اکثر فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی همین مقدار پیشگرم و دمای بین پاسی موجب تشکیل کامل مارتنزیت در حین سرد کردن خواهد شد که این مطلب در شکل ۲۳ حالت A نشان داده شده است.



شکل ۲۳: رفتار استحاله هنگام سرد شدن جوش و عملیات حرارتی بعد از آن [۳].

اگر دماهای پیشگرم و بین پاسی زیر دمای M_F در نظر گرفته شوند (حالت A در شکل ۲۳) فلز جوش و HAZ در حین فرآیند جوشکاری کاملاً به مارتنزیت تبدیل خواهند شد. این امر امکان تمپر شدن مارتنزیت در پاسهای بعدی را فراهم خواهد کرد. اگر دمای بین پاسی بین M_s و M_F انتخاب شود مقداری از آستنیت در ترکیب باقی مانده و در حین تمپر کردن مجدداً گرم می‌شود (حالت B در شکل ۲۳). این امر موجب پیدایش مقداری مارتنزیت تمپر شده در حین سرد کردن از دمای تمپر می‌گردد. در جوشهای ضخیم و یا آلیاژهای پرکربن گاهی اوقات توصیه می‌شود که دمای بین پاسی بالای M_s در نظر گرفته شود که در حالت C شکل ۲۳ نشان داده شده است. این کار از تشکیل مارتنزیت در حین جوشکاری و ترک هیدروژنی جلوگیری می‌کند. در آخر کار نیز پس از جوشکاری کل ساختار تا زیر دمای M_F سرد شده و سپس تمپر می‌گردد.

۵-۴- جوش پذیری

۵-۴-۱- ترک انجمادی و ترک ذوب موضعی

اکثر فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی به صورت فریتی جامد شده و در نتیجه میزان ترک خوردگی ناشی از انجماد جوش در آنها پایین است. با این حال فاکتورهایی وجود دارد که تمایل به ترک انجمادی را افزایش می‌دهند. از این فاکتورها می‌توان به حضور نایوبیم در آلیاژ و مقادیر بسیار کم

منگنز اشاره کرد. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی با کربن بسیار بالا ممکن است به صورت آستنیتی جامد شده و در نتیجه حساسیت آنها به ترک انجمادی بالا برود. این ترک در آلیاژهای ۱۲Cr٪ حاوی نایوبیم مشاهده شده که احتمالاً به دلیل جدایش نایوبیم است. پدیده ترک ذوب موضعی^۱ نیز به ندرت در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی دیده می‌شود.

۵-۴-۲- ترک بازگرمی

این پدیده ممکن است در یک سیکل گرمایش PWHT جوش و یا جریان گرم کردن پاسهای قبلی در جوشکاری چند پاسی اتفاق بیفتد. در این گونه فولادها مولیبدن یکی از عوامل مؤثر در ترک باز گرمی است. ناخالصی‌هایی همچون گوگرد، فسفر، آنتیموان، قلع، بر و مس نیز می‌توانند در ظهور این پدیده مؤثر باشند. به حداقل رساندن ناخالصی‌های فولاد، افزایش حرارت ورودی، محدود کردن مراکز تمرکز تنش می‌توانند باعث جلوگیری از بروز این پدیده شوند. در مجموع فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی برخلاف اکثر فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا (HSLA) که حاوی Cr، Mo و V می‌باشند، نسبت به ترک خوردگی باز گرمی یا عملیات حرارتی پس از جوشکاری حساسیت نشان نمی‌دهند.

۵-۴-۳- ترک ناشی از هیدروژن (HIC)

ترک ناشی از هیدروژن بستگی به ترکیب شیمیایی، میزان هیدروژن، ریزساختار و درجه مهار قطعه دارد و اگر کلیه این عوامل کنترل شود، می‌توان از بروز HIC جلوگیری کرد. با استفاده از فرآیندهای جوشکاری کم هیدروژن و کنترل مناسب پیشگرم و دمای بین پاسی می‌توان به کاهش میزان هیدروژن کمک کرد. همچنین سرعت سرد شدن آهسته از دمای بین پاسی تا زیر دمای M_F نیز مفید خواهد بود. استفاده از فلزات پرکننده آستنیتی نیز در جلوگیری از HIC مؤثر می‌باشند. یکی از مصارف متداول فلز پرکننده آستنیتی، در جوشکاری فولاد زنگ نزن ۴۱۰ است که قبل از جوشکاری تحت عملیات آنیل قرار گرفته و بعد از جوشکاری تحت عملیات PWHT قرار نمی‌گیرد. فولاد آنیل شده ۴۱۰ با مشخصات ASTM A240 می‌تواند به مرز استحکام کششی حداقل ۴۵۰ MPa و استحکام تسلیم حداقل ۲۱۰ MPa برسد بنابراین فلز پرکننده و نوع ۳۰۹L می‌تواند

^۱-Liquation Cracking



برای جوشکاری این فولاد به کار گرفته شود، زیرا حداقل خواص مکانیکی آن بالاتر از مقادیری است که مورد نیاز برای فلز پایه نوع ۴۱۰ می باشد.

۶- فولادهای زنگ نزن فریتی

فولادهای زنگ نزن فریتی، آلیاژهای Fe-Cr-C، حاوی مقدار کافی از کروم همراه با عناصر دیگر پایدارکننده فریت (مانند Al، Nb، Mo و Ti) می باشند. حضور عناصر پایدار کننده فریت از تشکیل آستنیت در هنگام گرم کردن جلوگیری می کند. در نتیجه این فولادها عملیات حرارتی پذیر نمی باشند.

مقاومت مطلوب در برابر ترکهای ناشی از خوردگی تنشی (SCC)، خوردگی حفره ای، خوردگی شیاری (به خصوص در محیطهای کلراید)، از خواص مهم این آلیاژها می باشد. از اینرو فولادهای زنگ نزن در کاربردهایی که مقاومت در برابر خوردگی، خواص مکانیکی (استحکام، چقرمگی و داکتیلیته)، از ملزومات اصلی شرایط کاری است، استفاده می شوند.

گروه کم کروم (۱۰/۵ تا ۱۲/۵) در کاربردهای نظیر اگزوز خودرو^۱، بدلیل خواص خوردگی بهتر نسبت به فولادهای کربنی استفاده می شوند. گروه های کروم متوسط و کروم بالا در محیطهای با شرایط خوردگی شدید کاربرد دارند. آلیاژهای سوپر فریتی^۲ در فرآیندهای شیمیایی و صنایع کاغذ، جایی که مقاومت در برابر اکسیداسیون شدید مورد نیاز است، استفاده می شوند.

محدوده دمایی کاربرد فولادهای زنگ نزن فریتی، به دلیل قابلیت تشکیل فازهای ترد کمتر از ۴۰۰°C است. از نظر متالورژیکی، فلز جوش این آلیاژها، غالباً فریتی می باشد، اگرچه تحت شرایط خاص، مارتنزیت نیز می تواند حضور داشته باشد، ضمن آنکه رسوب کاربیدها و نیتrideها نیز اتفاق می افتد. اصلی ترین جنبه جوش پذیری فولادهای زنگ نزن فریتی، حفظ چقرمگی و داکتیلیته کافی در شرایط جوش داده شده می باشد.

۱-Automotive Exhaust System

۲-Super Ferritic Alloys



۶-۱- آلیاژها و مواد مصرفی

در طی سالیان متمادی فولادهای زنگ نزن فریتی بسته به ترکیب شیمیایی کلی آنها در سه نسل مختلف رشد و تکامل پیدا کرده‌اند. نسل اول این آلیاژها دارای میزان کروم متوسط و درصد کربن تقریباً بالایی می‌باشند و به دلیل آنکه در حین انجماد و سرد شدن و یا گرم شدن تا دماهای بالا مقداری آستنیت تشکیل می‌گردد، ریزساختار آنها ۱۰۰٪ فریتی نیست. آستنیتی که در دمای بالا به وجود می‌آید در حین سرد کردن تا دمای اتاق به مارتنزیت تبدیل می‌شود. نسل دوم آلیاژهای فریتی به گونه‌ای توسعه یافتند که مقدار مارتنزیت در ساختار فریتی آنها به حداقل رسیده و جوش پذیری آنها بهبود یابد. این آلیاژها مقادیر کربن پایینتری داشته و بعضاً دارای عناصر پایدارکننده مانند Nb یا Ti هستند که با کربن و نیتروژن ترکیب شده و در نتیجه پایداری فریت را افزایش می‌دهند. نسل سوم فولادهای زنگ نزن فریتی دارای کروم بالا، عناصر بین نشینی (C,N) کم و مقدار کمی از سایر ناخالصی‌ها می‌باشند. این نوع از فولادها عموماً تحت نامهای تجاری مختلف و برای مصارف خاص تولید می‌شوند. انواع بسیار خالص فولادهای زنگ نزن فریتی دارای مقاومت به خوردگی عالی و چقرمگی و داکتیلیته متوسط می‌باشند. در هنگام جوشکاری این فولادها می‌بایست کاملاً مراقب بود تا از تجمع عناصر ناخواسته به خصوص نیتروژن و اکسیژن در ساختار جلوگیری شود. ضمناً رشد دانه‌ها نیز به حداقل خود برسد. ترکیب شیمیایی تعدادی از فولادهای زنگ نزن فریتی در جدول ۹ آمده است. نامگذاری بسیاری از این فولادها همانند انواع زنگ نزن مارتنزیتی عموماً به صورت 4XX می‌باشد، اما ریزساختار و خواص آنها متفاوت است.

اکثر فلزات پرکننده‌ای که برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی به کار می‌روند، دارای ترکیب شیمیایی مشابه یا تقریباً مشابه با این فولادها می‌باشند. لیستی از این مواد مصرفی در جدول ۱۰ ارائه شده است. فولادهای زنگ نزن فریتی را ضمناً می‌توان بوسیله مواد مصرفی از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی جوشکاری کرد. در این صورت فلز جوش، ترکیبی از آستنیت و فریت خواهد بود. در ادامه توضیح داده خواهد شد که این ریزساختار، چقرمگی و شکل پذیری فلز جوش را بهبود خواهد بخشید. با این حال در جوشکاری نسل سوم فولادهای زنگ نزن فریتی بوسیله فولادهای زنگ نزن آستنیتی دقت زیادی باید مبذول گردد. زیرا یکی از کاربردهای مهم فولادهای نسل سوم در شرایطی است که نیاز به مقاومت در برابر SCC در محیط‌های کلرایدی می‌باشد در حالیکه اکثر فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فلزات پرکننده جوش در محیط‌های حاوی کلراید مستعد به SCC می‌باشند.



جدول ۹: ترکیب شیمیایی گروهی از فولادهای زنگ نزن فریتی کار شده [۳].

Type	UNS No.	Composition (wt%)												
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Al	Ti	Nb
First Generation (Steels with Free Carbon)														
405	S40500	0.08	1.00	0.040	0.030	1.00	11.5-14.5	0.60	—	—	—	0.10-0.30	—	—
430	S43000	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0	0.75	—	—	—	—	—	—
434	S43400	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0	—	0.75-1.25	—	—	—	—	—
442	S44200	0.20	1.00	0.040	0.040	1.00	18.0-23.0	0.60	—	—	—	—	—	—
446	S44600	0.20	1.50	0.040	0.030	1.00	23.0-27.0	0.75	—	0.25	—	—	—	—
Second Generation (Steels with Strong Carbide Formers)														
409 ^b	S40900	0.08	1.00	0.045	0.030	1.00	10.50-11.75	0.50	—	—	—	—	6 × C - 0.75	—
409 ^c	S40910	0.030	1.00	0.040	0.020	1.00	10.5-11.7	0.50	—	0.030	—	—	6 × C - 0.50	0.17
409 ^c	S40920	0.030	1.00	0.040	0.020	1.00	10.5-11.7	0.50	—	0.030	—	—	8 × (C + N) min.	0.10
409 ^c	S40930	0.030	1.00	0.040	0.020	1.00	10.5-11.7	0.50	—	0.030	—	—	0.15-0.50	—
													0.05 min.	—
													Ti + Nb =	—
													[0.08 + 8 × (C + N)] - 0.75	—
436	S43600	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0	—	0.75-1.25	—	—	—	—	5 × C - 0.80
439 ^d	S43035	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	17.0-19.0	0.50	—	0.030	—	—	0.15[0.20 + 4(C + N)] - 1.10	—
468 ^e	S46900	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	18.0-20.0	0.50	—	0.030	—	—	0.07-0.3	0.10-0.60
Third Generation (Steels with Very Low Carbon and/or Strong Carbide Formers)														
444	S44400	0.025	1.00	0.040	0.030	1.00	17.5-19.5	1.00	1.75-2.00	0.035	—	—	Ti + Nb = [0.20 + 4(C + N)] - 0.80	—
XM-27	S44627	0.010	0.40	0.020	0.020	0.40	25.0-27.5	0.50 ^f	0.75-1.50	0.015	0.20 ^g	—	—	0.05-0.20
25-4-4	S44635	0.025	1.00	0.040	0.030	0.75	24.5-26.0	3.5-4.5	3.5-4.5	0.035	—	—	Ti + Nb = [0.20 + 4(C + N)] - 0.80	—
29-4	S44700	0.010 ^h	0.30	0.025	0.020	0.20	28.0-30.0	0.15	3.5-4.2	0.020 ^h	0.15	—	—	—
29-4C	S44735	0.030	1.00	0.040	0.030	1.00	28.0-30.0	1.00	3.6-4.2	0.045	—	—	Ti + Nb = 0.20-1.00	—
29-4-2	S44800	0.010 ^h	0.30	0.025	0.020	0.20	28.0-30.0	2.00-2.50	3.5-4.2	0.020 ^h	0.15	—	Ti + Nb = 6 (C + N) min.	—

Source: Data from ASTM A176, A240, and A268.

^aA single value is a maximum unless otherwise indicated.

^bAs given in ASTM A240/A240M-96a and prior versions.

^cBeginning with ASTM A240/A240M-97a, the carbon in 409 was reduced and provision was made for three different stabilization approaches. Type 409 or UNS S40900 now includes S40910, S40920, and S40930.

^dASTM A240/A240M-00a and prior versions allowed up to 0.07% C in Type 439 under UNS S43035. ASTM A240/A240M-01 reduced the carbon of Type 439 to 0.030% maximum.

^eTi + Nb = 0.20 + 4(C + N) min., 0.80 max.

^fNi + Cu = 0.50% maximum.

^g(C + N) = 0.025% maximum.

جدول ۱۰: فلزات پرکننده فولاد زنگ نزن فریتی براساس استاندارد AWS [۳].

Classification	UNS No.	Composition (wt%)										
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb
E409Nb-XX	—	0.03	1.0	0.04	0.03	0.90	11.0–14.0	0.6	0.75	0.75	—	0.50–1.50
ER409	S40900	0.08	0.8	0.03	0.03	0.8	10.5–13.5	0.6	0.50	0.75	10 × C–1.5	—
ER409Cb	S40940	0.08	0.8	0.04	0.03	1.0	10.5–13.5	0.6	0.50	0.75	—	10 × C–0.75
E409TX-X	W41031	0.10	0.80	0.04	0.03	1.0	10.5–13.5	0.60	0.5	0.5	10 × C–1.5	—
E430-XX	W43010	0.10	1.0	0.04	0.03	0.9	15.0–18.0	0.6	0.75	0.75	—	—
E430Nb-XX	—	0.10	1.0	0.04	0.03	0.90	15.0–18.0	0.6	0.75	0.75	—	0.50–1.50
ER430	S43080	0.10	0.6	0.03	0.03	0.5	15.5–17.0	0.6	0.75	0.75	—	—
ER446LMo	S44687	0.015	0.4	0.02	0.02	0.4	25.0–27.5	^b	0.75–1.50	^b	—	—

Source: AWS A5.4, A5.9, A5.22.

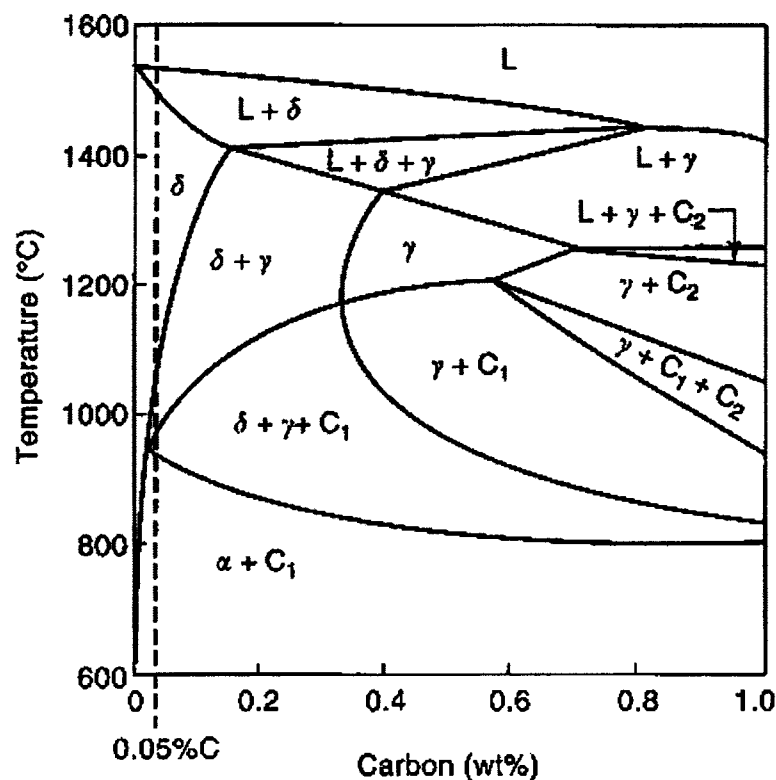
^aA single value is a maximum.

^bNi + Cu = 0.5% maximum.

۶-۲- متالورژی فیزیکی و مکانیکی

به منظور شرح استحاله‌های فازی که در فولادهای زنگ نزن فریتی رخ می‌دهد، همانند فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، می‌توان به سیستم سه تایی Fe-Cr-C مراجعه کرد. بدین منظور می‌توان از دیاگرام شبه دوتایی ۱۷٪Cr جهت بررسی متالورژی فیزیکی این آلیاژها استفاده کرد و این دیاگرام که همان دیاگرام شکل ۴ است، این بار برای بررسی فولادی با ۰/۰۵٪C در شکل ۲۴ نشان داده شده است. این ترکیب تقریباً مشابه آلیاژ کروم متوسط (به عنوان مثال نوع ۴۳۰) می‌باشد.

با توجه به دیاگرام، در انجماد اولیه فریت تشکیل شده و در انتهای انجماد ساختار به صورت کاملاً فریتی باقی خواهد ماند. تا زمانی که سرد شدن تا حدود دمای ۱۱۰۰°C ادامه می‌یابد، فریت در حالت جامد باقی می‌ماند. در این دما میزانی از استحاله به آستنیت رخ خواهد داد و در دماهایی کمی پایین‌تر، مقداری کاربید $Cr_{23}C_6$ نیز تشکیل خواهد شد.

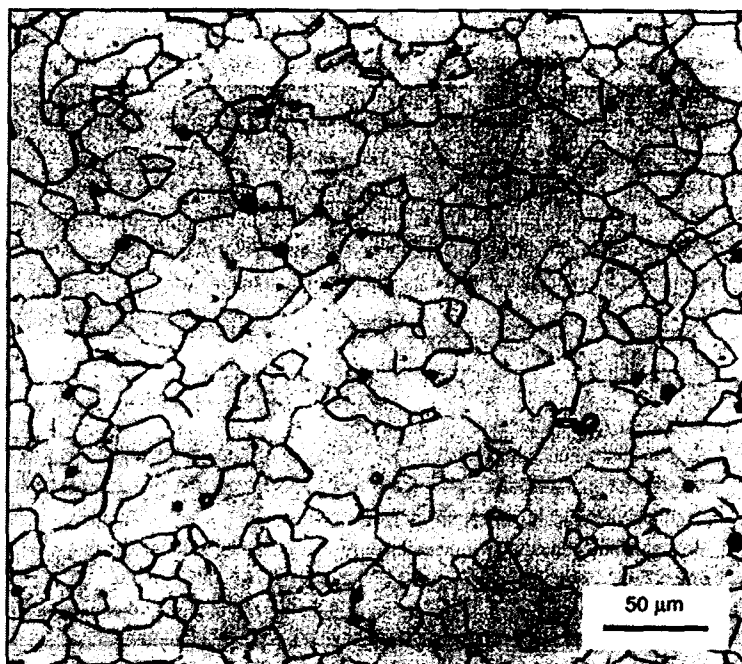


شکل ۲۴: دیاگرام فازی شبه دوتایی ۱۷٪Cr [۳].

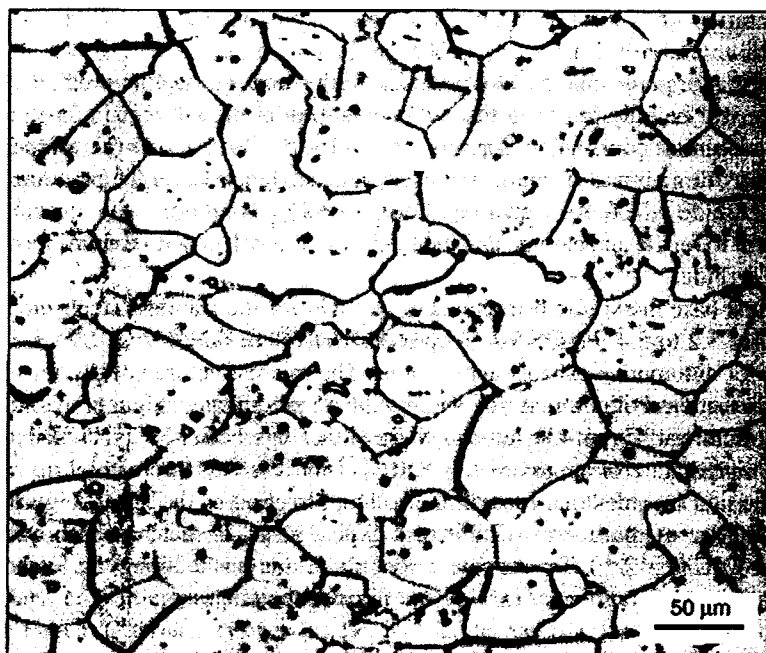


در شرایط سرد شدن تعادلی، آستنیت به فریت و کاربید استحاله پیدا می‌کند و ساختار نهایی مخلوطی از فریت و کاربید $Cr_{23}C_6$ خواهد بود.

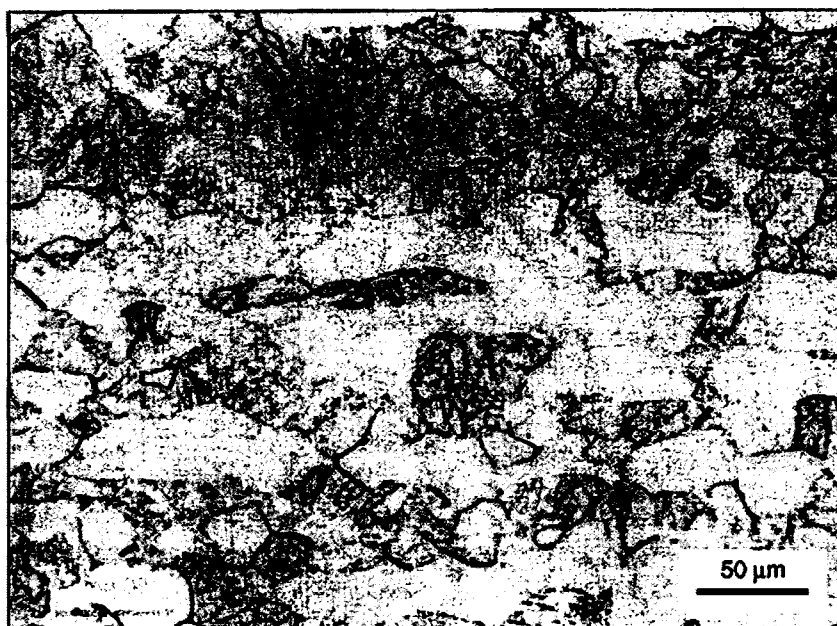
در اشکال ۲۵ تا ۲۷، ریزساختار کلی فلز پایه فولادهای زنگ نزن فریتی کارپذیر نشان داده شده است. شکل ۲۵ نشان دهنده ورق آنیل شده نوع ۴۰۹ است که در اگزوز اتومبیل ها استفاده فراوانی دارد. ریزساختار کاملاً فریتی بوده و دارای رسوبات پراکنده نیتريد ویا کاربید تیتانیم می‌باشد. در شکل ۲۶ ریزساختار ورق نورد گرم شده فولاد نوع ۴۳۰ که به آرامی از دمای نورد ($850^{\circ}C$) سرد شده است، دیده می‌شود. این ریزساختار حاوی فریت و همچنین کاربیدهایی است که در جهت نورد شکل گرفته‌اند. شکل ۲۷ نیز نشان دهنده ریزساختار فولاد نوع ۴۳۰ است که از دمای $1100^{\circ}C$ کوئنچ شده است. این ساختار شامل مارتنزیت هایی در امتداد مرزدانه‌های فریت و همچنین رسوبات مرز دانه ای کاربید و نیتريد می‌باشد.



شکل ۲۵: ریزساختار ورق آنیل شده فولاد زنگ نزن فریتی ۴۰۹ [۳].



شکل ۲۶: ریزساختار ورق نورد گرم شده فولاد زنگ نزن فریتی ۴۳۰ [۳].



شکل ۲۷: ریزساختار فولاد زنگ نزن نوع ۴۳۰ آنیل شده در 1100°C و کوئنچ شده تا دمای اتاق [۳].

۶-۲-۱- اثر عناصر آلیاژی بر ریزساختار

حضور عناصر دیگر، چه آنهایی که به طور معمول به فولادها اضافه می‌شوند و چه آنهایی که به صورت ناخالصی وجود دارند، به طور قابل توجهی شکل و وسعت منطقه آستنیت را تغییر داده و بر



ریزساختار فولادهای زنگ نزن فریتی تأثیر گذار می باشند. نیتروژن که معمولاً به عنوان یک عنصر ناخالصی شناخته می شود، اثری مشابه با کربن بر پایداری منطقه آستنیت دارد (محدوده فاز آستنیت را گسترش می دهد) (شکل ۳). به عنوان مثال افزودن $0.04\%C$ و $0.03\%N$ مرز منطقه فازی آستنیت+فریت را تا مقدار $20\%Cr$ تغییر می دهد. بنابراین کاهش کربن و نیتروژن تا سطوح خیلی کم (کمتر از 100 ppm)، یا افزودن عناصر آلیاژی پایدار کننده فریت، جهت حفظ ریزساختار عمدتاً فریتی در فولادهای کم کروم و کروم متوسط لازم است.

علاوه بر کروم، عناصر دیگر پایدار کننده فریت که به فولادهای فریتی افزوده می شود، شامل سیلیسیم، نایوبیم، مولیبدن و آلومینیم می باشد (جدول ۹). عناصر تیتانیوم و نایوبیم، در غلظتهای کم، به دلیل تمایل بالا به ترکیب با کربن و نیتروژن بسیار مفید هستند. آلومینیم به صورت ترکیب با نیتروژن موثر است. همچنین این عنصر به منظور بهبود مقاومت به اکسیداسیون، به خصوص در دماهای بالا افزوده می شود. سیلیسیم معمولاً به عنوان یک اکسیژن زدا و مقاوم در برابر پوسته شدن^۱ افزوده می شود. مولیبدن نیز به برخی از آلیاژها، به خصوص گروه سوم فولادهای زنگ نزن، جهت افزایش مقاومت به خوردگی به خصوص جلوگیری از حفره دار شدن اضافه می گردد.

عناصر پایداکننده آستنیت شامل منگنز، نیکل و مس همراه با کربن و نیتروژن می باشند. منگنز جهت کنترل گوگرد و بهبود قابلیت ریختگری و خواص کارگرم بعدی اضافه می شود. نیکل و مس به طور معمول به فولادهای زنگ نزن افزوده نمی شوند، اگرچه مقدار کمی از نیکل ممکن است در بهبود چقرمگی مؤثر باشد.

۶-۲-۲- اثر مارتنزیت

از نظر فرآیندهای ترمومکانیکی نرمال، در صورت تشکیل مقداری آستنیت در دمای بالا، در سرد شدن تا دمای اتاق، استحاله به مارتنزیت رخ خواهد داد. تنها در شرایطی که سرعت سرد کردن بسیار کم است و یا نگهداری تکدما درست زیر خط انحلال در آستنیت^۲ (یعنی در حدود دمای $900^{\circ}C$ برای آلیاژ $0.05\%C$ و $17\%Cr$ در شکل ۲۴)، آستنیت به فریت و کاربید استحاله پیدا می کند. تحقیقات مختلف و متناقضی نشان داده اند که مارتنزیت می تواند در فولادهای زنگ نزن فریتی هم اثر مفید و هم اثر مخرب داشته باشد. اگرچه در مراجع کمی به این پدیده اشاره شده است، اما گزارش شده است

۱-Oxide-Scaling

۲-Austenite Solvus

که حضور میزان قابل توجهی از مارتنزیت مشابه با فولادهای سازه‌ای، ترک خوردگی ناشی از هیدروژن را تسهیل می‌کند.

بسته به میزان کربن آلیاژ و درصد حجمی مارتنزیت موجود، این فاز که در فولادهای زنگ نزن فریتی شکل می‌گیرد، عموماً از نوع کم کربن آن بوده و سختی آن زیر ۳۰ HRC می‌باشد. در دماهای بالا که آستنیت پایدار می‌باشد، کربن به دلیل حلالیت بیشتر در آستنیت، از فاز فریت جدا شده و به آستنیت می‌پیوندد. به عنوان مثال در دماهای بین ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰°C (شکل ۲۴)، میزان کربن آستنیت آلیاژ ۱۷Cr-۰.۰۵C از ۰/۰۵ تا ۰/۳٪ وزنی می‌باشد. اگر میزان کربن آستنیت در ۱۲۰۰°C به مقدار تعادلی خود رسید و سپس به سرعت تا دمای اتاق سرد گردد ممکن است سختی مارتنزیت حاصل به ۵۰ HRC نیز برسد. این امر نیازمند انحلال کامل کاربیدهای اولیه در ساختار و زمان کافی برای انجام فرآیند نفوذ می‌باشد.

معمولاً ریزساختارها در دماهای بالا به ترکیب تعادلی خود نرسیده و در نتیجه مارتنزیت به دست آمده دارای این مقادیر سختی نمی‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که مرز مارتنزیت-فریت به عنوان یک مکان ترجیحی برای SCC مرزدانه‌ای شناخته می‌شود.

فولادهای زنگ نزن فریتی که بدلیل کار گرم یا جوشکاری حاوی مقداری مارتنزیت می‌باشند، به منظور دستیابی به شکل پذیری و خواص خوردگی بهینه باید در دمای ۷۶۰ تا ۸۱۵°C آنیل شوند. عملیات آنیل موجب تبدیل مارتنزیت به فریت و کاربیدهای کروی می‌شود.

۶-۲-۳- پدیده تردی

سه نوع تردی که بر خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن فریتی تأثیرگذارند عبارتند از:

۱- تردی ۴۷۵°C

۲- رسوب فاز سیگما

۳- تردی دمای بالا

اگرچه گزارشهای زیادی در ارتباط با تردی ۴۷۵°C و رسوب فاز سیگما ارائه شده است، اما این دو پدیده در جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی مشکل عمده‌ای را ایجاد نمی‌کنند، زیرا تردی بدلیل این دو پدیده همراه با زمانهای طولانی در دماهای متوسط است. در نتیجه، تردی در دمای متوسط^۱

^۱-Intermediate-Temperature Embrittlement (ITE)



فولادهای زنگ نزن فریتی جوشکاری شده، به انتخاب فرآیند یا دستورالعمل جوشکاری حساس نبوده و بیشتر ناشی از کاربردهای مهندسی می‌باشد. در عمل با محدود کردن دماهای سرویس زیر 400°C می‌توان از ITE جلوگیری کرد. هر دو نوع تردی ذکر شده، با افزایش میزان کروم در آلیاژ یا فلز پرکننده تشویق می‌شوند و تمهیدات ویژه‌ای برای عملیات حرارتی بعد از جوش آلیاژهای پرکروم باید در نظر گرفته شود. با توجه به مطالب فوق کاهش خواص مکانیکی ویا خوردگی یا تخریب ناگهانی فولادهای زنگ نزن جوش فریتی داده شده، تقریباً منحصر به تردی دمای بالا^۱ و حساسیت به شیار یا ترکیبی از هر دو عامل می‌باشد.

به دلیل اهمیت تشکیل HTE هنگام جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی و اثر ITE بر این آلیاژها در شرایط کاری، اساس متالورژیکی این پدیده‌های تردی و اثر حساسیت به شیار به طور خلاصه در قسمتهای بعدی بررسی خواهد شد.

۶-۲-۳-۱- تردی 475°C

آلیاژهای حاوی ۱۵ تا ۷۰٪ کروم زمانیکه در محدوده دمایی 425 تا 550°C حرارت داده می‌شوند، به شدت در معرض تردی قرار می‌گیرند. از آنجایی که میکروسکوپ نوری و پراش پرتوی ایکس شواهدی از تغییر ساختار در اثر این پدیده را ارائه نمی‌دهند، مطالعه و پی بردن به علت آن با مشکلات روبرو بوده است. تئوری غالب مربوط به تشکیل رسوب کوهرنت در دماهایی زیر 550°C به واسطه حضور در دیگرام فازی تعادلی Fe-Cr می‌باشد. آلیاژهای پیر شده در دمایی کمتر از 550°C یک فاز فریت غنی از کروم (آلفا پریم) و یک فاز فریت غنی از آهن (آلفا) تشکیل می‌دهند. رسوب آلفا پریم غیرمغناطیسی با ساختار کریستالی BCC و دارای ۲۱ تا ۸۳٪ کروم می‌باشد. سرعت و درجه تردی تابعی از میزان کروم می‌باشد، در نتیجه تردی آلیاژهای پرکروم در زمانهای کوتاهتر و در دماهای کمی بالاتر صورت می‌گیرد. فولادهای زنگ نزن فریتی با کمترین میزان کروم مثل انواع ۴۰۵ و ۴۰۹، به نظر می‌رسد حساسیت کمی به تردی 475°C داشته باشند.

به طور کلی برای وقوع تردی در آلیاژهای کم کروم و کروم متوسط، به زمانهای پیرسازی حداقل ۱۰۰ ساعت نیاز است. آلیاژهای پرکروم ممکن است بعد از زمانهای بسیار کوتاهتر داکتیلیته و چقرمگی خود را از دست دهند. عناصر آلیاژی (مانند مولیبدن، نایوبیم، تیتانیم) وقوع تردی 475°C را

۱-High Temperature Embrittlement (HTE)



سرعت می‌بخشند اثر این عناصر و دیگر عناصر آلیاژی و عناصر ناخالصی بر تردی در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱: اثر عناصر آلیاژی بر تردی 475°C آلیاژهای آهن-کروم [۳].

Element	Effect
Aluminum	Intensifies
Carbon	No effect/intensifies
Chromium	Intensifies
Cobalt	Intensifies
Molybdenum	Intensifies
Nickel	Variable
Niobium	Intensifies
Nitrogen	Small effect/intensifies
Phosphorus	Intensifies
Silicon	Intensifies
Titanium	Intensifies

کار سرد نیز عاملی است که رسوب گذاری آلفا پریم را ترغیب می‌کند و در نتیجه تردی با سرعت بیشتری انجام می‌شود. تردی 475°C همچنین منجر به کاهش شدید مقاومت به خوردگی به دلیل حمله انتخابی به منطقه غنی از آهن می‌شود.

حذف تردی 475°C و بازگشت خواص مکانیکی و خوردگی در شرایط پیر نشده را می‌توان با حرارت دهی در محدوده 550°C تا 600°C برای مدت کوتاه و سریع سرد کردن بدست آورد. بیش از حد نگهداشتن در این دما منجر به تردی فاز سیگما خواهد شد.

۶-۲-۳-۲- تردی فاز سیگما و چی^۱

فاز سیگما در آلیاژهای Fe-Cr حاوی ۲۰ تا ۷۰٪ کروم، در محدوده دمایی 500°C تا 800°C در زمانهای نسبتاً طولانی تشکیل می‌شود. همانند تردی 475°C آلیاژهای با غلظت کروم بیشتر نسبت به تشکیل فاز سیگما مستعدتر هستند و نرخ تشکیل آن سریعتر است. در آلیاژی حاوی کمتر از ۲۰٪ کروم، فاز سیگما به آسانی تشکیل نمی‌شود و اغلب نیازمند صدها ساعت نگهداری در محدوده دمایی

۱- Chi



بحرانی می‌باشد. در آلیاژهای کروم بالا، تشکیل سیگما سریعتر است و نیازمند تنها چند ساعت نگهداری در محدوده دمایی تشکیل فاز سیگما می‌باشد.

عناصر آلیاژی نظیر مولیبدن، نیکل، سیلیسیم و منگنز، محدوده تشکیل فاز سیگما را در دماهای بالاتر، غلظت کروم کمتر و زمانهای کوتاهتر تغییر می‌دهند. همانند دیگر پدیده‌های رسوب دهی، کار سرد تشکیل فاز سیگما را تسریع می‌کند. حذف اثر مضر رسوب گذاری فاز سیگما، با حرارت دهی در دمای بالاتر از 800°C و سریع سرد کردن حاصل می‌شود. در آلیاژهای پرکروم و پرمولیبدن فاز پیچیده به نام فاز چی با ترکیب شیمیایی $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ یا Fe_3CrMo در امتداد فاز سیگما تشکیل می‌گردد و این فازهای بین فلزی ترد تا دمای 900°C یا بیشتر می‌توانند پایدار باشند.

۶-۲-۳-۳- تردی دمای بالا

تردی دمای بالا (HTE) پدیده‌ای است که در نتیجه تغییرات متالورژیکی بوجود آمده در یک فلز در دماهای بالاتر از $0.7T_m$ (دمای ذوب) اتفاق می‌افتد. هرگاه دمای اعمال شده در فرآیندهای ترمومکانیکی یا جوشکاری در فولادهای زنگ نزن فریتی بسیار بالاتر از دمای سرویس توصیه شده باشد، عموماً پدیده HTE رخ خواهد داد. همچنین قرار گرفتن در این دماهای بالا ممکن است منجر به کاهش شدید در مقاومت به خوردگی شود. همچنان که در بخشهای بعدی توضیح داده خواهد شد، مستعد بودن به HTE در درجه اول به ترکیب شیمیایی آلیاژ بخصوص میزان کروم و عناصر بین نشین و اندازه دانه بستگی دارد. انواع پایدار شده و یا کم کروم تقریباً حساسیتی به HTE ندارند.

• تأثیر ترکیب شیمیایی

میزان عناصر بین نشین بخصوص کربن، نیتروژن و اکسیژن تأثیر زیادی بر خصوصیات HTE در فولادهای زنگ نزن فریتی دارد. در دماهای بالا، عناصر بین نشین به صورت محلول جامد در زمینه فریتی یا فریتی+آستنیتی حضور دارند. در حین سرد کردن این عناصر بین نشین رسوباتی را تشکیل می‌دهند که عموماً کاربیدهای پر کروم، نیتrideها و یا کربونیتrideها می‌باشند. این رسوب گذاری ممکن است به هر دو صورت مرزدانه‌ای و درون دانه‌ای رخ دهد که در حالت اول افت داکتیلیته و چقرمگی و در حالت دوم خوردگی مرزدانه ای تشویق می‌گردد.

این حقیقت کاملاً پذیرفته شده است که رسوب گذاری کاربیدها و نیتrideهای پرکروم در حین سرد شدن از دماهای بالا ($>0.7T_m$) تأثیر عمده‌ای در بروز پدیده HTE دارد. در نتیجه HTE با بیشتر شدن میزان عناصر کروم، کربن و نیتروژن افزایش خواهد یافت. به نظر می‌رسد که آلیاژهای کم

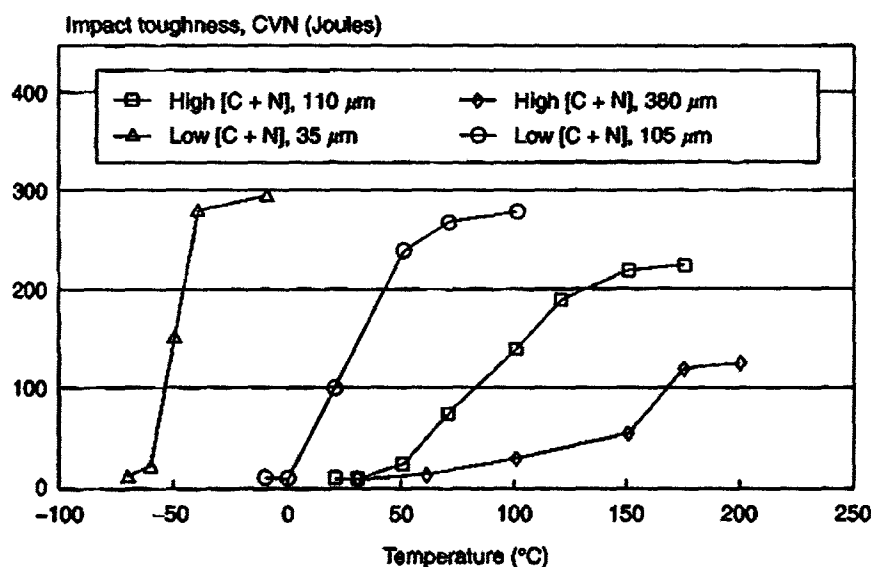


کروم تقریباً حساسیتی به HTE ندارند. سرعت سرد کردن نیز بر میزان HTE تأثیر دارد، اما این تأثیر خود به ترکیب شیمیایی آلیاژ بستگی دارد. در آلیاژهایی با C و N کمتر، سریع سرد کردن از دمای بالای 1000°C موجب کاهش تردی خواهد شد (DBTT کمتر)، که دلیل آن باقی ماندن کربن و نیتروژن به صورت محلول جامد و یا تمایل به تشکیل رسوبات درون دانه‌ای می‌باشد. در سرعت‌های پایین‌تر سرد کردن، رسوبات کاربید یا نیتريد غالباً به صورت مرزدانه‌ای تشکیل می‌شود که موجب کاهش داکتیلیته و چقرمگی خواهد شد.

در آلیاژهای پر کروم با مقادیر بالای 1000 ppm از عناصر کربن و نیتروژن به نظر می‌رسد که سریع سرد کردن سبب تشویق تردی و افزایش DBTT می‌شود. در این مقادیر C+N، ممکن نیست که بتوان با سریع سرد کردن از رسوب گذاری، بخصوص در آلیاژهای پر کروم جلوگیری کرد، زیرا حلالیت کربن و نیتروژن نیز با افزایش غلظت کروم کاهش خواهد یافت. عناصر آلیاژی دیگر مثل مولیبدن، تیتانیم، آلومینیم و نایوبیم نیز بر HTE تأثیر دارند هر چند که تأثیر آنها خود وابسته به میزان تأثیر کروم است. تیتانیم نایوبیم تمایل زیادی به جذب کربن و تشکیل کاربیدهای پایدار داشته و در نتیجه تأثیرات زیان‌آور ایجاد رسوبات پرکروم کاربیدی و کربونیتريدی را کاهش می‌دهند. شکل گیری نیتريد‌ها و اکسیدهای پرآلومینیم نیز موجب کاهش احتمال HTE در آلیاژ خواهد شد. حضور این رسوبات در ریزساختار همچنین از رشد دانه‌ها در دماهای بالا جلوگیری می‌کند.

• تأثیر اندازه دانه

به دلیل اینکه HTE در دماهای بالا رخ می‌دهد، رشد دانه‌ها نیز عاملی مؤثر در تغییر خواص مکانیکی ساختار حاصل خواهد بود، هر چند که نمی‌توان این فاکتور را به تنهایی عامل تمام اثرات تردی ایجاد شده دانست. در آلیاژهای کاملاً فریتی (بدون آستنیت) بخصوص آنهایی که تحت کار سرد قرار می‌گیرند، در دماهای بالای 1100°C ، رشد دانه کاملاً مشهود خواهد بود. در شکل ۲۸، چقرمگی ضربه‌ای به صورت تابعی از اندازه دانه و همچنین مقدار C+N نشان داده شده است. در شکل مشاهده می‌شود که در مقادیر کم عناصر بین نشین (350 ppm) کوچکترین افزایش در اندازه دانه موجب جابجایی قابل توجه در DBTT خواهد شد. از طرفی زمانی که میزان عناصر بین نشین بیشتر می‌شود تأثیر اندازه دانه کاهش می‌یابد. زیرا تردی به دلیل رسوب گذاری بیش از حد رخ خواهد داد. بنابراین انتظار می‌رود که آلیاژهای با خلوص بالا بیشترین افت در چقرمگی و داکتیلیته خود را در نتیجه افزایش اندازه دانه داشته باشند.



شکل ۲۸: اثر اندازه دانه و میزان عناصر بین‌نشینی بر چقرمگی ضربه‌ای آلیاژهای Fe-25Cr [۳].

به طور کلی، میزان بالایی از عناصر بین‌نشین (O,N,C) تأثیر بیشتری بر بروز تردی HTE دارد در نتیجه اغلب آلیاژهای تجاری (به خصوص آلیاژهای پرکروم) حاوی مقادیر بسیار کمی از آنها ($< 200 \text{ ppm}$) می‌باشند.

مکانیزم واقعی HTE موضوعی است که بحث اساسی در ارتباط با آن مربوط به موقعیت رسوبها در ریزساختار می‌باشد. یک تئوری بیان می‌کند که رسوب گذاری درون دانه‌ای، به دلیل محدود کردن حرکت نابجائیها مخرب می‌باشد. تئوری دیگر مربوط به HTE، این است که رسوب گذاری به صورت مرزدانه‌ای بوده و تردی موضعی در مرزهای دانه رخ می‌دهد. به دلیل اینکه شکست در مواد مستعد به HTE عموماً درون دانه‌ای بوده است، به نظر می‌رسد رسوب گذاری درون دانه‌ای تأثیر جدی‌تری بر HTE دارد. گروهی دیگر از محققان این نظریه را ارائه داده اند که رسوبهای مرز دانه ای اثر قابل توجهی بر جوانه‌زنی ترک داشته و در نتیجه موجب کاهش انرژی لازم برای جوانه‌زنی ترکهای کلیواژی درون دانه‌ای خواهند شد. ممکن است مکانیزم واقعی HTE ترکیبی از هر دو باشد، ضمن آنکه با افزایش سرعت سرد شدن رسوب گذاری درون دانه‌ای غالب است. هر دو مکانیزم می‌تواند جهت توضیح کاهش شدید مقاومت به خوردگی در فولادهای زنگ زن فریتی بعد از نگهداری در دماهای بالا، به کار رود. حذف تردی دمای بالا (HTE) در آلیاژهای حاوی مقدار بالای عناصر بین‌نشینی با حرارت دهی بین 730°C تا 790°C حاصل می‌شود.



این عملیات حرارتی موجب فرایپرسازی^۱ رسوبات شده و در نتیجه اثر مخرب بر چقرمگی و داکتیلیته کاهش می‌یابد. در اینجا نیز در صورت حرارت دهی طولانی مدت در این محدوده دمایی خطر تشکیل فاز سیگما وجود دارد. در آلیاژهایی که حاوی مقدار کمی از عناصر بین‌نشین هستند، تردی در اصل به دلیل رشد دانه در دماهای بالا رخ می‌دهد و در نتیجه خواص ضربه‌ای کاهش می‌یابد. بهبود چقرمگی تنها توسط اصلاح اندازه دانه‌ها از طریق کار سرد یا عملیات آنیل ممکن نمی‌باشد. فولادهای زنگ نزن فریتی ریزدانه که حاوی مقدار قابل توجهی کربن می‌باشند نیز چقرمگی کمی دارند و دمای انتقال نرمی به تردی بالاتر از دمای اتاق است، در حالیکه انواع فولادهای ریزدانه با عناصر بین نشین کم دمای انتقالی کمتر از دمای اتاق دارند.

۶-۲-۴- خواص مکانیکی

همانطور که در بخشهای قبلی توضیح داده شد، فولادهای زنگ نزن فریتی طوری فرموله شده‌اند که ساختار آنها از نقطه ذوب تا دمای اتاق کاملاً فریتی باقی بماند. به همین دلیل و به دلیل کم بودن مارتنزیت تشکیل شده، استحکام بخشی از طریق تبدیل آستنیت به مارتنزیت در این فولادها ممکن نخواهد بود. از طریق استحکام دهی محلول جامد، بخصوص با عناصر C و N، آن هم فقط در آلیاژهای پر کروم که افزایش مقدار C+N در آنها موجب تشویق استحاله مارتنزیتی نمی‌شود، می‌توان میزان استحکام را کمی افزایش داد. همچنین می‌توان از واکنشهای رسوبگذاری مختلف نیز در استحکام بخشی این فولادها استفاده کرد، هر چند که این نوع عملیات حرارتی عموماً موجب تردی، کاهش چقرمگی و یا هر دو می‌گردد. در عمل، پرکاربردترین روش در استحکام بخشی فولادهای زنگ نزن فریتی کار سرد است. اغلب محصولات کارپذیر فولادهای زنگ نزن فریتی در شرایط آنیل یا نورد گرم تولید می‌شوند. در جدول ۱۲ خواص مکانیکی اشکال ورق و تسمه فولادهای زنگ نزن فریتی جدول ۹ آمده است. این خصوصیات مربوط به نمونه‌ای است که در محدوده دمایی مشخص، آنیل و سپس در هوا سرد یا در آب کوئنچ شده و دمای آن تا دمای اتاق رسانده شده است. در جدول ۱۳ نیز خصوصیات فلز جوش به دست آمده از فلزات پرکننده فولادهای زنگ نزن فریتی جدول ۱۰ آمده است.

^۱-Overage



جدول ۱۲: خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن فریتی [۳].

Type	UNS No.	Minimum Tensile Strength		Minimum Yield Strength		Minimum Elongation in 50 mm (2 in.) (%)	Maximum Hardness	
		MPa	ksi	MPa	ksi		Brinell	Rockwell B
405	S40500	415	60	170	25	20.0	179	88
409	S40900 ^a	380	55	170	25	20	179	88
430	S43000	450	65	205	30	22.0	183	89
434	S43400	450	65	240	35	22.0	—	89
436	S43600	450	65	240	35	22.0	—	89
439	S43035	415	60	205	30	22.0	183	89
442	S44200	450	65	275	40	20.0	217	96
444	S44400	415	60	275	40	20.0	217	96
446	S44600	450	65	275	40	20.0	217	96
468	S46800	415	60	205	30	22.0	—	90
XM-27	S44627	450	65	275	40	22.0	187	90
25-4-4	S44635	620	90	515	75	20.0	269	28 ^b
29-4	S44700	550	80	415	60	20.0	223	20 ^b
29-4C	S44735	550	80	415	60	18.0	255	25 ^b
29-4-2	S44800	550	80	415	60	20.0	223	20 ^b

^aIncluding S40910, S40920, and S40930.

^bRockwell C scale.

جدول ۱۳: خواص مکانیکی فلزات پرکننده فولادهای زنگ نزن فریتی [۳].

AWS Classification	UNS No.	Minimum Tensile Strength		Minimum Elongation in 50 mm (2 in.) (%)	Postweld Heat Treatment
		Mpa	ksi		
E409Nb-XX	—	450	65	20	^a
ER409	S40900	^b	^b	^b	^b
ER409Cb	S40940	^b	^b	^b	^b
E409TX-X	W41031	450	65	15	None
E430-XX	W43010	450	65	20	^a
E430Nb-XX	—	450	65	20	^a
ER430	S43080	^b	^b	^b	^b
ER446LMo	S44687	^b	^b	^b	^b

^a760°C (1400°F) to 790°C (1450°F) for 2 hours, furnace cooling at a rate not exceeding 55°C (100°F) per hour down to 595°C (1100°F), then air cooling to ambient.

^bAWS A5.9 does not specify mechanical properties for wires and rods.

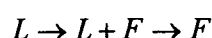


۳-۶- متالورژی جوشکاری

۳-۶-۱- منطقه ذوب^۱

همانطور که در شکل ۲۴ نشان داده شد، انجماد اولیه جوشهای فولاد زنگ نزن فریتی همیشه به صورت فریت اولیه است. ریزساختار منطقه ذوب ممکن است به طور کامل فریتی یا شامل مخلوط فریت و مارتنزیت در مرزهای دانه فریت باشد. سه ترتیب انجماد و استحاله می‌توان برای فولادهای زنگ نزن فریتی در نظر گرفت. اولین و ساده‌ترین آنها به صورت زیر شرح داده می‌شود:

ریزساختار کاملاً فریتی: مسیر استحاله ۱

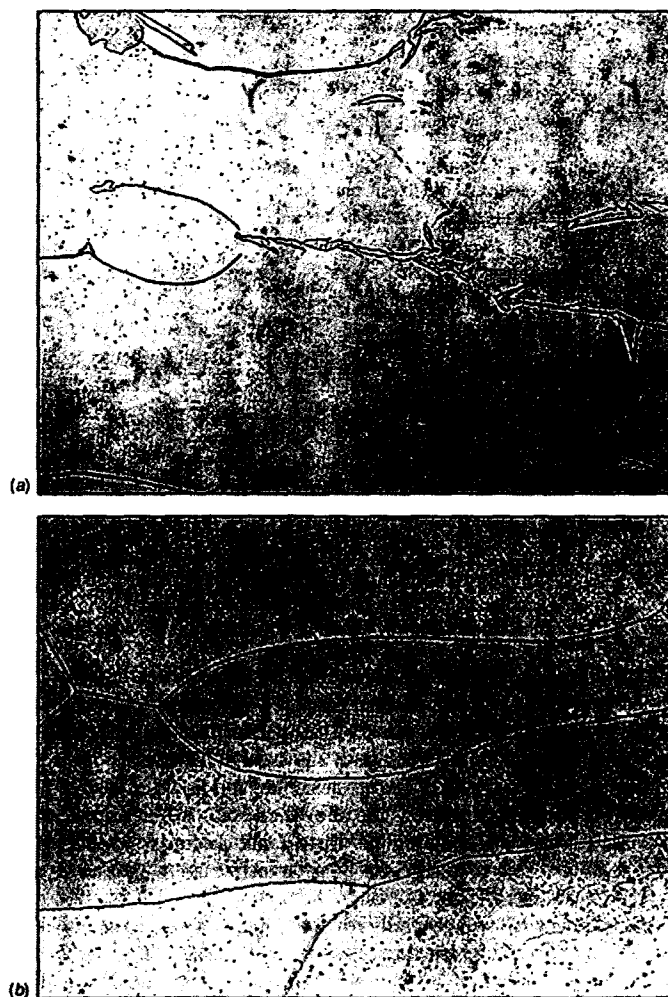


این مسیر زمانی غالب است که نسبت عناصر پایدارکننده فریت به آستنیت بزرگ بوده و از تشکیل آستنیت در دمای بالا، به طور کامل جلوگیری کند. این مسیر استحاله در آلیاژهای زیر معمول می‌باشد:

- ۱- آلیاژهای کم کروم، نظیر انواع ۴۰۵ و ۴۰۹، هنگامی که میزان کربن کم باشد.
- ۲- آلیاژهای کروم متوسط نظیر انواع ۴۳۹، ۴۴۴ و ۴۶۸، در شرایطی که از Ti و Nb به عنوان پایدارکننده‌های کاربرد استفاده شده است تا از اثر مؤثر کربن در پایداری آستنیت جلوگیری شود.
- ۳- آلیاژهای پرکربن نظیر انواع XM-27، 25-4-4، 29-4 و 29-4-2، جایی که میزان کروم بالا غالب است.

به دلیل عدم حضور آستنیت در دمای بالا در هنگام سرد شدن از دمای انجماد به خصوص در جوشهای با حرارت ورودی بالا، رشد دانه‌های فریت اتفاق می‌افتد که کاملاً نا مطلوب است. در شکل ۲۹، ریزساختار منطقه ذوب کاملاً فریتی جوشهای GTAW آلیاژهای ۴۰۹ و ۴۳۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اندازه دانه بسیار بزرگ و اثری از ریزدانه‌های انجمادی (سلولها و دندریتها) مشاهده نمی‌شود.

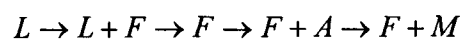
^۱- Fusion Zone



شکل ۲۹: ریزساختار منطقه ذوب فولادهای زنگ نزن تمام فریتی
(a) نوع ۴۰۹ (به میزان کم مارتنزیت در امتداد مرزهای دانه توجه شود)
(b) نوع [۴۳۹].۳

اگر در منطقه ذوب مارتنزیت وجود داشته باشد، دو مسیر استحاله می‌تواند منجر به تشکیل آن شود. در ترتیبی که در زیر شرح داده شده است، انجماد ابتدا به طور کامل به صورت فریتی انجام می‌شود و بالاتر از یک محدوده دمایی در فریت تشکیل شده حالت جامد پایدار است.

فریت و مارتنزیت = مسیر استحاله ۲

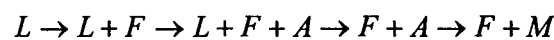


در جریان سرد شدن، مقداری آستنیت در دمای کمتر از حالت پایدار در امتداد مرز دانه های فریت تشکیل می‌شود. که با سرد شدن منطقه، به مارتنزیت تبدیل می‌گردد. این ترتیب استحاله با

توجه به شکل ۲۴، زمانی رخ می‌دهد که میزان کربن در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ باشد توجه به این نکته مهم است که با افزایش کربن (یا میزان عنصر پایدارکننده آستنیت)، خط انحلال در فریت^۱ افزایش می‌یابد و محدوده دمایی که در آن فریت در حالت جامد به تنهایی پایدار است کاهش می‌یابد و در نتیجه از رشد بیشتر دانه های فریت، به دلیل تشکیل آستنیت در مرزدانه آن، کاسته می‌شود. این مسیر استحاله در انواع ۴۳۰، ۴۳۴، دسته کم کربن آلیاژهای ۴۴۲ و ۴۴۶، در آلیاژ ۴۰۵ پرکربن می‌تواند اتفاق افتد.

در مسیر ۳، آستنیت می‌تواند در انتهای انجماد در ریزساختار باقی می‌ماند.

فریت و مارتنزیت: مسیر استحاله ۳

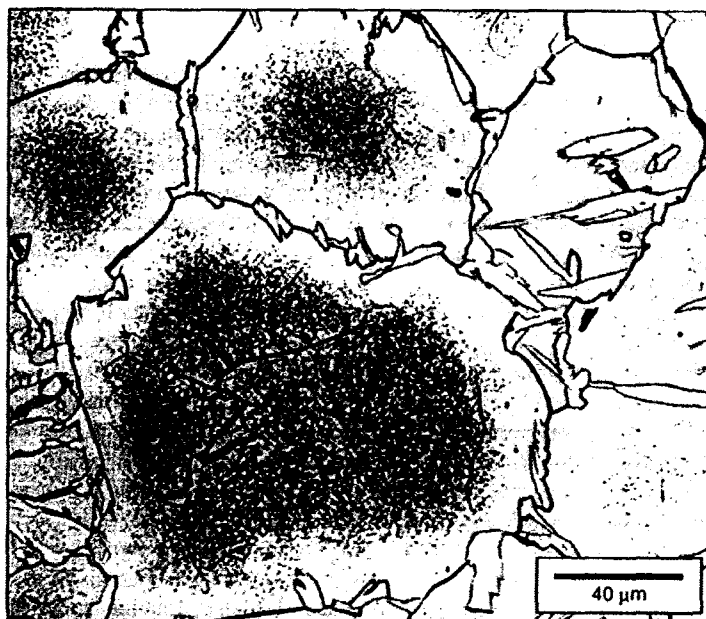


انجماد تا تشکیل فریت اولیه آغاز شده اما مقداری آستنیت در انتهای انجماد از طریق واکنش پریتکتیک-یوتکتیک پیچیده تشکیل می‌گردد. این ترتیب استحاله نیز در شکل ۲۴، برای فولادهایی با درصد کربن بالاتر از ۰/۱۵ قابل شرح دادن می‌باشد و به عنوان مثال می‌توان برای فولادهای با کربن بالاتر مثل ۴۴۲ و ۴۴۶، چنین مسیری در نظر گرفت.

در مسیر ۳، نسبت به مسیر ۲، درصد بیشتری از مارتنزیت در ریزساختار منطقه ذوب خواهد بود. تشکیل آستنیت در انتهای انجماد و حضور آن در حالت جامد در دماهای بالا، رشد دانه فریت را نسبت به مسیر ۲ که در قسمتی از آن ساختار کاملاً فریتی در محدوده‌ای از دماهای بالا وجود دارد، بیشتر محدود می‌کند. در محدوده دمایی که ساختار کاملاً فریتی است، رشد دانه‌ها بسیار سریع اتفاق می‌افتد.

ریزساختار منطقه ذوب دوفازی فریت همراه با مارتنزیت در شکل ۳۰ نشان داده شده است. مارتنزیت در امتداد مرزهای فریت وجود دارد و معمولاً به صورت یک فاز مرزدانه‌ای پیوسته می‌باشد. اگر میزان مارتنزیت افزایش یابد، این فاز به صورت صفحات ویدمن اشتاتن درآمده و از مرزدانه جوانه‌زنی می‌کند و به صورت درون دانه‌ای تشکیل می‌شود.

^۱-Ferrite Solvus

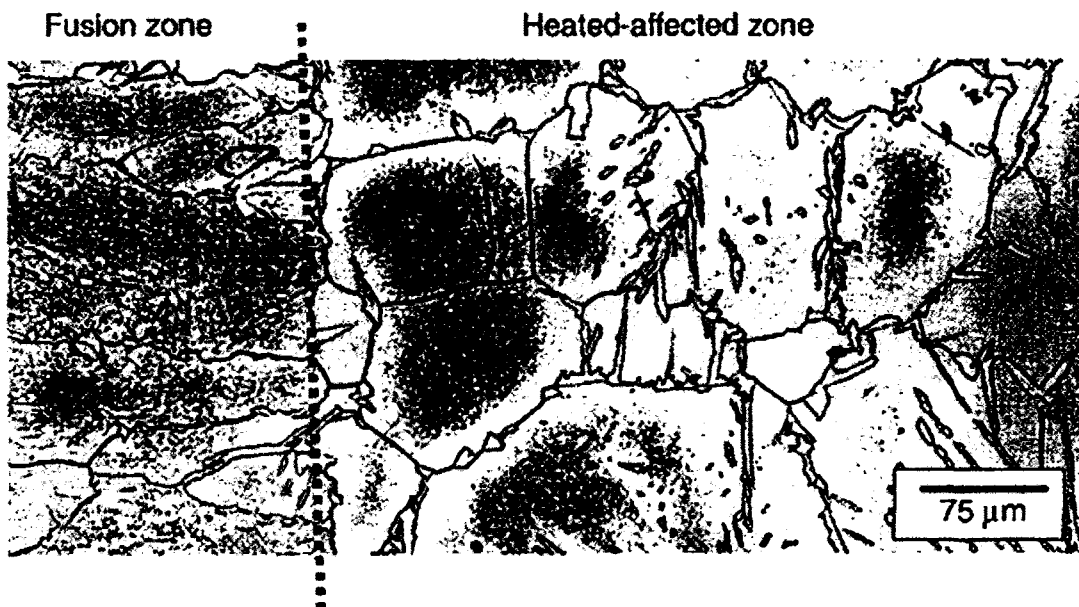


شکل ۳۰: ریزساختار دوفازی فریت و مارتنزیت مرز دانه ای در رسوب فلز جوش آلیاژ ۳۰۴[۳].

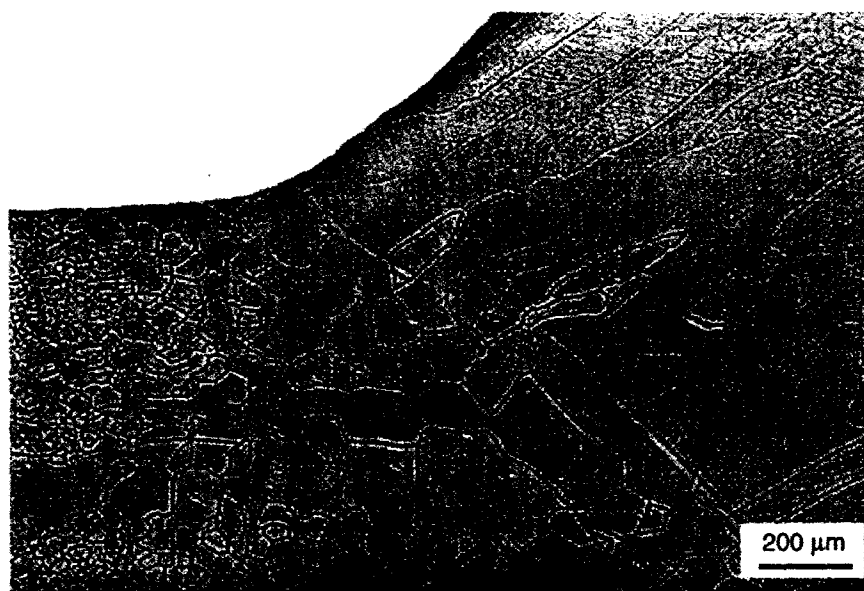
۶-۳-۲- منطقه متأثر از حرارت (HAZ)

ریزساختار اغلب فولادهای زنگ نزن فریتی شامل مخلوطی از فریت و کاربید (یا کربونیتريد) می‌باشد. زمانیکه این ساختار در منطقه HAZ تا دماهای بالا حرارت داده می‌شود، کاربیدها و دیگر رسوبها حل می‌شوند و در صورت حضور مارتنزیت، این فاز به فریت (همراه با تشکیل کاربید) و یا در صورت گرمایش مجدد ناشی از رسوب پاسبهای بعدی به آستنیت تبدیل می‌شود. بسته به ترکیب شیمیایی آلیاژ، HAZ در دماهای بالا می‌تواند کاملاً فریتی یا مخلوطی از فریت و آستنیت باشد. در صورت عدم حضور رسوبات و آستنیت مرزدانه‌ای، دانه‌های فریت به سرعت رشد می‌کنند و HAZ اغلب فولادهای زنگ نزن فریتی نسبتاً درشت دانه هستند. اگر آستنیت در دمای بالا در ریزساختار پایدار باشد، می‌تواند به عنوان عاملی جهت جلوگیری از رشد دانه‌های فریت عمل کند. در هنگام سرد شدن ممکن است رسوب گذاری مجدد کاربیدها و نیتريد‌ها اتفاق افتد. به دلیل آنکه کربن و نیتروژن در دماهای پائین حلالیت نسبتاً کمی در فریت دارند، نیروی محرکه قوی جهت رسوب گذاری بوجود می‌آورند. آستنیتی که در دمای بالا تشکیل شده است در هنگام سرد شدن به مارتنزیت استحاله پیدا می‌کند. این مارتنزیت به طور معمول در امتداد مرزهای دانه فریت توزیع می‌گردد.

در شکل ۳۱، منطقه HAZ در فولاد زنگ نزن ۴۳۰ مشاهده می‌شود. دانه‌های فریت کاملاً درشت و مرز دانه‌ها شامل لایه پیوسته مارتنزیت می‌باشند که در نتیجه تشکیل آستنیت در دمای بالا به وجود آمده‌اند. رسوبات درون دانه‌ای شامل کاربیدها، کربونیت‌ریدها و نیت‌ریدها که در هنگام سرد شدن تشکیل شده‌اند نیز در شکل مشخص است. منطقه HAZ فولاد ۴۰۹ جوشکاری شده با فرآیند GTAW نیز در شکل ۳۲ نشان داده شده است. در این آلیاژ آستنیت در دمای بالا تشکیل نشده است و HAZ کاملاً فریتی می‌باشد. همچنین در ریزساختار HAZ رسوب‌گذاری مشاهده نمی‌شود که بدلیل میزان کم کروم و افزودن تیتانیوم که با نیتروژن و کربن واکنش می‌دهد، می‌باشد. در نتیجه از رسوب‌گذاری کاربیدهای $M_{23}C_6$ و $M_{23}(C,N)_6$ جلوگیری می‌گردد.



شکل ۳۱: ریزساختار HAZ فولاد زنگ نزن نوع ۴۳۰ (به حضور مارتنزیت مرزدانه‌ای و رسوب‌گذاری درون دانه‌ای توجه شود) [۳].



شکل ۳۲: ریزساختار HAZ فولاد زنگ نزن نوع ۴۰۹ که به طور کامل فریتی است [۳].

۴-۶- جوش پذیری

تحقیقاتی که در ارتباط با جوش‌پذیری فولادهای زنگ نزن فریتی انجام شده است مربوط به آلیاژهای کروم متوسط می‌باشد. در آلیاژهای کم کروم احتمال بروز ترکهای جوشکاری شامل ترکهای سرد و گرم کم است و در آلیاژهای پرکروم به منظور جلوگیری از ترک، جوشکاری در شرایط بسیار کنترل شده‌ای باید انجام شود.

۴-۶-۱- ترک انجمادی

ترک انجمادی در مراحل نهایی انجماد و به دلیل اثرات ترکیبی ناخالصی، جدایش عناصر آلیاژی، تشکیل فیلم مذاب در مرزهای دانه و... ایجاد می‌گردد. زمانیکه فاز اولیه انجماد فریت باشد، احتمال ترک خوردگی انجمادی کم است. تمام فولادهای زنگ نزن فریتی به صورت فریت اولیه جامد می‌شوند، بنابراین این فولادها به ترک انجمادی مستعد نمی‌باشند. افزودن عناصر آلیاژی نظیر تیتانیم و نایوبیم، مقدار زیاد ناخالصیها، احتمال ترک خوردگی انجمادی را افزایش می‌دهند، زیرا جدایش ناشی از آنها در هنگام انجماد می‌تواند منجر به تشکیل فیلمهای مذاب در امتداد مرزهای دانه جامد شده شوند. لازم است مقدار تیتانیم و نایوبیم در فلز پرکننده مصرفی همواره در حداقل مقدار ضروری

نگهداری و استفاده شود تا بهترین میانگین بین حداقل ترکهای گرم و حداکثر انعطاف پذیری و مقاومت به خوردگی را در فولادهای زنگ نزن فریتی به دست دهد.

۶-۴-۲- تردی دمای بالا

تردی دمای بالا یکی از مهمترین مشکلات جدی در جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی است. همانطور که اشاره شد، این نوع تردی تابعی از ترکیب شیمیایی در ریزساختار است که در آلیاژهای پرکروم اثر خود را بیشتر نشان می‌دهد. میزان بالایی از عناصر بین نشینی، به خصوص کربن و نیتروژن اثر مضاعفی بر ایجاد این نوع تردی دارند. اندازه بزرگ دانه نیز به خصوص در HAZ تشویق کننده تردی می‌باشد. در فلز جوش و HAZ، تردی دمای بالا منجر به کاهش زیاد چقرمگی و داکتیلیته، نسبت به فلز پایه خواهد شد.

۶-۴-۳- ترک ناشی از هیدروژن (HIC)

تحقیقات انجام شده بر فولاد ۴۳۰Nb نشان داده شده است که در صورت حضور مارتنزیت، در فلز جوش و HAZ، این آلیاژ مستعد به ترک هیدروژنی می‌باشد. پیشگرم و عملیات حرارتی بعد از جوش مناسب می‌تواند این مشکل را حل کند.

۶-۵- مقاومت به خوردگی

با انجام عملیات جوشکاری، مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن فریتی، شدیداً کاهش پیدا می‌کند. این فولادها ممکن است مستعد به انواع مختلفی از خوردگی شامل خوردگی بین‌دانه‌ای (IGC)، خوردگی شیاری و خوردگی حفره‌ای باشند. به دلیل اینکه این مواد دارای نیکل نیستند، در برابر ترک ناشی از خوردگی توأم با تنش (SCC) مقاوم بوده و از اینرو به عنوان جایگزین مناسبی برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی در محیط‌های حاوی کلراید کاربرد دارند.

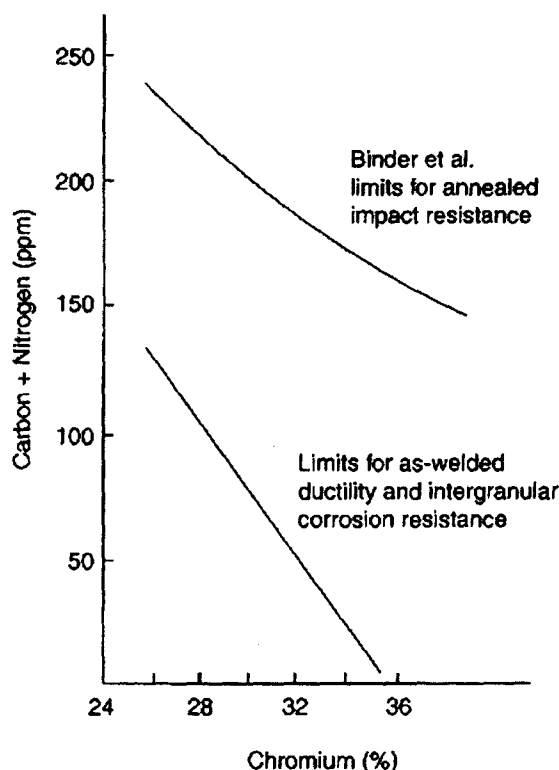
خوردگی شیاری و حفره‌ای معمولاً با انتخاب مناسب آلیاژ قابل اجتناب می‌باشند، در حالیکه IGC شدیداً حساس به دستورالعمل جوشکاری و شرایط عملیات حرارتی بعد از جوش می‌باشد. تحقیقات نشان داده است که IGC در فولادهای فریتی همچون فولادهای آستنیتی ناشی از



حساس شدن^۱ می‌باشد. مطابق با این مکانیزم، در نتیجه رسوبات مرزدانه‌ای کاربیدهای غنی از کروم و یا نیتrideها، نواحی فقیر از کروم^۲ مستعد به حمله خوردگی می‌شوند.

در نتیجه مقاومت در برابر خوردگی مرز دانه ای تابعی از عناصر بین نشین می‌باشد (شکل ۳۳). در حین جوشکاری، کربن و نیتروژن کاملاً در منطقه ذوب و نواحی HAZ که دمای آنها بالاتر از 1000°C می‌باشد (این دما بسته به سرعت گرم کردن تغییر می‌کند) حل می‌شوند. در حین سرد شدن ممکن است رسوبات پرکروم M_{23}C_6 یا Cr_2N در بین یا درون دانه‌ها تشکیل شود که محل تشکیل رسوبات به سرعت سرد کردن و مقدار عناصر بین نشین بستگی دارد. در سرعت‌های بالای سرد کردن، محل ترجیحی برای تشکیل رسوبات در درون دانه‌ها و در سرعت‌های پایین‌تر بین دانه‌ها خواهد بود.

در ریزساختارهای جوش داده شده با کروم متوسط و کروم بالا این رسوبات در هر دو محل تشکیل می‌گردند.



شکل ۳۳: اثر میزان عناصر بین نشینی (C+N) و کروم بر داکتیلیته و مقاومت به خوردگی مرز دانه ای [۳].

۱- Sensitization

۲- Cr-Depleted



در مقادیر بالای عناصر بین نشین C+N ($>1000 \text{ ppm}$)، حتی با سریع سرد کردن نیز نمی‌توان از رسوب گذاری در بین دانه‌ها جلوگیری کرد و این آلیاژها پس از جوشکاری مستعد به IGC (خوردگی مرزدانه‌ای) خواهند بود. در آلیاژهایی با مقادیر کم تا متوسط عناصر بین نشین (حدود ۲۰۰ تا ۵۰۰ ppm) سریع سرد کردن در جلوگیری از رسوب گذاری در مرزدانه‌ها مؤثر خواهد بود و بنابراین یک محدوده سرعت سرد کردن بحرانی وجود دارد که در مقادیر فراتر از آن پدیده حساس شدن رخ خواهد داد. این محدوده عموماً با سرعت‌های معمول سرد کردن در جوشکاری قوسی روی هم می‌افتد. آلیاژهایی با مقادیر بسیار کم عناصر بین نشینی، بیشترین مقاومت را به IGC خواهند داشت. اما در آلیاژهای پرکروم می‌بایست مقدار این عناصر برای حفظ داکتیلیته مورد نیاز بسیار پایین باشد (شکل ۳۳). رابطه بین مقاومت به خوردگی مرز دانه‌ای و داکتیلیته جوش به عنوان تابعی از مقدار کروم و عناصر بین نشین در جدول ۱۴ آمده است. پایین بودن میزان عناصر بین نشین لازم در این آلیاژهای پرکروم بیانگر حساسیت و قابلیت ذاتی آنها به IGC در حین جوشکاری است.

جدول ۱۴: حدود کربن و نیتروژن برای حفظ داکتیلیته و مقاومت به خوردگی براساس میزان کروم [۳].

Chromium (wt%)	Limit of Carbon + Nitrogen (ppm)	
	IGC Resistance ^a	Ductility ^b
19	60-80	<700
26	100-130	200-500
30	130-200	80-100
35	250	<20

با استفاده از PWHT می‌توان مقاومت به IGC را در فولادهای زنگ نزن فریتی به خوبی بهبود بخشید. رساندن دما به محدوده بین ۷۰۰ تا ۹۵۰°C در غنی کردن ترکیب مناطق عاری شده از کروم در اطراف کاربیدهای مرزدانه‌ای، از طریق نفوذ حجمی کروم مؤثر خواهد بود. این روش در افزایش میزان داکتیلیته جوش و چقرمگی نیز تأثیر دارد. برای جلوگیری از تردی ناشی از رسوبگذاری گسترده در مرزدانه‌ها در آلیاژهای پرکروم، سرد کردن سریع پس از PWHT توصیه می‌شود.

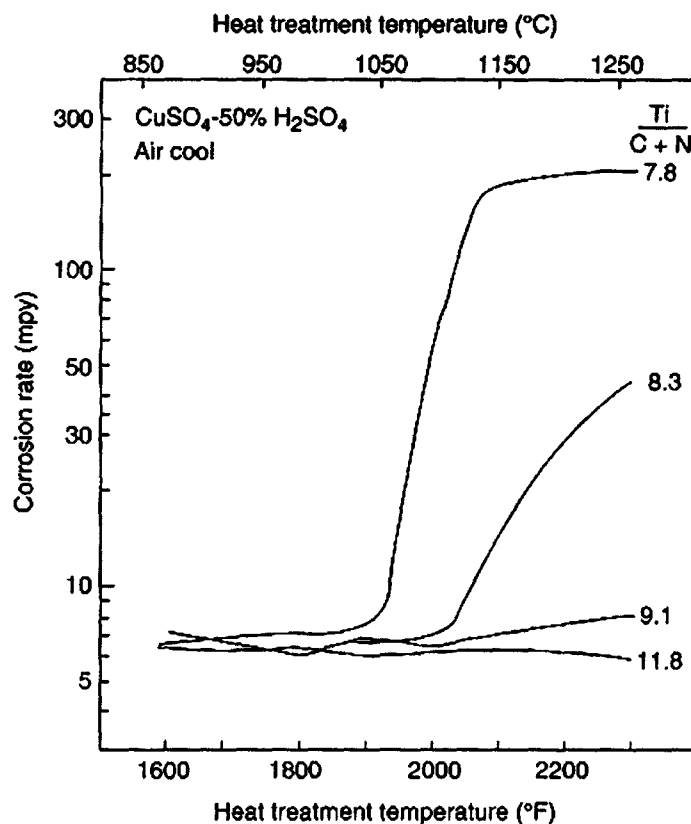
همانند HTE، مقاومت به IGC نیز با افزودن عناصر پایدارکننده همچون تیتانیوم و نایوبیم به فولادهای زنگ نزن فریتی افزایش می‌یابد. این عناصر موجب تشکیل کاربیدهای نوع MC شده که در



دماهای بالا در مقابل انحلال مقاومت می‌کنند. مقدار این عناصر پایدارکننده از آلیاژی به آلیاژ دیگر تغییر می‌کند، اما معمولاً در آلیاژهای پرکروم مقدار حداقل اطمینان برابر با $6 \times (C+N)$ و یا $0.2 + 4 \times (C+N)$ می‌باشد. تأثیر نسبت $Ti / (C+N)$ بر IGC در نمونه‌های عملیات حرارتی شده آلیاژ $26Cr-1Mo$ در شکل ۳۴ نشان داده شده است. در نسبت‌های حدود ۱۰، دماهای بالا مشابه آنچه در حین جوشکاری وجود دارد تأثیر بسیار کمی بر مقاومت به خوردگی خواهند داشت. در نوع ۴۰۹ برای ایجاد مقاومت به IGC می‌بایست این نسبت از عناصر پایدارکننده برقرار باشد:

$$Ti + Nb \geq 0.08 + 8 \times (C + N)$$

اثر پایدار کننده‌ها در منطقه ذوب چندان بارز نیست زیرا کاربیدها و نیتrideهای پایدار شده در حین ذوب حل خواهند شد. در حین سرد کردن ممکن است که رسوبات پرکروم تشکیل شوند که در نتیجه فلز جوش را حساس خواهند کرد.



شکل ۳۴: اثر دما و نسبت $Ti/(C+N)$ بر خوردگی مرز دانه ای آلیاژ $26Cr-1Mo$ [۳].

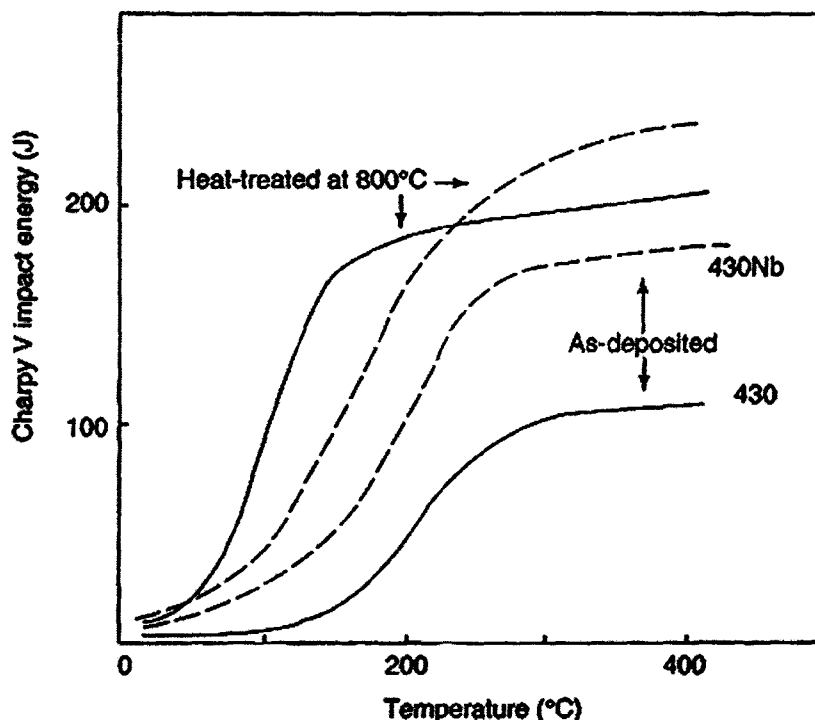


۶-۶- عملیات حرارتی بعد از جوش (PWHT)

PWHT در فولادهای زنگ نزن فریتی در بازیابی چقرمگی، داکتیلیته و مقاومت به خوردگی سازه‌های جوشکاری شده می‌تواند مفید باشد. در بعضی موارد، پیشگرم و دماهای بین پاسی نیز جهت دستیابی به خواص بهینه ممکن است کنترل گردد. توصیه‌های مربوط به پیشگرم دمای بین پاسی و PWHT، به طور قابل توجهی وابسته به ریزساختار می‌باشد. در جوشهایی با ریزساختار کاملاً فریتی، عملیات پیشگرم ضروری نیست و در حقیقت با پیشگرم کردن به دلیل کاهش سرعت سرد شدن رسوب گذاری و رشد دانه‌ها ترغیب می‌شود. عملیات حرارتی بعد از جوش در محدوده دمایی ۷۵۰ تا ۸۰۰°C ممکن است جهت کاهش تنشهای پسماند به کار رود. اگرچه این عملیات حرارتی می‌تواند برای فولادهایی که حاوی مقادیر بالای کروم و مولیبدن می‌باشند (نظیر ۲۵-۴-۴، ۲۹-۴ یا ۲۹-۴-۲)، به دلیل تشکیل سریع فاز سیگما و یا فاز چی در این محدوده دمایی خطرناک باشد. در جوشهایی که حاوی مارتنزیت می‌باشند، دمای پیشگرم و دمای بین پاسی در محدوده ۲۰۰ تا ۳۰۰°C توصیه می‌شود. اگر چه این عملیات باید با توجه به پتانسیل رشد دانه فریت و رسوب گذاری از سرعتهای سرد شدن آرامتر جوش در نظر گرفته شود.

PWHT در محدوده ۷۵۰ تا ۸۵۰°C در اینجا نیز جهت کاهش تنشهای پسماند و تمپر کردن مارتنزیت موجود می‌تواند انجام شود. این محدوده دمایی کمتر از آنست که آستنیت مجدداً تشکیل گردد. اثر مفید PWHT بر چقرمگی HAZ فولادهای ۴۳۰ و ۴۳۰Nb در شرایط جوش داده شده و عملیات حرارتی شده در شکل ۳۵ نشان داده شده است.

بهبود چقرمگی در شرایط جوش داده شده گروه پایدار شده نسبت به فولاد ۴۳۰ می‌تواند مربوط به عدم حضور مارتنزیت در ریزساختار باشد.



شکل ۳۵: تغییرات چقرمگی فلز جوش (CVN) براساس دما برای فولاد ۴۳۰ (خط سیاه) و نوع حاوی ۴۳۰Nb (خط چین) [۳].

۶-۷- انتخاب فلز پرکننده

با توجه به خواص و شرایط سرویس مورد نیاز، فلزات پرکننده مختلفی را برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فريتی می‌توان به کار برد. اغلب از فلزات پرکننده با ترکیب شیمیایی مشابه^۱ یا نزدیک ترکیب شیمیایی فلز پایه^۲، به جهت سازگاری با فلز پایه استفاده می‌شود. در مواقعی که فلز پرکننده مشابه در دسترس نیست (به خصوص برای فولادهای زنگ نزن فريتی گروه سوم بسیار پرآلیاژ) ممکن است سازنده مجبور به تهیه تسمه‌های باریک از ورق‌های فلز پایه جهت استفاده در فرآیند GTAW شود [۳]. فلزات پرکننده خانواده ۴۰۹ و ۴۳۰ به آسانی قابل دسترس می‌باشند. نوع ۴۳۰ به صورت الکترودهای توپر و توپودری، الکترودهای پوشش‌دار و سیمهای جوشکاری قابل تهیه می‌باشد. فلز پرکننده خانواده ۴۰۹، تنها به صورت الکترودهای توپودری در دو حالت گاز محافظ

۱- Match

۲- Near-Match



و خود محافظ تولید می‌شوند [۲]. این دو الکتروود اغلب برای جوشکاری فولادهای فریتی گروه اول و دوم استفاده می‌شوند [۴].

فلزات پرکننده فولادهای زنگ نزن آستنیتی نیز قابل استفاده برای جوشکاری فولادهای فریتی می‌باشند و موجب تشکیل ریزساختار دو فاز آستنیتی-فریتی با داکتیلیته و چقرمگی بالاتر نسبت به رسوب فولادهای زنگ نزن فریتی می‌شوند. فلزات پرکننده فولاد زنگ نزن آستنیتی اغلب برای فلزات پایه از گروه اول و دوم فولادهای زنگ نزن فریتی، انتخاب می‌شوند. به دلیل کاربردی که فولادهای زنگ نزن فریتی گروه سوم در محیط‌های کلرایدی دارند، استفاده از فلزات پرکننده فولاد زنگ نزن آستنیتی مقاومت در برابر SCC را کاهش می‌دهند. گاهی اوقات، استفاده از فلز پرکننده فولاد زنگ نزن آستنیتی، برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی ایجاد اشکال می‌کند. زیرا اختلاف هدایت حرارتی و انبساط حرارتی این دو فاز، سبب بروز عیوبی مثل ترک‌های ناشی از تنش‌های حرارتی و یا کاهش خواص خوردگی و حتی بروز خوردگی الکترولیتی ناشی از ایجاد جریان گالوانیکی و بالاخره تنش‌های باقیمانده که از بین بردن آنها غیرممکن است، خواهد شد.

فلزات پرکننده پایه نیکل نیز با فولادهای زنگ نزن فریتی سازگار بوده و رسوب جوش کاملاً آستنیتی تولید می‌کند. این فلزات پرکننده معمولاً برای گروه‌های پرکروم استفاده می‌شوند تا مقاومت به خوردگی فلز پایه همراه با خواص مکانیکی مطلوب فلز جوش حاصل شود. با انتخاب مناسب فلز پرکننده پایه نیکل نظیر AWS A5.14 ERNiCrMo-3 می‌توان فولاد زنگ نزن فریتی پرکروم را در محیط‌های کلرایدی به کاربرد و به مقاومت مطلوبی در برابر SCC دست یافت. همچنین فلزات پرکننده آستنیتی و پایه نیکل را می‌توان در جوشهای غیرمشابه بین آلیاژهای فریتی و دیگر مواد، نظیر فولادهای سازه یا انواع دیگر فولادهای زنگ نزن به کار برد. در این موارد، لازم است که در انتخاب فلز پرکننده به این نکته دقت گردد که کدام یک از فلزات پایه در محیط طراحی دارای مقاومت به خوردگی کمتری هستند [۳]. فلزات پرکننده آستنیتی زنگ نزن که دارای درصد فریت دلتا نسبتاً بالایی می‌باشند (مانند انواع ۳۰۹ و ۳۱۲) جهت اتصال فولاد زنگ نزن فریتی به انواع دیگر فولادهای زنگ نزن، فولادهای نرم^۱ و کم آلیاژ مناسب می‌باشد. فلزات پرکننده نیکلی نیز می‌تواند جهت اتصال فولادهای زنگ نزن فریتی به خودشان، فولادهای نرم و کم آلیاژ، آلیاژهای نیکل و آلیاژهای مس-نیکل به کار روند [۲].

۱- Mild Steel



۶-۸- فرآیندهای جوشکاری قوسی فولادهای زنگ زن فریتی

برخی از روشهای معمول جوشکاری قوسی جهت اتصال این دسته از فولادها، به انواع زیر تقسیم می‌شود:

۱- فرآیند SMAW

الکترودهای روپوش دار استاندارد با آنالیز مشابه با فلز پایه برای جوشکاری تمام فولادهای کروم دار فریتی به جز گروه های ۱- Free Machining ۲- حاوی تیتانیوم یا آلومینیوم ۳- دارای عناصر بین‌نشینی کم، در دسترس می‌باشند.

زمانیکه الکترودهای فولاد زنگ زن آستنیتی جهت جوشکاری فولاد زنگ زن کروم دار استفاده می‌شود، میزان درصد کروم آن به دلیل رقیق شدن، باید بیشتر از فلز پایه باشد. بدین منظور از الکترودهای خانواده E310(25Cr-20Ni) می‌توان استفاده کرد، اگرچه الکترودهای E309(22Cr-12Ni) جایگزین مناسب برای جوشکاری فولادهای زنگ زن کروم‌دار می‌باشد. برای جوشکاری گروه Free-Machining، الکترودهای خانواده E309-15 به دلیل ایجاد حدوداً ۱۰٪ فریت در فلز جوش مناسب می‌باشند. برای فولادهای حاوی تیتانیوم و آلومینیوم، انتخاب الکترودها باید براساس ملزومات سرویس انجام گیرد.

در زمان جوشکاری با الکترودهای فولاد زنگ زن کروم‌دار، قوس جوشکاری باید کوتاه باشد تا از اکسیداسیون اضافی کروم و آلودگی نیتروژن جلوگیری شود. ضمن آنکه احتمال بروز عیوبی مثل خلل و فرج کاهش می‌یابد. به دلیل مشابه از تکنیک بافته ای نیز باید جلوگیری شود. فرآیند SMAW، جهت جوشکاری فولاد زنگ زن فریتی دارای میزان کم عناصر بین‌نشینی، به دلیل آلودگی ذاتی این فرآیند ناشی از حضور کربن، نیتروژن و اکسیژن، مناسب نمی‌باشد. در صورتیکه این فرآیند باید به کار رود، استفاده از الکترودهای فولاد زنگ زن آستنیتی یا آلیاژ نیکل توصیه می‌شود [۲].

به طور کلی، نقطه ذوب فولادهای زنگ زن فریتی، کمی بیشتر از فولادهای زنگ زن آستنیتی و آلیاژهای پایه نیکل مقاوم به خوردگی است. بنابراین هنگامی که از الکترودها روکش دار آستنیتی، برای جوشکاری فولاد زنگ زن فریتی استفاده می‌شود، باید تدابیر لازم را برای رسیدن به نقطه ذوب فولاد پایه، به کار بست. این، شاید مهم‌ترین مسأله نگران کننده در زمان به کارگیری این قبیل الکترودها در جوشکاری فولادهای زنگ زن فریتی است، زیرا عدم توجه لازم، سبب بروز عیوبی مثل عدم ذوب کافی در جوش می‌گردد. بدیهی است که محاسبه، تنظیم، به کارگیری شدت جریان و ولتاژ

مناسب و سرعت دست جوشکار از مهم‌ترین نکاتی است که تحت عنوان تدابیر لازم در بالا از آن‌ها نام برده شده است.

وجود سرباره و باقی ماندن لایه‌های آن در بین دانه‌های تسبیح شکل جوش، مشکل دیگری است که در روش جوشکاری SMAW فولادهای زنگ نزن فریتی بروز می‌کند. اگر سرباره به آسانی از جوش خارج نشود، به عملیات سنگ زنی نیاز خواهد بود، زیرا در جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی، معمولاً بخش زیادی از سرباره جوش به صورت شناور باقی مانده و به سطح مذاب نمی‌آید. این پدیده را به خصوص در جوش‌های چند پاسه باید مدنظر قرار داد و در پایان هر پاس، این عیب به راحتی با عکس‌های رادیوگرافی قابل ملاحظه است و نتیجه نهایی آن، کاهش چشمگیر انعطاف پذیری و چقرمگی جوش و مستعد شدن برای بروز ترک و جدایش است.

۲- فرآیند GTAW

نکات مهمی که باید هنگام استفاده از روش TIG در جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی رعایت کرد به قرار زیر است:

الف: برای جوشکاری از جریان DC منفی استفاده شود.

ب: الکتروود تنگستن با ۲ درصد توریم معادل استاندارد AWS:EWTh-۲ مناسب است.

پ: هنگامی که الکتروود تنگستنی یا فلز پرکننده دچار اکسایش می‌شود، باید جوشکاری را متوقف کرده الکتروود مذکور را اصلاح و اکسیدزدایی کرد.

ت: برای دستیابی به کیفیت جوش بهتر، تا حد ممکن باید از بدنه کولت و سرامیک بزرگتر استفاده کرد.

ث: گاز آرگون، هلیوم یا مخلوطی از این دو گاز، می‌تواند به عنوان گاز محافظ نتیجه مفیدی بر جای بگذارد. البته همواره به خاطر داشته باشید که درجه خلوص گاز مصرفی باید خیلی بالا باشد.

ج: برای جوش‌های صد در صد نفوذی یا در جاهایی که احتمال اکسایش فلز پایه در حین جوشکاری وجود دارد، استفاده از گاز محافظ پشت بند نیز توصیه شده است.

چ: در هنگام جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی به هیچ عنوان نباید از گاز پشت بند نیتروژن استفاده کرد زیرا این عنصر در ترکیب با فولاد فریتی ضمن کاهش چقرمگی و انعطاف پذیری، فولاد را بسیار ترد و شکننده کرده و موجبات کاهش مقاومت به خوردگی آن را نیز فراهم می‌آورد.



ج: در هنگام جوشکاری TIG فولادهای زنگ نزن فریتی وقتی یک طرف دو قطعه به صورت لب به لب و تخت جوشکاری می شود هرگز نباید آنها را گردانده و از پشت دوباره جوشکاری کرد زیرا ترکیب شیمیایی و ساختار متالورژیکی دو طرف ورق ها و جوش، با یکدیگر متفاوت شده و در نتیجه، جوش حاصل به شدت در برابر ترک ها و عیوب مشابه آن حساس خواهد شد.

خ: چربی زدایی و تمیز کردن محل اتصال، سطوح اطراف و طرف پشت یا زیر قطعه کار، تا فاصله حداقل ۵۰ میلی متری محل اتصال و نیز تمیز کردن فلز پرکننده از هرگونه آلودگی و چربی بسیار حایز اهمیت است.

د: در زمان جوشکاری، باید از دستکش های سالم و تمیز استفاده کرد.

ذ: تورچ جوشکاری را باید در حین کار، با زاویه ای حدوداً ۷۵ درجه نسبت به قطعه کار نگه داشت تا امکان حضور مؤثر گاز محافظ در حوضچه جوش فراهم آید.

ر: اگر در حین جوشکاری TIG، مقدار پاشش جرقه ها به اطراف زیادتر از حد متعارف شد، یا انتقال قطره ای مذاب در حد فاصل نوک الکترود تنگستن و حوضچه به کندی صورت گرفت، باید بلافاصله به تعویض سرامیک و نازل های سر تورچ اقدام کرد، زیرا در غیر این صورت، به دلیل عدم کنترل گاز محافظ به مقدار کافی از حوضچه جوش، محافظت به عمل نیامده و امکان نفوذ هوای محیط به داخل حوضچه افزایش می یابد.

ز: پیچیدگی، تابیدگی و یا خم شدن الکترود تنگستن به هیچ عنوان حتی برای مقدار کم نیز مجاز نمی باشد، زیرا سبب کاهش مقاومت به ضربه، انعطاف پذیری، مقاومت در برابر شکست و مقاومت در برابر خوردگی جوش خواهد شد.

س: در جوشکاری های TIG اتوماتیک با سرعت های بالا، استفاده از گاز محافظ فراگیر با فشار و غلظت مناسب توصیه می شود [۴].

۳- فرآیند GMAW

این فرایند معمولاً با جریان DCEP و با محافظت آرگون +۱٪ اکسیژن برای حالت انتقال فلز اسپری و با محافظت هلیوم +۲/۵٪ دی اکسید کربن برای حالت انتقال اتصال کوتاه توصیه می گردد. بهترین گاز محافظ برای کاربرد مشخص با توجه به فولادی که جوشکاری می شود و نوع انتقال فلز باید انتخاب گردد.

در انتقال اتصال کوتاه از الکترودهای با قطر کم همراه با ولتاژ قوس و جریان الکتریکی کم استفاده می شود. این روش برای جوشکاری ورق های نازک بسیار مناسب است. از مزایای این حالت



انتقال فلز، حرارت ورودی نسبتاً کم و محدودیت رشد دانه در منطقه HAZ است که البته استفاده از این روش می‌تواند همراه با عیب عدم ذوب کافی باشد که باعث می‌شود این تکنیک برای کاربردهای غیرحساس محدود گردد. در صورت استفاده از فولاد زنگ نزن آستنیتی به عنوان فلز پرکننده، به دلیل حرارت ورودی نسبتاً کم و میزان درجه دقت کم (در حدود ۱۰٪)، این حالت از انتقال مطلوب می‌باشد.

با انتقال فلز به صورت اسپری و درجه رقیق شدن بالای ناشی از آن، ممکن است برای انتخاب فلزات پرکننده آستنیتی مناسب برای جوشکاری تمام فولادهای زنگ نزن کروم دار محدودیت ایجاد گردد. این نوع انتقال توسط الکترودهای با قطر بالاتر با استفاده از جریان الکتریکی و ولتاژ بیشتر نسبت به انتقال اتصال کوتاه انجام می‌گیرد و محدود به موقعیتهای تخت و افقی می‌باشد. در نتیجه این انتقال، به دلیل حرارت ورودی بالا رشد دانه‌ها اغلب در منطقه HAZ رخ می‌دهد.

با استفاده از روش جوشکاری پالسی، به دلیل کنترل بهتر حوضچه مذاب جوش، می‌توان از الکترودها با قطر بالا در تمام موقعیتهای جوشکاری استفاده کرد؛ اگرچه سرعت رسوب دهی نسبت به انتقال اسپری کمتر است، حرارت ورودی کل در انتقال فلز به صورت پالسی کمتر از حالت اسپری بوده و در نتیجه رشد دانه ناخواسته در فولادهای زنگ نزن به حداقل می‌رسد.

۴- فرآیند SAW

برخی از فولادهای زنگ نزن فریتی می‌توانند با روش جوشکاری قوس زیرپودری و با استفاده از یک یا چند پاس، به یکدیگر متصل شوند.

در این روش انتخاب فلاکس با در نظر گرفتن بازیابی کروم و مولیبدن در نظر گرفته می‌شود. زیرا بازدهی انتقال این عناصر از میان قوس با توجه به نوع فلاکس تغییر می‌کند. در صورت استفاده از فلاکسهای خنثی، به منظور جبران اتلاف عناصر، باید از الکترودهایی عناصر آلیاژی بیشتر به کار برد. در انتخاب این فرآیند برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی باید به حرارت ورودی بالای آن توجه داشت. به منظور اجتناب از درشت دانه شدن فلز جوش، برای کاربردهای مشخص می‌توان از الکترودهای زنگ نزن آستنیتی استفاده کرد. در این موارد، هنگام انتخاب ترکیب الکترود و فلاکس به اثر درجه رقیق شدن باید توجه شود. درجه رقیق شدن در SAW در حدود ۳۰ تا ۵۰٪ یا بیشتر می‌باشد.

فرآیند SAW برای اتصال فولادهای زنگ نزن فریتی که دارای میزان کمی از عناصر بین نشین هستند و مقاومت به خوردگی آنها باید در حد مطلوبی باشد، مناسب نیست [۲].



۷- فولادهای زنگ نزن آستنی

فولادهای زنگ نزن آستنی بزرگترین گروه از انواع متداول فولادهای زنگ نزن بوده و میزان تولید آن از تمام انواع دیگر بیشتر است. این فولادها مقاومت به خوردگی خوبی را در اکثر محیط ها از خود نشان می دهند. استحکام این فولادها تقریباً برابر با استحکام فولادهای نرم بوده و حداقل استحکام تسلیم در آنها 210 MPa می باشد. خواص ضربه ای دماهای پایین در این فولادها بسیار مطلوب بوده و این امر آنها را برای مصارف دماهای بسیار کمتر از 0°C مناسب کرده است. دمای کار در آنها می تواند حتی بیش از 760°C نیز باشد، اما استحکام و مقاومت به اکسیداسیون بسیاری از این فولادها در این دماها محدود می شود. کار سرد استحکام فولادهای زنگ نزن آستنی را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. بیشترین کاربرد آنها در شرایطی است که مقاومت به خوردگی در برابر محیط یا دماهای بالا نیاز باشد. این فولادها در صورت رعایت احتیاطهای لازم عموماً قابل جوشکاری می باشند.

معمولاً عناصر آستنی زا که مهمترین آنها نیکل می باشد، در مقادیر زیاد به این فولادها افزوده می شوند. دیگر عناصر آستنی زا عبارتند از $\text{Cu}, \text{N}, \text{C}$. کربن و نیتروژن عناصر آستنی زا قوی می باشند که این امر را می توان از مقادیر مختلف موجود در فرمولهای نیکل معادل دریافت کرد.

فولادهای زنگ نزن آستنی معمولاً داکتیلیته و چقرمگی خوبی داشته و میزان تغییر طول بالایی را در بارگذاری کششی از خود نشان می دهند. این فولادها به دلیل بالاتر بودن مقادیر عناصر آلیاژی، از انواع مارتنزیتی و فریتی کروم متوسط تا کم کروم گرانتز می باشند. اما علیرغم این بالاتر بودن قیمت، این فولادها به دلیل فواید مهندسی گوناگون خود به خصوص شکل پذیری و جوشکاری هزینه کلی کار را در مقایسه با سایر فولادهای زنگ نزن کاهش می دهند.

فولادهای زنگ آستنی دارای کاربردهای زیاد می باشند که علت آن تنها مربوط به مقاومت به خوردگی مطلوبشان نمی باشد، قابلیت شکل پذیری، ساخت و با دوام بودنشان نیز از عوامل مؤثر در کاربرد گسترده آنها است که از جمله می توان به استفاده آنها در تجهیزات ذخیره سازی، معماری، تجهیزات آشپزخانه و تولیدات دارویی اشاره کرد. برخی از رده های پرآلیاژ این فولادها برای کاربرد در دماهای بسیار بالا (بیشتر از 1000°C) به عنوان مثال در سبدهای عملیات حرارتی مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین علاوه بر مقدار بالای کروم، این آلیاژها معمولاً حاوی میزان بالایی از سیلیسیم (و بعضی مواقع آلومینیم) و کربن می باشند تا به ترتیب مقاومت در برابر اکسیداسیون و یا کربوره شدن و استحکام حفظ شود. توجه به این نکته مهم است که فولادهای زنگ نزن آستنی معمول به



دلیل مستعد بودن به ترک خوردگی تنش انتخاب مناسبی برای برخی از محیط ها مثل آب دریا یا دیگر محیط های حاوی کلراید نمی باشد [۳].

خواص فیزیکی فولادهای زنگ نزن آستنیتی در جدول ۱ ارائه شده است. این آلیاژها نسبت به فولادهای زنگ نزن کروم دار دارای انبساط حرارتی بیشتری می باشد و در نتیجه اعوجاج آنها در هنگامی که جوشکاری بیشتر است. فولاد زنگ نزن آستنیتی نوع ۳۰۱ غیرمغناطیسی بوده و بقیه آلیاژها دارای خاصیت مغناطیسی بسیار کمی می باشد [۲].

جدول ۱۵: ترکیب شیمیایی گروهی از فولادهای زنگ نزن کار شده [۳].

Type	UNS No.	Composition (wt%)*									
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Other
201	S20100	0.15	5.5-7.5	0.06	0.03	1.0	16.0-18.0	3.5-5.5	—	0.25	—
302	S30200	0.15	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	8.0-10.0	—	—	—
304	S30400	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-10.5	—	—	—
304L	S30403	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-12.0	—	—	—
304H	S30409	0.04-0.1	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	8.0-10.5	—	—	—
308	S30800	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	19.0-21.0	10.0-12.0	—	—	—
309	S30900	0.20	2.0	0.045	0.03	1.0	22.0-24.0	12.0-15.0	—	—	—
310	S31000	0.25	2.0	0.045	0.03	1.0	24.0-26.0	19.0-22.0	—	—	—
316	S31600	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	—	—
316L	S31603	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	—	—
317	S31700	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0-20.0	11.0-15.0	3.0-4.0	—	—
321	S32100	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	9.0-12.0	—	—	Ti: 5 × C-0.70
330	S33000	0.10	2.0	0.045	0.03	0.75-1.5	17.0-20.0	34.0-37.0	—	—	—
347	S34700	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	9.0-13.0	—	—	Nb: 10 × C-1.00

*A single value is a maximum.

فولادهای زنگ نزن آستنیتی در طبقه بندی AISI شامل سریهای ۲۰۰ و ۳۰۰ می باشد. آلیاژهای سری ۲۰۰ دارای مقادیر بالایی از کربن، منگنز و نیتروژن بوده و کاربردهای ویژه ای به عنوان مثال در شرایطی که نیاز به مقاومت در برابر پوسته شدن^۱ می باشد، دارند. همچنین این آلیاژها نسبت به سریهای ۳۰۰، به دلیل مقادیر بالای کربن و نیتروژن خود، مقدار نیکل کمتری دارند. آلیاژهای سری ۳۰۰ در بین انواع فولادهای زنگ نزن آستنیتی، از قدیم کاربرد بیشتری دارند. در جدول ۱۵ لیستی از رایج ترین انواع آلیاژهای سری ۳۰۰ آمده است.

آلیاژهایی که بیشترین کاربرد را دارند یعنی انواع ۳۰۴، ۳۱۶، ۳۲۱ و ۳۴۷ و انواع مختلف هر یک از آنها، از نوع ۸-۱۸ با مقادیر اسمی ۱۸٪Cr و ۸٪-۱۰٪Ni می باشد. حرف L در هر یک از این

۱- Gallling



آلیاژها نشان دهنده کم کربن بودن آن نوع از آلیاژ با درصد اسمی کربن حدود ۰/۰۳٪ است. این آلیاژها مقاومت خوبی در برابر خوردگی مرزدانه‌ای در محیط‌های خورنده دارند. انواع H دارای مقادیر کربنی در حدود ۰/۱٪ وزنی هستند. این آلیاژها به دلیل بالاتر بودن استحکام نسبت به آلیاژهای استاندارد و کم کربن در دماهای بالا کاربرد دارند. انواع N دارای نیتروژن می‌باشد که جهت مقاصد خاص تا ۰/۲٪ به آلیاژهای سری ۳۰۰ (۳۱۶N و ۳۰۴N) و به آلیاژهای دارای میزان منگنز بالا، در مقادیر بیشتر افزوده می‌شود (منگنز حلالیت نیتروژن در فاز آستنیت را بالا می‌برد). افزودن نیتروژن، استحکام و مقاومت به خوردگی حفره‌ای را در فولادهای زنگ نزن آستنیتی افزایش می‌دهد. آلیاژهای حاوی تیتانیوم و نایوبیم مثل انواع ۳۲۱ و ۳۴۷ به عنوان انواع پایدار شده شناخته می‌شوند. زیرا افزودن این دو عنصر آلیاژ را در برابر تشکیل کاربیدهای کروم $M_{23}C_6$ پایدار می‌کند. این عناصر با تشکیل کاربیدهای پایدار نوع MC در دماهای بالا، شکل‌گیری کاربیدهای پرکروم را محدود می‌کنند. افزودن این عناصر تا ۱/۰٪ وزنی، کربن موجود در شبکه را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و در نتیجه رسوبگذاری کاربیدهای پرکروم را مشکل خواهد کرد. همین امر احتمال حساس شدن را که منجر به خوردگی مرزدانه‌ای در آلیاژهای آستنیتی می‌شود، کاهش می‌دهد [۳].

سیلیسیم نیز از عناصر آلیاژی مهم در برخی از فولادهای زنگ نزن آستنیتی است که با افزایش آن، مقاومت در برابر اکسیداسیون و کربوره شدن در دماهای بالا افزایش می‌یابد. همچنین مقدار بالای سیلیسیم، موجب بهبود سیالیت فلز مذاب و در نتیجه خواص ریختگری خواهد شد.

۷-۱- آلیاژها و مواد مصرفی

فلزات پرکننده فولاد زنگ نزن آستنیتی در جدول ۱۶ معرفی شده‌اند. این جدول به سه قسمت تقسیم شده است. قسمت اول براساس AWS A5.4 برای الکترودهای روپوش دار (SMAW)، قسمت دوم براساس AWS A5.9 برای سیم‌ها و الکترودهای مغزه فلزی (GMAW, GTAW) و قسمت سوم براساس AWS A5.22 برای الکترودهای توپودری با محافظت گاز (FCAW) می‌باشد.



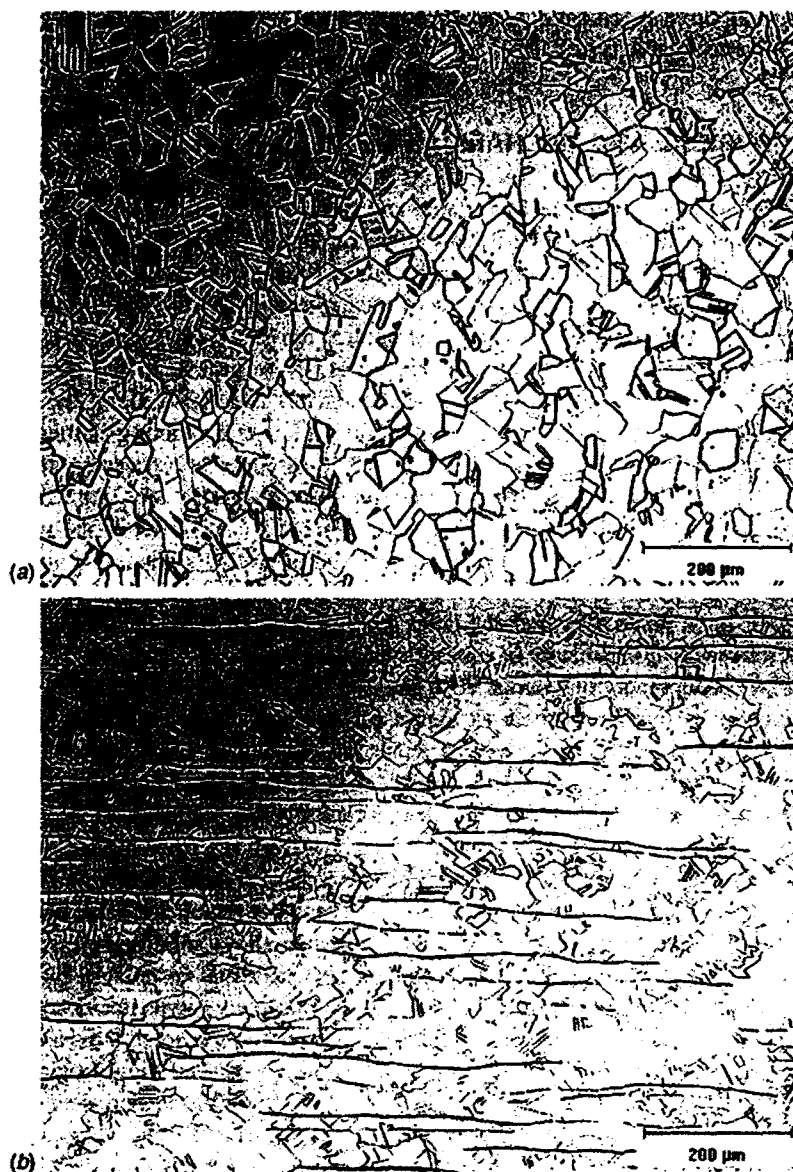
جدول ۱۶: فلزات پرکننده فولاد زنگ نزن آستینیتی بر اساس استاندارد AWS [۳].

Type	UNS No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Other
<i>Part 1: Covered Electrodes from AWS A5.4</i>											
219	W32310	0.06	8.0-10.0	0.04	0.03	1.00	19.0-21.5	5.5-7.0	0.75	0.10-0.30	—
308	W30810	0.08	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75	—	—
308H	W30810	0.04-0.08	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75	—	—
308L	W30813	0.04	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75	—	—
309	W30910	0.15	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	22.0-25.0	12.0-14.0	0.75	—	—
309L	W30917	0.04	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	22.0-25.0	12.0-14.0	0.75	—	—
310	W31010	0.08-0.20	1.0-2.5	0.03	0.03	0.75	25.0-28.0	20.0-22.5	0.75	—	—
316	W31610	0.08	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	—	—
316H	W31610	0.04-0.08	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	—	—
316L	W31613	0.04	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	—	—
317	W31710	0.08	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	12.0-14.0	3.0-4.0	—	—
317L	W31713	0.04	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	12.0-14.0	3.0-4.0	—	—
330	W88331	0.18-0.25	1.0-2.5	0.04	0.03	0.90	14.0-17.0	33.0-37.0	0.75	—	—
347	W34710	0.08	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.75	—	Nb: 8 × C-
<i>Part 2: Bare Electrodes, Bare Rods, Tubular Metal-Cored Electrodes, and Strips from AWS A5.9</i>											
219	S21980	0.05	8.0-10.0	0.03	0.03	1.00	19.0-21.5	5.5-7.0	0.75	0.10-0.30	—
308	S30880	0.08	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	—	—
308H	S30880	0.04-0.08	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	—	—
308L	S30883	0.03	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	—	—
308Si	S30881	0.08	1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	—	—
308LSi	S30888	0.03	1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	19.5-22.0	9.0-11.0	0.75	—	—
309	S30980	0.12	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75	—	—
309L	S30983	0.03	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75	—	—
309Si	S30981	0.12	1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75	—	—
309LSi	S30988	0.03	1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	23.0-25.0	12.0-14.0	0.75	—	—
310	S31080	0.08-0.15	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	25.0-28.0	20.0-22.5	0.75	—	—
316	S31680	0.08	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	—	—
316H	S31680	0.04-0.08	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	—	—
316L	S31683	0.03	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	—	—
316Si	S31681	0.08	1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	—	—
316LSi	S31688	0.03	1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	—	—
317	S31780	0.08	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	18.5-20.5	13.0-15.0	3.0-4.0	—	—
317L	S31783	0.03	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	18.5-20.5	13.0-15.0	3.0-4.0	—	—
330	N08331	0.18-0.25	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	15.0-17.0	34.0-37.0	0.75	—	—
347	S34780	0.08	1.0-2.5	0.03	0.03	0.30-0.65	19.0-21.5	9.0-11.0	0.75	—	Nb: 10 × C-1.0
347Si	S34788	0.08	1.0-2.5	0.03	0.03	0.65-1.00	19.0-21.5	9.0-11.0	0.75	—	Nb: 10 × C-1.0
<i>Part 3: Gas-Shielded Flux-Cored Electrodes from AWS A5.22^a</i>											
308	W30831	0.08	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	—	—
308L	W30835	0.04	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	—	—
308H	W30831	0.04-0.08	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	—	—
309	W30931	0.10	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	—	—
309L	W30935	0.04	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	22.0-25.0	12.0-14.0	0.5	—	—
310	W31031	0.20	1.0-2.5	0.03	0.03	1.0	25.0-28.0	20.0-22.5	0.5	—	—
316	W31631	0.08	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	—	—
316L	W31635	0.04	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	17.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	—	—
317L	W31735	0.04	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	12.0-14.0	3.0-4.0	—	—
347	W34731	0.08	0.5-2.5	0.04	0.03	1.0	18.0-21.0	9.0-11.0	0.5	—	Nb: 8 × C-1.0



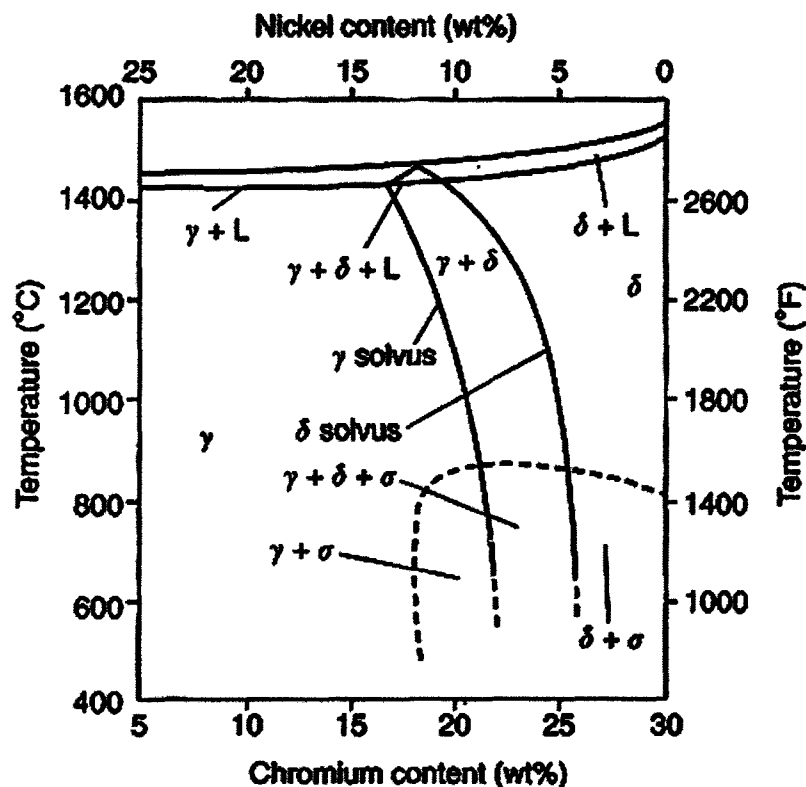
۷-۲- متالورژی فیزیکی و مکانیکی

فرمولاسیون و فرایندهای ترمومکانیکی انجام گرفته بر روی فولادهای زنگ نزن آستنیتی به گونه‌ای است که ریزساختار غالب آنها آستنیتی باشد. بسته به نسبت عناصر فریت زا به آستنیت زا، ریزساختار ریختگی یا کار شده می‌تواند کاملاً آستنیتی یا مخلوطی از آستنیت و فریت باشد. در شکل ۳۶ دو نمونه از ریزساختار فولادهای زنگ نزن آستنیتی کار شده نشان داده شده است.



شکل ۳۶: ریزساختار فولاد ۳۰۴ (a) کاملاً آستنیتی (b) آستنیت همراه با رشته‌های فریتی [۳].

در یکی از آنها ریزساختار شامل دانه‌های آستنیتی هم محور می‌باشد و در دیگری مقدار کمی فریت دمای بالا (فریت دلتا) در ساختار و در جهت نورد باقی مانده است. این فریت در نتیجه جدایش عناصر فریت‌زا (به‌خصوص کروم) در حین انجماد و فرآیندهای ترمومکانیکی بوجود آمده است. این فاز تنها در بخش کمی از کل حجم ساختار حضور دارد (کمتر از ۲ تا ۳٪). با اینکه این فریت در اکثر موارد مضر شناخته نمی‌شود اما در ریزساختارهای کاربردی موجب کاهش داکتیلیته و در فولادهای زنگ نزن آستنیتی موجب کاهش چقرمگی خواهد شد. این فاز همچنین می‌تواند یک مکان ترجیحی برای رسوبگذاری کاربیدهای $M_{23}C_6$ و فاز سیگما باشد که فاز سیگما در فولادهای زنگ نزن موجب تردی می‌شود. رفتار تبدیل فازی فولادهای زنگ نزن آستنیتی را می‌توان بوسیله دیاگرام شبه دوتایی Fe-Cr-Ni در مقدار ثابت ۷۰٪ آهن، تشریح کرد. این دیاگرام در شکل ۳۷ نشان شده داده است.



شکل ۳۷: مقطع شبه دوتایی سیستم Fe-Cr-Ni در میزان آهن ۷۰٪ [۳].



با توجه به دیاگرام انجماد اولیه فولادهای زنگ نزن آستنیتی می‌تواند به هر دو صورت فریتی یا آستنیتی انجام گیرد. حد میان این دو فاز اولیه انجماد در سیستم سه تایی در $18\text{Cr}-12\text{Ni}$ واقع است. در نسبت‌های بالاتری از کروم به نیکل، انجماد اولیه به صورت فریت دلتا و در نسبت‌های کمتر به صورت آستنیت انجام خواهد شد. در محدوده دمای انجماد، مثلث کوچکی دیده می‌شود که در آن فازهای آستنیت، فریت و مذاب توأماً وجود دارند. آلیاژهایی که به فرم آستنیتی جامد شده و در سمت چپ این مثلث قرار دارند در دمای اتاق هم آستنیتی خواهند بود. اما آلیاژهایی که بصورت فریتی جامد می‌شوند، می‌توانند در پایان انجماد یا کاملاً فریتی بوده و یا مخلوطی از فریت و آستنیت باشند. به خاطر شیب خطوط انحلال در فریت و آستنیت، تمام یا بخشی از فریت دلتا در شرایط سرد کردن تعادلی به آستنیت تبدیل خواهد شد که این مورد را می‌توان در آلیاژ $20\text{Cr}-10\text{Ni}$ مشاهده کرد که ساختار آن در حین سرد کردن تا 1000°C کاملاً آستنیتی شده است. در سرعت‌های بالای سرد کردن، همانند آنچه در جوشکاری اتفاق می‌افتد این تبدیل به طور کامل انجام نشده و مقداری فریت در ساختار باقی می‌ماند.

بسته به نوع عملیات حرارتی و ترکیب شیمیایی، انواع مختلفی از رسوبات می‌توانند در فولادهای زنگ نزن آستنیتی وجود داشته باشند. در جدول ۱۷ لیستی از این رسوبات، ساختار و استوکیومتری آنها آمده است. کاربیدها تقریباً در تمامی انواع این فولادها وجود دارد، زیرا کروم یک عامل کاربیدزای قوی است. افزودن عناصر کاربیدزای دیگری همچون Mo ، Nb و Ti نیز به تشکیل کاربیدها کمک می‌کند. در کل ماهیت تشکیل کاربیدها، شامل تأثیرات ترکیب شیمیایی و محدوده دمای تشکیل آنها بسیار پیچیده است.

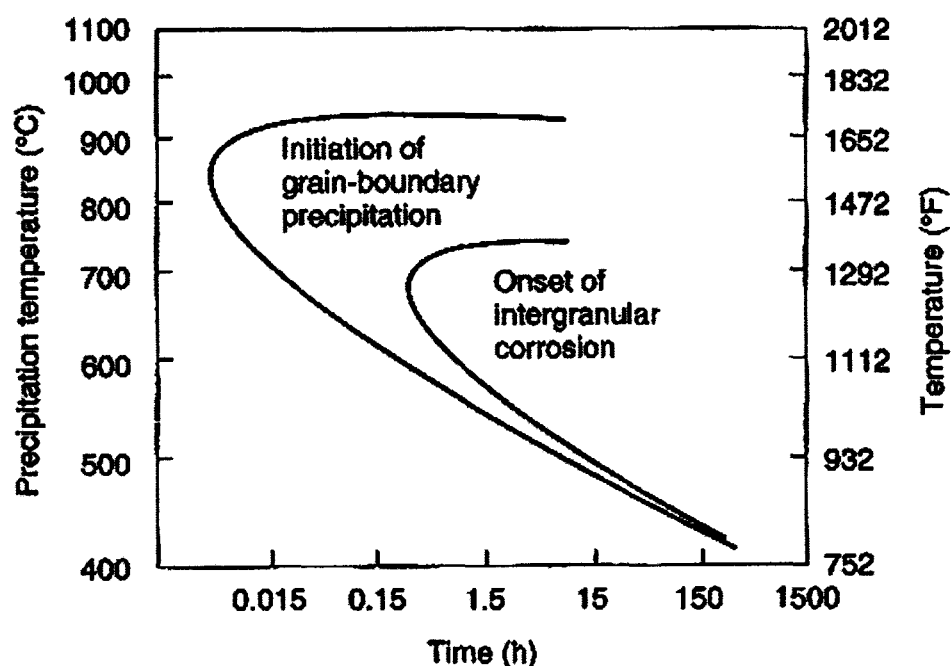
در مورد رسوبگذاری کاربیدهای M_{23}C_6 توجه و تحقیق بسیاری شده است که به دلیل نقش آنها در مقاومت به خوردگی است. همانطور که در شکل ۳۸ نشان داده شده است، این نوع کاربید به سرعت در دماهای بین 700°C تا 900°C در طول مرزدانه‌ها رسوب می‌کند. با گذشت زمان حضور این کاربیدهای مرزدانه‌ای می‌توان موجب خوردگی مرزدانه‌ای در بعضی محیط‌های خاص شود. این رسوبگذاری در آلیاژهایی که بوسیله کار سرد استحکام‌دهی شده‌اند سریعتر انجام می‌گیرد.

فازهای سیگما، چی، اتا، جی و لاه (جدول ۱۷) نیز در فولادهای زنگ نزن آستنیتی بخصوص آنهایی که افزودنی‌هایی مثل Mo ، Nb و Ti دارند، تشکیل می‌شود. این فازها پس از گذشت مدت زمان زیاد در دماهای بالا شکل گرفته و موجب تردی فولاد می‌شوند. به عنوان مثال در شکل ۳۹ تأثیر فاز سیگما بر چقرمگی ضربه ای آلیاژهای $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{Ni}$ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کمتر از ۵٪ فاز سیگما می‌تواند چقرمگی ضربه را تا ۵۰٪ کاهش دهد.

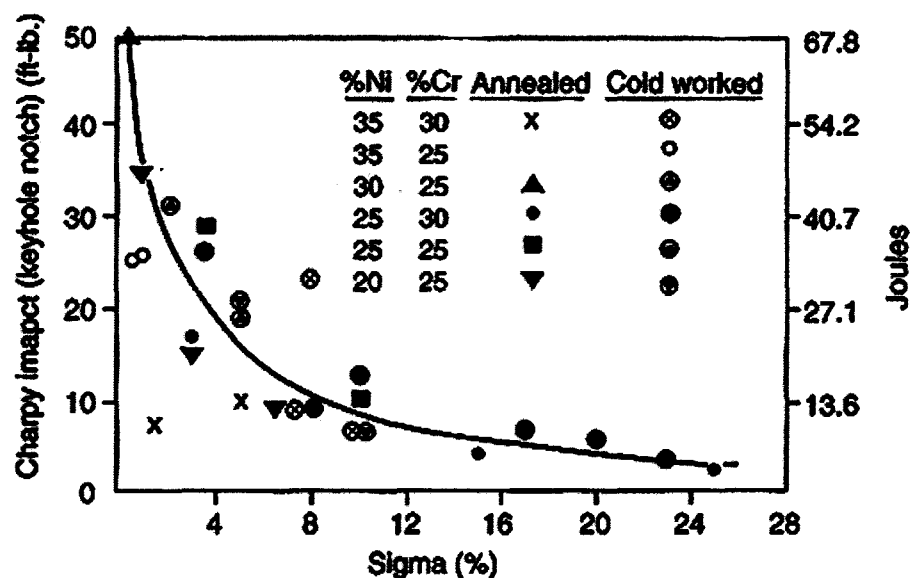


جدول ۱۷: رسوبات موجود در فولادهای زنگ نزن آستنیتی [۳].

Precipitate	Crystal Structure	Lattice Parameters (nm)	Stoichiometry
MC	FCC	$a = 0.424-0.447$	TiC, NbC
M_6C	Diamond cubic	$a = 1.062-1.128$	$(FeCr)_3Mo_3C$, Fe_3Nb_3C , Mo_3SiC
$M_{23}C_6$	FCC	$a = 1.057-1.068$	$(Cr,Fe)_{23}C_6$, $(Cr,Fe,Mo)_{23}C_6$
NbN	FCC	$a = 0.440$	NbN
Z phase	Tetragonal	$a = 0.307$, $c = 0.7391$	CrNbN
Sigma phase	Tetragonal	$a = 0.880$, $c = 0.454$	Fe-Ni-Cr-Mo
Laves phase (η)	Hexagonal	$a = 0.473$, $c = 0.772$	Fe_2Mo , Fe_2Nb
Chi phase (χ)	BCC	$a = 0.8807-0.8878$	$Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$
G phase	FCC	$a = 1.12$	$Ni_{16}Nb_6Si_7$, $Ni_{16}Ti_6Si_7$
R	Hexagonal	$a = 1.0903$, $c = 1.9342$	Mo-Co-Cr
	Rhombohedral	$a = 0.9011$ $\alpha = 74^\circ 27.5'$	Mo-Co-Cr
ϵ Nitride (Cr_2N)	Hexagonal	$a = 0.480$, $c = 0.447$	Cr_2N
Ni_3Ti	Hexagonal	$a = 0.9654$, $c = 1.5683$	Ni_3Ti
$Ni_3(Al,Ti)$	FCC	$a = 0.681$	Ni_3Al



شکل ۳۸: رسوب کاربیدهای $M_{23}C_6$ در فولاد زنگ نزن نوع ۳۰۴ با میزان کربن ۰.۰۵٪ [۳].



شکل ۳۹: اثر فاز سیگما بر استحکام ضربه‌ای در دمای اتاق آلیاژهای Fe-Cr-Ni [۳].

۷-۲-۱- خواص مکانیکی

در جدول ۱۸ حداقل خواص مکانیکی تعدادی از فولادهای زنگ نزن آستنیتی در دمای اتاق ارائه شده است. این خواص اغلب مربوط به شرایط آنیل شده می‌باشد. در کل فولادهای زنگ نزن آستنیتی را نمی‌توان با رسوبگذاری یا تبدیل فاز به طور قابل توجهی استحکام بخشی کرد. برخی آلیاژهای خاص که حاوی مقادیر بالاتری از نیکل و تیتانیوم باشند را می‌توان با رسوبگذاری فاز گاما پریم $Ni_3(Al, Ti)$ که یک عامل استحکام بخش رایج در سوپر آلیاژهای پایه نیکل می‌باشد، استحکام‌دهی کرد.

در برخی از فولادهای آستنیتی ممکن است مارتنزیت تشکیل گردد. اما این پدیده تنها تحت شرایط بسیار خاص رخ می‌دهد. مارتنزیت ممکن است در آلیاژهایی که شدیداً تحت عملیات کار سرد قرار گرفته‌اند و یا در زمانیکه مواد در دماهای زیر صفر سرد شوند تشکیل گردد.



جدول ۱۸: حداقل خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن آستنیتی کار شده در دمای اتاق [۳].

Alloy	Tensile Strength		Yield Strength		Elongation (%)	Reduction in Area (%)
	MPa	ksi	MPa	ksi		
302	515	75	205	30	40	50
304	515	75	205	30	40	50
304L	480	70	170	25	40	50
308	515	75	205	30	40	50
309	515	75	205	30	40	50
310	515	75	205	30	40	50
316	515	75	205	30	40	50
316L	480	70	170	25	40	50
317	515	75	205	30	40	50
321	515	75	205	30	40	50
330	480	70	205	30	30	—
347	515	75	205	30	40	50

Source: ASM Handbook, Vol. 6, p. 468.

۷-۳- متالورژی جوشکاری

ریزساختار دمای اتاق منطقه ذوب^۱ فولادهای زنگ نزن آستنیتی به رفتار انجماد و استحاله حالت جامد بعدی بستگی دارد. تمام فولادهای زنگ نزن به صورت فریت یا آستنیت به عنوان فاز اولیه جامد می‌گردند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی ممکن است، بسته به ترکیب شیمیایی خاص، به صورت فریت اولیه یا آستنیت اولیه جامد گردند. تغییرات کمی در ترکیب شیمیایی در یک سیستم آلیاژی مشخص ممکن است فاز اولیه انجماد را از فریت اولیه به آستنیت اولیه تغییر دهد. محدوده ترکیب شیمیایی بسیاری از فولادهای زنگ نزن آستنیتی به اندازه‌ای گسترده است که هر دو حالت اتفاق افتد. در ادامه انجماد و سرد شدن تا دمای اتاق استحاله فازی در حالت جامد رخ می‌دهد. این استحاله در آلیاژهایی که فاز اولیه آنها فریت دلتا است از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا بیشتر فریت به آستنیت استحاله پیدا می‌کند.

۱- Fusion Zone

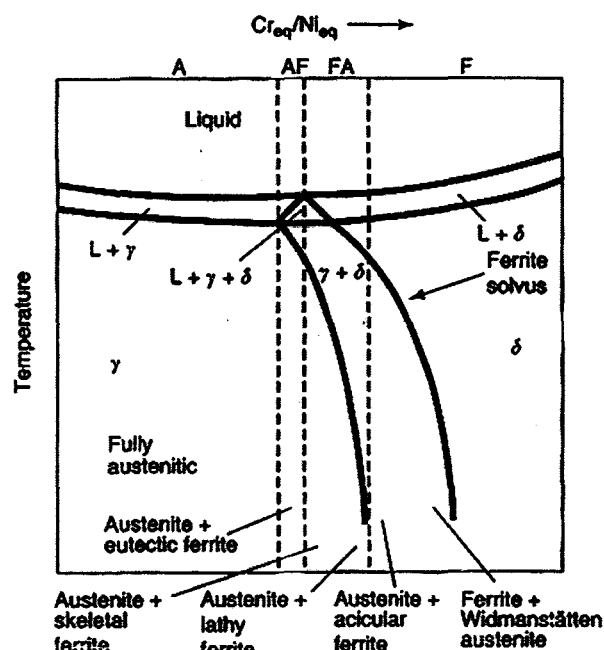


۷-۳-۱- تخمین ریزساختار منطقه ذوب

به طور کلی ۴ نوع انجماد و احتمال استحاله حالت جامد برای فلزات جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی وجود دارد. این واکنش‌ها در جدول ۱۹ لیست شده‌اند و مربوط به دیاگرام فازي Fe-Cr-Ni در شکل ۴۰ می‌شود. حالت‌های انجماد A و AF همراه با انجماد آستنیت اولیه می‌باشد. به عبارت دیگر آستنیت اولین فاز است که در حین انجماد تشکیل می‌گردد. انواع انجماد FA و F دارای فاز اولیه فریت دلتا می‌باشند.

جدول ۱۹: انواع انجماد، واکنش‌ها و ریزساختارهای نهایی [۳].

Solidification Type	Reaction	Microstructure
A	$L \rightarrow L + A \rightarrow A$	Fully austenitic, well-defined solidification structure
AF	$L \rightarrow L + A \rightarrow L + A + (A + F)_{eut} \rightarrow A + F_{eut}$	Ferrite at cell and dendrite boundaries
FA	$L \rightarrow L + F \rightarrow L + F + (F + A)_{peritect} \rightarrow F + A$	Skeletal and/or lathy ferrite resulting from ferrite-to-austenite transformation
F	$L \rightarrow L + F \rightarrow F \rightarrow F + A$	Acicular ferrite or ferrite matrix with grain boundary austenite and Widmanstätten side plates

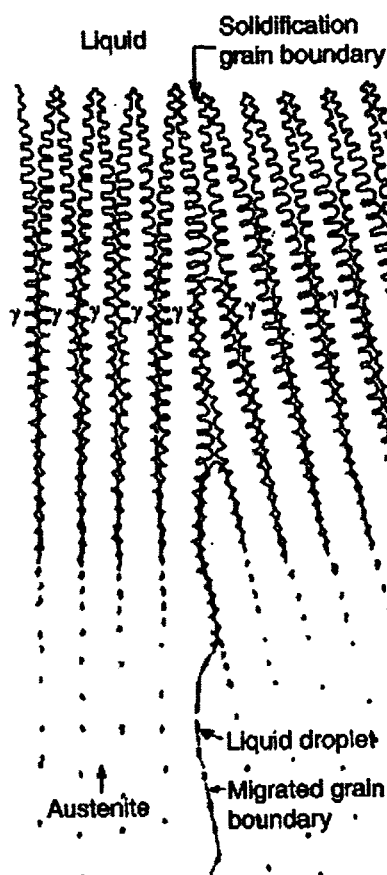


شکل ۴۰: نسبت نوع انجماد به دیاگرام فازي شبه پایدار [۳].

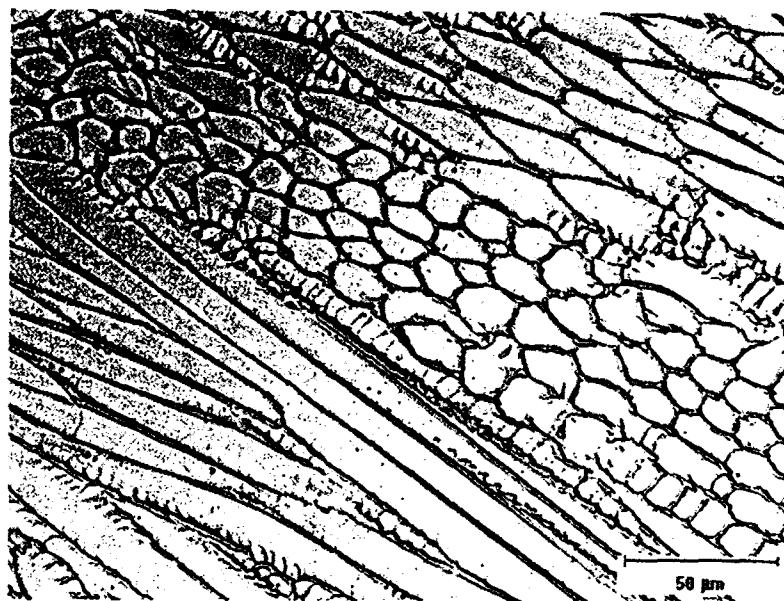


۷-۳-۱-۱- نوع A: انجماد تمام آستنیتی

هنگامیکه انجماد با ایجاد آستنیت اولیه شروع می‌شود، احتمال تشکیل دو ریزساختار در فلز جوش وجود دارد. اگر پس از کامل شدن انجماد، ریزساختار کاملاً آستنیتی باشد، در حین سرد شدن تا درجه حرارت اتاق ساختار آستنیتی باقیمانده و دارای ساختار انجمادی مشخصی در هنگام متالوگرافی می‌باشد. این مورد به انجماد نوع A معروف بوده و بصورت شماتیک در شکل ۴۱ نشان داده شده است. یک نمونه از ساختار متالوگرافی انجماد نوع A در شکل ۴۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل ریزساختار انجمادی (سلولها و دندریتها) بصورت کاملاً آشکاری در ریزساختار مشاهده می‌شود. این حالت مشخصه انجماد به صورت آستنیت اولیه است که به دلیل جدایش عناصر آلیاژی و عناصر و ناخالصی در حین انجماد می‌باشد. هنگامیکه آلیاژیایی مثل ۳۰۴ و ۳۱۶ مطابق نوع A انجماد پیدا می‌کند، عناصر Cr و Mo در مرزهای دندریت و سلولها تجمع می‌یابند.



شکل ۴۱: انجماد نوع A، تمام آستنیتی [۳].



شکل ۴۲: ریزساختار منطقه ذوب در نتیجه انجماد تمام آستنیتی - نوع A [۳].

۷-۳-۱-۲- انجماد نوع AF

در صورتیکه در انتهای فرآیند انجمادی که با تشکیل آستنیت اولیه شروع می‌شود، مقداری فریت در اثر واکنش یوتکتیک وجود داشته باشد، انجماد از نوع AF می‌باشد. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که میزان کافی از عناصر پایدار کننده فریت (Cr و Mo به عنوان عناصر اصلی)، در هنگام انجماد در مرزهای دانه‌های انجماد قرار گیرند تا تشکیل فریت دلتا به عنوان محصول انجماد نهایی تشویق گردد. به نظر می‌رسد این اتفاق در اثر یک واکنش یوتکتیک است و به وسیله منطقه مثلی شکل سه فازی دیاگرام فازی در شکل‌های ۳۷ و ۴۰ بیان می‌شود. فریت دلتا که در امتداد مرزها تشکیل می‌گردد، نسبتاً پایدار بوده و در برابر استحاله به آستنیت در هنگام سرد شدن جوش مقاومت می‌کند، زیرا از عناصر پایدار کننده غنی می‌باشد. شماتیکی از انجماد AF در شکل ۴۳ نشان داده شده است. مثالی از یک ریزساختار که فریت دلتا در امتداد مرزهای زیردانه انجمادی قرار دارد در شکل ۴۴ مشاهده می‌شود.

۷-۳-۱-۳- انجماد نوع FA

زمانیکه انجماد با تشکیل فریت دلتای اولیه آغاز می‌گردد، دو احتمال وجود دارد. اگر مقداری آستنیت در انتهای انجماد تشکیل گردد، انجماد نوع FA را خواهیم داشت. این آستنیت از طریق

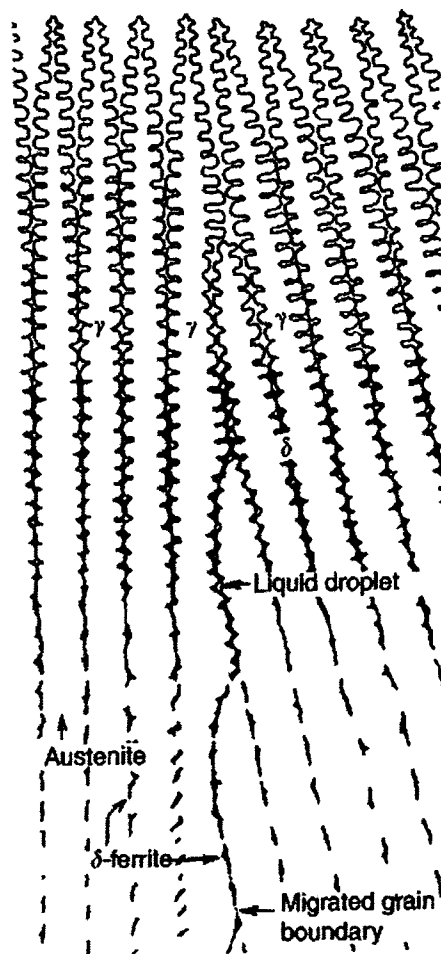


واکنش پریکتیک-یوتکتیک تشکیل می‌گردد و در مرزهای انجمادی فریت قرار می‌گیرد. براساس تحقیقات مختلف، ترتیب انجماد و استحاله‌ای که مرتبط با این نوع انجماد می‌باشد به شرح زیر است:

۱- در انتهای انجمادی که شروع آن با فریت اولیه بوده است، واکنش پریکتیک-یوتکتیک موجب تشکیل آستنیت در امتداد مرزهای سلول و دندریت فریت^۱ خواهد شد. این واکنش داخل و در امتداد منطقه سه فازی مثلثی در شکل ۳۷ و ۴۰ رخ می‌دهد. این واکنش پریکتیک-یوتکتیک نامیده می‌شود، زیرا وابسته به ترکیب شیمیایی بوده و در نتیجه انتقال از یک واکنش پریکتیک در سیستم Fe-Ni به یک واکنش یوتکتیک در سیستم Fe-Cr-Ni (شکل ۵) حاصل می‌شود.

۲- زمانیکه انجماد کامل می‌شود، ریزساختار متشکل از دندریتهای فریت اولیه و یک لایه بین دندریتی آستنیت می‌باشد. میزان آستنیت موجود به شرایط انجماد و نسبت $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$ بستگی دارد. با افزایش این نسبت، میزان آستنیت کاهش پیدا می‌کند. تا جایی که در پایان انجماد ساختار کاملاً فریتی است. در این نقطه انجماد از نوع FA به F تغییر می‌کند.

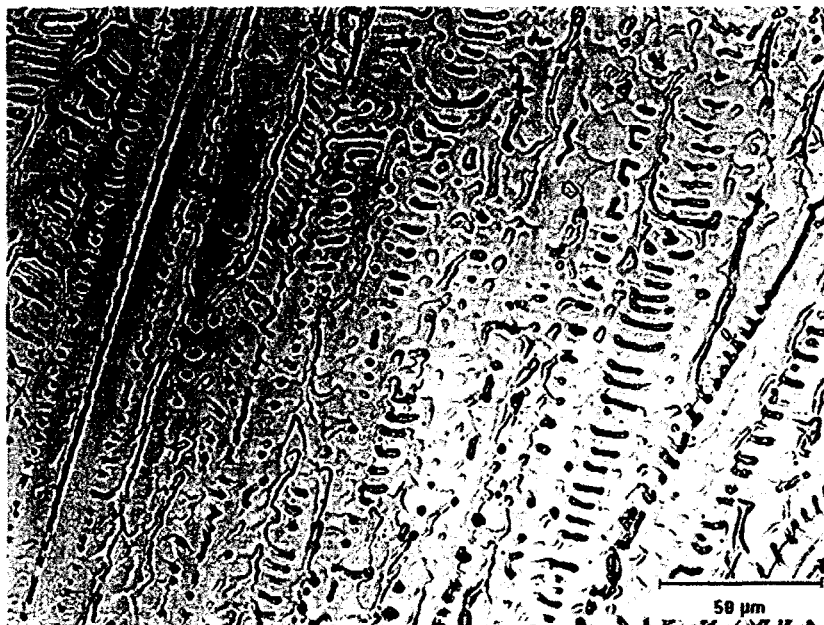
۱- Cell and Dendrite Boundry



شکل ۴۳: ریزساختار منطقه ذوب در نتیجه انجماد نوع AF [۳].

۳- زمانی که فلز جوش از منطقه دوفازی فریت دلتا + آستنیت سرد می شود، فریت ناپایدار می شود و آستنیت از طریق واکنش که توسط نفوذ کنترل^۱ می شود فریت را مصرف می کند. نظرات مختلفی در ارتباط با طبیعت این واکنش مطرح شده است، اما عموماً توافق به آن است که سرعت و طبیعت استحاله نفوذ در سطح مشترک آستنیت و فریت کنترل می شود.

۱-Diffusion Controlled Reaction



شکل ۴۴: ریزساختار منطقه ذوب در نتیجه انجماد نوع AF[۳].

۴- زمانیکه سرعت سرد شدن جوش، متوسط است و/یا نسبت $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$ کوچک است، ولی داخل محدوده FA (شکل ۴۰) قرار دارد، فریت اسکلتی^۱ تشکیل می‌شود. تغییر شکل فریت به آستنیت تا زمانی انجام می‌گیرد که فریت به طور کامل از عناصر پایدارکننده فریت (کروم و مولیبدن) غنی شده و از عناصر پایدار کننده آستنیت (نیکل، کربن و نیتروژن) تهی گردد. به این ترتیب فریت در دماهای پایین‌تر که نفوذ نیز محدودتر است پایدار می‌ماند. ریزساختار فریت اسکلتی در شکل ۴۵a به طور شماتیک و میکروگراف آن در شکل ۴۶a نشان داده شده است.

۵- زمانیکه سرعت سرد شدن بالا باشد و/یا نسبت $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$ در محدوده FA در شکل ۴۰ افزایش یابد، فریت پر شکل^۲ تشکیل می‌گردد. این نوع فریت به طور شماتیک در شکل ۴۵ و میکروگراف آن در شکل ۴۶ نشان داده شده است.

۶- زمانیکه سرعت‌های انجماد و سرد شدن بسیار بالاست، نظیر جوشکاری لیزر و الکترون بیم استحاله کامل فریت به آستنیت در اثر یک استحاله بدون نفوذ ممکن است انجام شود و

۱- Skeletal

۲- Lathy

بدین ترتیب تغییر در حالت انجماد اولیه از فریت به آستنیت ممکن است در سرعت‌های بالای انجماد نیز رخ دهد.



(a)

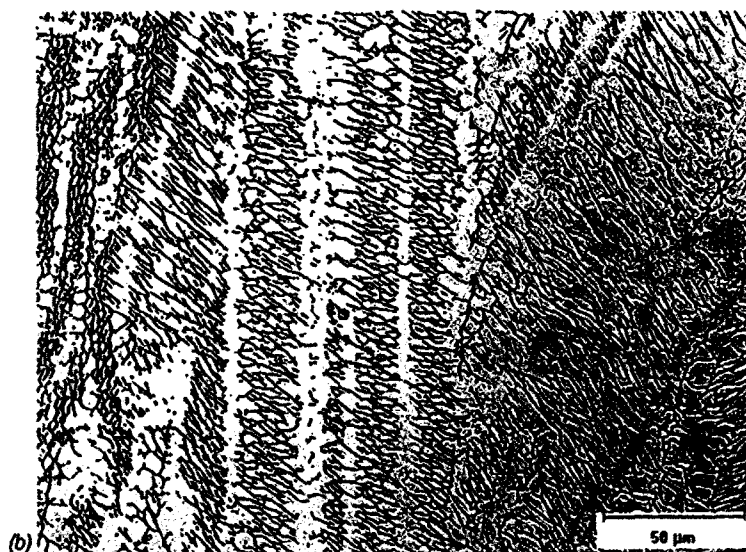
(b)

شکل ۴۵: انجماد نوع FA (a) فریت اسکلتی (b) فریت پر شکل [۳].

۷-۳-۱-۴-انجماد نوع F

در صورتی که انجماد به طور کامل به صورت فریت رخ دهد، انجماد نوع F نامیده می شود. در این حالت با توجه به شکل ۴۰، در پایان انجماد، ریزساختار کاملاً فریتی خواهد بود. زمانی که فلز جوش در حال سرد شدن زیر خط انحلال در فریت می باشد، آستنیت داخل ریزساختار و معمولاً در ابتدا در مرزهای دانه فریت تشکیل می شود. میزان استحاله فریت به آستنیت به نسبت $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$ و سرعت سرد شدن بستگی دارد. در مقادیر $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$ کم و در داخل محدوده F، استحاله در دماهای بالاتر

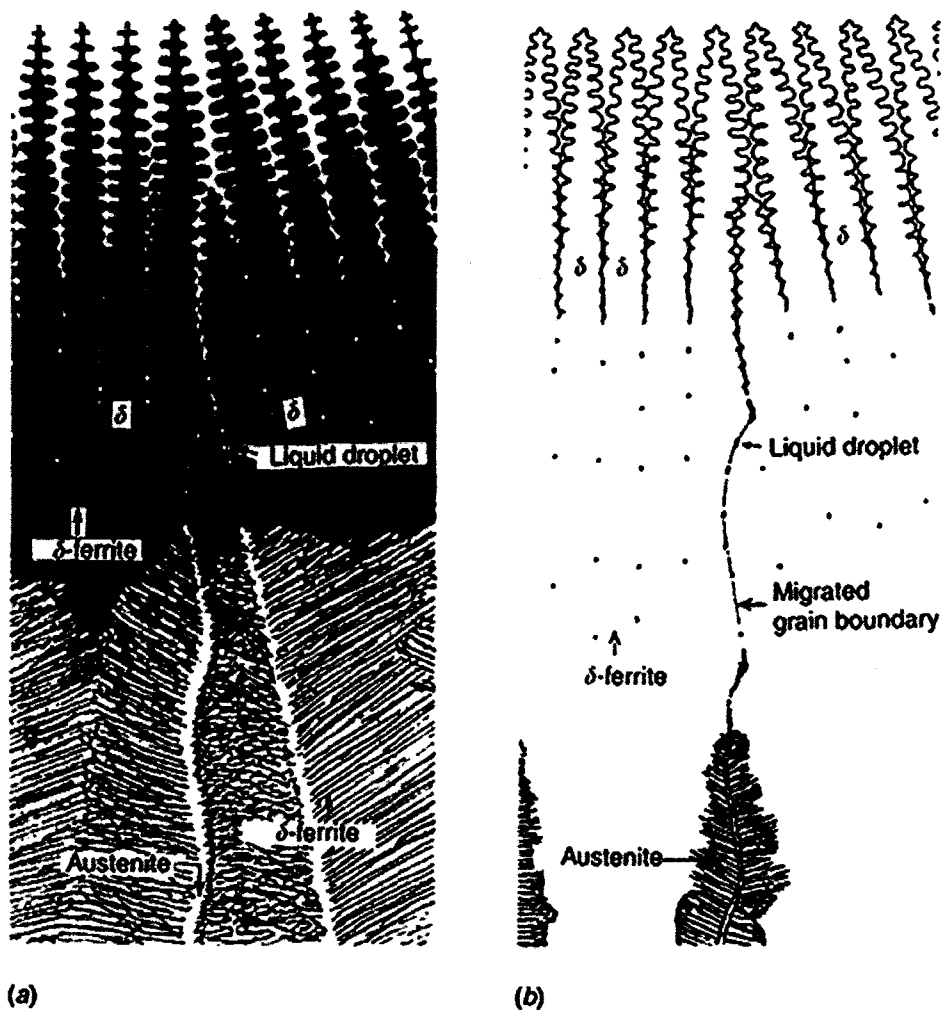
و در سرعت‌های سرد شدن کم تا متوسط آغاز می شود و بیشتر فریت حذف می گردد. در سرعت‌های سرد شدن بالا از نفوذ جلوگیری شده و آستنیت میزان زیادی از فریت را مصرف نخواهد کرد. به طور مشابه اگر نسبت $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$ در داخل محدوده افزایش یابد، استحاله در دماهای پایین تری رخ خواهد داد.



شکل ۴۶: ریزساختار منطقه ذوب در نتیجه انجماد نوع FA
(a) مورفولوژی فریت اسکلتی (b) مورفولوژی فریت پر شکل [۳].



در هر دو حالت فلز جوشی با مقدار بالای فریت حاصل خواهد شد. ریزساختاری که در نتیجه انجماد نوع F در فولادهای زنگ نزن آستنیتی تشکیل می گردد و نیز تابعی از ترکیب شیمیایی و سرعت سرد شدن است. در نسبت کم $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$ ، داخل محدوده F ساختار فریت سوزنی داخل دانه های فریت تشکیل می گردد. این ساختار به طور شماتیک در شکل ۴۷ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود شبکه های آستنیت در مرزهای دانه فریت اولیه حضور دارند. در مقادیر بالاتر $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$ (در سرعت سرد شدن ثابت) ریزساختار متشکل از یک زمینه فریتی همراه با آستنیت مرزدانه ای و صفحات آستنیت ویدمن اشتاتن که در آستنیت مرزدانه ای یا داخل دانه های فریت جوانه زده اند، می باشد. این ریزساختار در شکل ۴۷ به طور شماتیک و میکروگراف آن در شکل ۴۸ نشان داده شده است. زمانی که نسبت $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$ افزایش می یابد، میزان فریت تعادلی افزایش پیدا می کند، بنابر این نیروی محرکه جهت استحاله فریت- آستنیت و دمایی که در آن استحاله آغاز می شود کاهش می یابد.



(a)

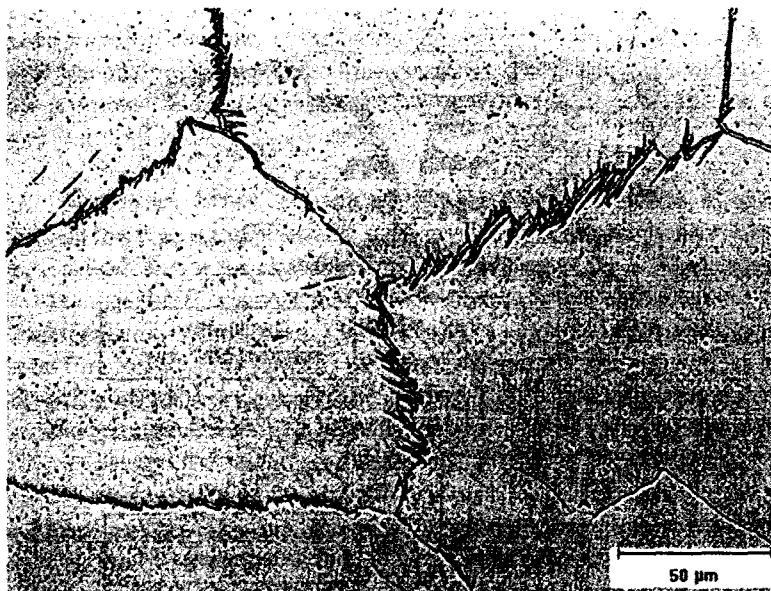
(b)

(b) فریت و آستنیت ویدمن اشتاتن [۳].

(a) فریت سوزنی

شکل ۴۷: شماتیک انجماد نوع F

در عمل، انجماد نوع F در فلز جوش فولادهای زنگ نزن آستنیتی بسیار کم اتفاق می افتد. اغلب فلزات پرکننده طوری فرموله شده اند که انجماد در حالت FA رخ می دهد و میزان فریت جوش در حدود ۵ تا ۲۰ FN می باشد. تنها فلزات پرکننده پرایاژ نظیر ۳۰۹LMO و ۳۰Cr-۱۰Ni (۳۱۲) ریزساختاری با مقدار بیشتر فریت ایجاد می کند. انجماد نوع F (مانند آنچه که در شکل ۴۸ مشاهده می شود) اغلب مشخصه فولادهای زنگ نزن دو فازی می باشد.



شکل ۴۸: ریزساختار منطقه ذوب در نتیجه انجماد نوع F: آستنیت ویدمن اشتاتن از آستنیت موجود در مرزهای دانه فریت جوانه می زند. تشکیل این ریزساختار غیر معمول است [۳].

۷-۳-۲- منطقه متأثر از حرارت (HAZ)

طبیعت منطقه متأثر از حرارت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی به ترکیب شیمیایی و ریزساختار فلز پایه بستگی دارد. واکنشهای متالورژیکی که در ادامه بررسی خواهد شد ممکن است در HAZ آلیاژهای آستنیتی رخ دهد.

۷-۳-۲-۱- رشد دانه

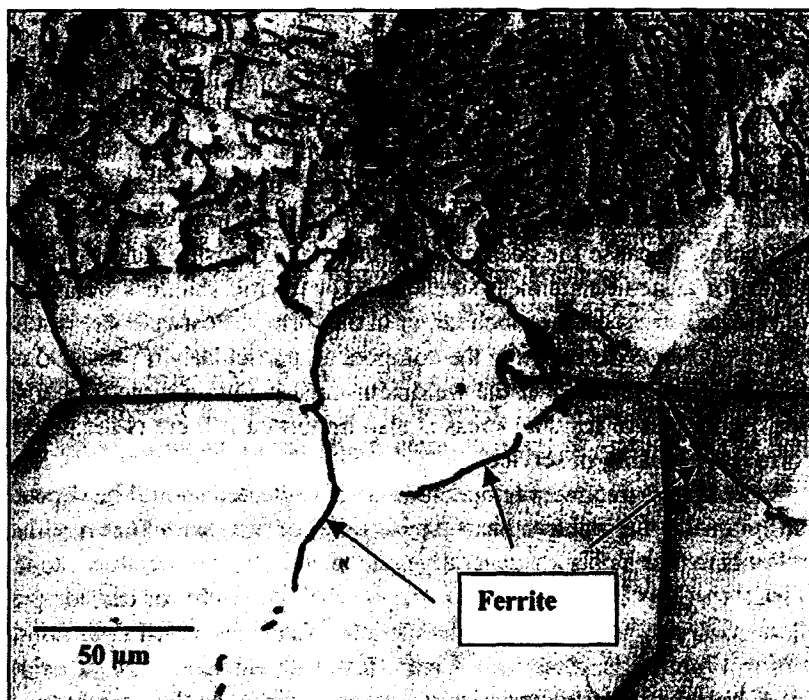
اغلب فولادهای زنگ نزن در شرایط آنیل محلولی^۱ یا نورد گرم شده جوشکاری می شوند. بنابراین مسأله رشد دانه ها ناچیز می باشد مگر اینکه حرارت ورودی فوق العاده زیاد باشد. در بعضی موارد ممکن است درشت شدن دانه ها مشاهده شود اما در اغلب موارد ناچیز بوده و مشکل را نمی باشد. در فلزات پایه ای که بوسیله کار سرد استحکام دهی شده اند، تبلور مجدد و رشد دانه می تواند باعث نرم شدن منطقه HAZ شود. در این موارد، منطقه HAZ کاملاً مشخص بوده و اندازه دانه در مقایسه با فلز پایه بسیار بزرگتر می باشد.

۱- Solution-Annealed



۷-۳-۲-۲- تشکیل فریت

همانطور که در شکل‌های ۳۷ و ۴۰ نشان داده شده است، در آلیاژهایی که ترکیب شیمیایی آنها در طرف راست محدوده انجماد آستنیتی کامل (یا تمام آستنیتی) می‌باشد، هنگامیکه تا دماهایی درست زیر درجه حرارت سالدوس گرم می‌شوند، فریت تشکیل خواهد شد. نسبت بالاتر Cr_{eq}/Ni_{eq} در این آلیاژها باعث تشکیل بیشتر فریت خواهد شد. هنگامیکه فریت تشکیل می‌شود، اغلب همانند شکل ۴۹ در امتداد مرزدانه قرار می‌گیرد. تشکیل فریت در امتداد مرزدانه‌های منطقه HAZ سبب جلوگیری از رشد دانه شده و همچنین حساسیت منطقه HAZ را نسبت به ترک Liquation به حداقل می‌رساند. میزان فریت تشکیل شده معمولاً کم است زیرا استحاله آستنیت به فریت کند بوده و از طرفی سیکل حرارتی منطقه HAZ بسرعت انجام می‌شود. همچنین ممکن است مقداری از فریت‌های تشکیل شده در درجه حرارتهای بالا، در هنگام سرد شدن مجدداً به آستنیت استحاله یابند.



شکل ۴۹: فریت در امتداد مرزهای دانه آستنیت در HAZ فولاد زنگ نزن ۳۰۴L [۳].

۷-۳-۲-۳- رسوب گذاری

هنگامیکه منطقه HAZ تا درجه حرارتهای نزدیک دمای سالییدوس آلیاژ گرم می‌شود، اغلب رسوبات موجود در فلز پایه بصورت محلول در می‌آیند. این پدیده سبب فوق اشباع شدن زمینه آستنیتی در حین سرد شدن و در نتیجه تشکیل رسوبات مختلف می‌شود. کاربیدها (مانند $M_{23}C_6$) و نیتريد ها مانند (Cr_2N) متداولترین رسوباتی است که در منطقه HAZ فولادهای زنگ نزن آستنیتی ایجاد می‌شود. این رسوبات معمولاً در امتداد مرزدانه‌ها یا فصل مشترک فریت - آستنیت (در صورت وجود فریت) ایجاد می‌شوند. اندازه، توزیع و مورفولوژی رسوبات به ترکیب شیمیایی آلیاژ و سیکل حرارتی منطقه HAZ بستگی دارد. همانطور که در قسمت ۷-۵ اشاره خواهد شد رسوب گذاری زیاد کاربیدهای غنی از کروم موجب کاهش مقاومت به خوردگی می‌گردد.

۷-۳-۳- دمای پیشگرم و بین پاسی و عملیات حرارتی بعد از جوش

به طور کلی، کنترل دمای پیش گرم و بین پاسی برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی در مقایسه با فولادهای مارتنزیتی ضروری نیست. دمای پیشگرم و بین پاسی بالا موجب کاهش سرعت سرد



شدن می‌شود، اما تأثیر بسیار کمی بر استحاله فریت به آستنیت دارد زیرا این استحاله در دماهای بسیار بالا رخ می‌دهد، جاییکه کنترل دمای پیشگرم و بین پاسی تأثیر کمی بر سرعت سرد شدن دارد. در مواردیکه، ایجاد رسوبات کاربیدی موجب حساس شدن فلز می‌گردند، دمای بین پاسی از یک میزان حداکثر باید کمتر باشد، سرعت سرد شدن آرام در محدوده رسوب گذاری کاربیدها ممکن است خطرناک باشد.

در اغلب قطعات جوشکاری با مقاطع ضخیم، عملیات حرارتی پس از جوشکاری به منظور حذف تنش‌های باقیمانده ضروری است. فولاد های زنگ نزن آستنیتی نسبت به فولاد های زنگ نزن فریتی دارای ضریب انبساط (و انقباض) بیشتری می باشند لذا تنش باقیمانده در این فولاد ها نیز بیشتر خواهد بود. بدین ترتیب عملیات حرارتی تنش زدایی بعد از جوشکاری ممکن است جهت کاهش اعوجاج در قطعه ضروری باشد. بخصوص اگر ماشینکاری پس از جوشکاری لازم باشد و یا پایداری ابعادی قطعات در حین سرویس مورد توجه باشد. تنش‌های باقیمانده در ایجاد ترک خوردگی تنشی (SCC) در حین سرویس نقش بسیار مهم دارد.

دمای عملیات حرارتی پس از جوشکاری بستگی به هدف مورد نیاز از به کارگیری این عملیات (تنش زدایی یا اصلاح ریزساختار) دارد. عملیات حرارتی تنش زدایی معمولاً در محدوده دمایی ۵۵۰ تا ۶۵۰°C انجام می‌شود. این دما کمتر از دماغه منحنی تشکیل رسوبات (شکل ۳۸) و نیز دمای تشکیل ترکیبات ترد (جدول ۱۷) می‌باشد. با توجه به شکل ۳۸ توجه به این نکته ضروریست که در مورد قطعات با ضخامت زیاد، طول عملیات تنش زدایی ممکن است به چند ساعت برسد که باعث حساس شدن فولاد به تشکیل رسوب یا ترکیبات ترد شود. در این موارد، استفاده از فلز پایه و فلز پرکننده با کربن کم یا رده‌های پایدار شده آنها توصیه می‌گردد.

در بعضی موارد، به منظور کاهش بیشتر تنش‌های باقیمانده یا اصلاح ریزساختار جوش باید درجه حرارت و زمان بیشتری برای عملیات حرارتی پس از جوشکاری در نظر گرفته شود. در این حالت دقت بسیار زیادی لازم است زیرا در فاصله حرارتی ۶۵۰ تا ۹۵۰°C، کاربیدهای $M_{23}C_6$ و فاز سیگما با سرعت تشکیل می‌شوند. تشکیل کاربید می‌تواند باعث حساس شدن فلز^۱ به رسوب کاربیدی و ایجاد فاز سیگما می‌تواند سبب تردی و کاهش چقرمگی شود (شکل ۳۹). در این شرایط چنانچه فلز جوش کاملاً آستنیتی و فلز پرکننده کم کربن باشد، می‌توان عملیات حرارتی پس از جوشکاری را در این محدوده دمایی انجام داد.

۱-Sensitization



عملیات حرارتی در محدوده ۹۵۰ تا ۱۱۰۰°C باعث حذف کامل تنش‌های پسماند و اصلاح ریزساختار فلز جوش، بدون تشکیل کاربیدها یا فاز سیگما می‌شود. گرم کردن بیشتر از دمای ۹۵۰°C و سرد کردن سریع موجب حذف کاربیدها در ریزساختار اصلی می‌گردد.

گرم کردن تا دمای حدود ۱۱۰۰°C بسته به زمان نگهداری، ترکیب شیمیایی و مقدار فریت در فلز جوش به کار برده شده موجب حل شدن مقداری از فریت یا تمام آن می‌شود. در صورتیکه از این عملیات حرارتی استفاده شود، بایستی سرد شدن بسرعت در آب انجام شود زیرا در صورت سرد شدن آرام، امکان رسوب کاربیدها وجود دارد.

۷-۳-۱- تردی دمای میانی^۱

فلز پایه و فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی بدلیل تشکیل فاز سیگما مستعد به تردی می‌باشند. فاز غنی از کروم (FeCr) سخت و ترد بوده و در صورتی که کسر حجمی آن زیاد باشد سبب کاهش چقرمگی و داکتیلیته می‌شود (شکل ۳۹). در ریزساختاری که کاملاً آستنیتی باشد، رسوب فاز سیگما و معمولاً نیاز به زمانهای بسیار طولانی (صد تا هزار ساعت) در دمای بالا دارد که می‌تواند در حین سرویس و یا عملیات حرارتی پس از جوشکاری ایجاد شود. محدوده دمایی تشکیل این فاز ۶۰۰ تا ۹۰۰°C می‌باشد که در فلز جوش فریتی-آستنیتی در حدود دمای ۷۵۰°C با سرعت بسیار بیشتری تشکیل می‌شود. افزودن عناصری مثل Mo, Nb, Si, W, V, Ti و Zr همراه با کروم باعث تسهیل در تشکیل فاز سیگما می‌شود، در حالیکه کربن و نیتروژن از رشد آن جلوگیری می‌کنند. حضور فریت در ریزساختار که با توازن عناصر فریت و آستنیت کنترل می‌شود، موجب تشدید تشکیل فاز سیگما می‌گردد.

با توجه به آنکه مقدار کروم موجود در فاز فریت نسبت به آستنیت بیشتر است، وجود فریت در فلز جوش موجب تشدید تشکیل فاز سیگما شده و به همین دلیل فلز جوش دارای فریت باقیمانده به تردی مستعدتر است.

استفاده از فلزات پرکننده جهت ایجاد فلز جوش آستنیتی یا فلز جوش با فریت بسیار کم در کاهش تردی فاز سیگما بسیار مؤثر است. همچنین بایستی دقت کرد که با تمهیداتی که جهت جلوگیری از تردی فاز سیگما در نظر گرفته می‌شود، ترک انجمادی رخ ندهد.

۱- Intermediate- Temperature Enbri Helment

مطالعات انجام شده توسط برخی از محققین نشان می‌دهد که پیرسازی فلز جوش ۳۰۸ در محدوده ۶۵۰ تا ۷۵۰°C در ابتدا منجر به حل شدن فاز فریت شده و سپس منجر به تشکیل مناطق غنی از کروم و کاربید $M_{23}C_6$ و در نهایت جوانه‌زنی فاز سیگما شده است. در جریان جوانه‌زنی فاز سیگما به سرعت رشد می‌کند. کارسرد نیز باعث تشدید جوانه‌زنی فاز سیگما می‌شود. در جوش‌های از نوع فولاد ۳۰۸ که دارای فریت می‌باشند، فاز سیگما می‌تواند در کمتر از ۱۰۰ ساعت در دمای ۶۵۰ تا ۷۵۰°C تشکیل شود. با توجه به اینکه وجود فاز سیگما بصورت پیوسته و ممتد در ریزساختار تأثیر محسوسی در کاهش چقرمگی داکتیلیته دارد، ایجاد فلز جوش با عدد فریت FN در محدوده ۳ تا ۸ به منظور اجتناب از تردی کافی است. فلز جوش با $FN=8$ حدوداً به ۴٪ فاز سیگما استحاله خواهد یافت. این مقدار باعث تردی فلز نمی‌شود، هر چند که در چقرمگی مقداری کاهش ایجاد می‌کند (شکل ۳۹).

۷-۴- جوش پذیری

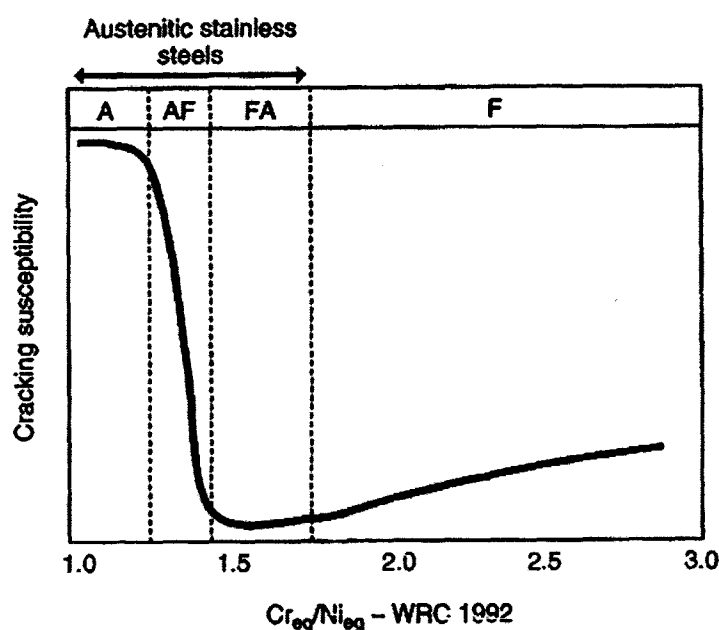
اگرچه آلیاژهای آستنیتی اغلب به عنوان آلیاژهایی با قابلیت جوش پذیری مناسب مطرح می‌شوند، اما اگر احتیاط لازم در نظر گرفته نشود، این آلیاژها در معرض مشکلات جوش‌پذیری متعددی قرار می‌گیرند. ترک انجمادی و ترک ذوب موضعی ممکن است بسته به ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز پرکننده و میزان عناصر ناخالصی (به‌خصوص S, P) در این فولادها رخ دهد. امکان بروز ترکهای حالت جامد شامل ترک باز گرمی و ترکهای ناشی از آلودگی مس نیز در این آلیاژها وجود دارد. با وجود مقاومت به خوردگی خوب آلیاژهای زنگ نزن آستنیتی، این آلیاژها ممکن است در معرض انواع خوردگی موضعی در مرزدهانه‌های منطقه متأثر از حرارت و یا در مناطق تمرکز تنش داخل و اطراف جوش قرار گیرند. از آنجائیکه اغلب فلزهای جوش حاوی فریت هستند، تردی درجه حرارت میانی بدلیل تشکیل کاربید و فاز سیگما محتمل می‌باشد. در آلیاژهای فریتی، واکنش رسوب فاز سیگما زمان بر است و تردی سیگما معمولاً مربوط به مشکلات حین سرویس می‌باشد. اگرچه همانطور که قبلاً بحث شد، این امر ممکن است در حین عملیات حرارتی بعد از جوشکاری سازه‌های بزرگ یا مقاطع ضخیم زمانیکه نرخ سرد شدن از درجه حرارت عملیات حرارتی بعد از جوشکاری بسیار کند باشد، رخ دهد.



۷-۴-۱- ترک انجمادی

ترک انجمادی جوش می‌تواند به عنوان یک مشکل مهم در فولادهای زنگ نزن آستنیتی مطرح باشد. حساسیت به ترک در مرحله اول تابعی از ترکیب شیمیایی می‌باشد. فلزهای جوشی که در حالت A منجمد می‌شوند و کاملاً آستنیتی هستند، بیشترین حساسیت را دارا می‌باشند. آلیاژهایی که در حالت FA منجمد می‌شوند به ترک انجمادی بسیار مقاوم می‌باشند. درصدهای بالای ناخالصی بخصوص گوگرد و فسفر موجب افزایش حساسیت در آلیاژهایی که به نوع A و AF منجمد می‌شوند، می‌گردد.

شرایط مهار جوش و همچنین شکل جوش بخصوص در مواردیکه انجماد به صورت آستنیت اولیه (A یا AF) صورت می‌پذیرد، حساسیت به بروز ترک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شرایط جوشکاری که مهار بسیار زیاد روی فلز جوش جامد شده ایجاد می‌کند، حساسیت به ترک را افزایش می‌دهد. میزان حرارت ورودی بالا که منجر به ایجاد مهره جوش بزرگ می‌شود و یا سرعت حرکت زیاد که حوضچه جوشی به شکل قطره اشک ایجاد می‌کند، عوامل دیگری هستند که در ارتباط با بروز ترک مشکل را می‌باشند. شکل مهره مقعر و چاله‌های پرنشده انتهایی جوش نیز ترک خوردگی انجمادی را تشویق می‌کنند. ترک انجمادی جوش یک تابع قوی از ترکیب شیمیایی می‌باشد، همچنانکه به صورت شماتیک حساسیت به ترک برحسب Cr_{eq}/Ni_{eq} در شکل ۵۰ نشان داده شده است.



شکل ۵۰: احتمال ترک انجمادی جوش براساس ترکیب شیمیایی [۳].



همانطور که در شکل مشاهده می‌شود ترکیبهای شیمیایی که منجر به ایجاد آستنیت اولیه (A و AF) می‌شوند بیشتر به ترک خوردگی حساس می‌باشند در حالیکه در انجماد به صورت FA بیشترین مقاومت در برابر خوردگی انجمادی وجود دارد. نوع F نسبت به نوع FA به ترک خوردگی حساستر است، اما نسبت به نوع A و AF بهتر است. بنابراین ترکیب شیمیایی می‌تواند به عنوان یک عامل مؤثر کنترل کننده ترک انجمادی باشد.

انجماد به صورت فریت اولیه در نوع FA مقاومت بالاتری به ترک خوردگی انجمادی جوش نسبت به آلیاژهایی که به صورت آستنیتی جامد می‌شوند، دارا می‌باشد. دلیل این مقاومت بالاتر حضور مخلوط دو فاز فریت و آستنیت در طول مرزها دانه‌های انجمادی در مرحله نهایی انجماد می‌باشد که در مقابل ترشوندگی توسط لایه‌های مذاب مقاومت کرده و یک مرز ناصاف و نامنظم در مسیری که ترک باید اشاعه یابد، ایجاد می‌کند. میزان فریت فلز جوش در درجه حرارت اتاق می‌تواند به عنوان یک تقریب برای رفتار انجمادی مورد استفاده قرار گیرد. اگر FN برابر صفر باشد، رفتار انجمادی آلیاژ از نوع A است. برای FN بین ۰ و ۳، رفتار انجمادی از نوع AF است. در مقادیر FN بالاتر از ۳ و کمتر از ۲۰، رفتار انجمادی مشابه انجماد نوع FA می‌باشد. این محدوده مقاومت بسیار بالایی در برابر ترک خوردگی انجمادی جوش دارا می‌باشد.

۷-۴-۱-۱- اثرات مفید انجماد با فریت اولیه

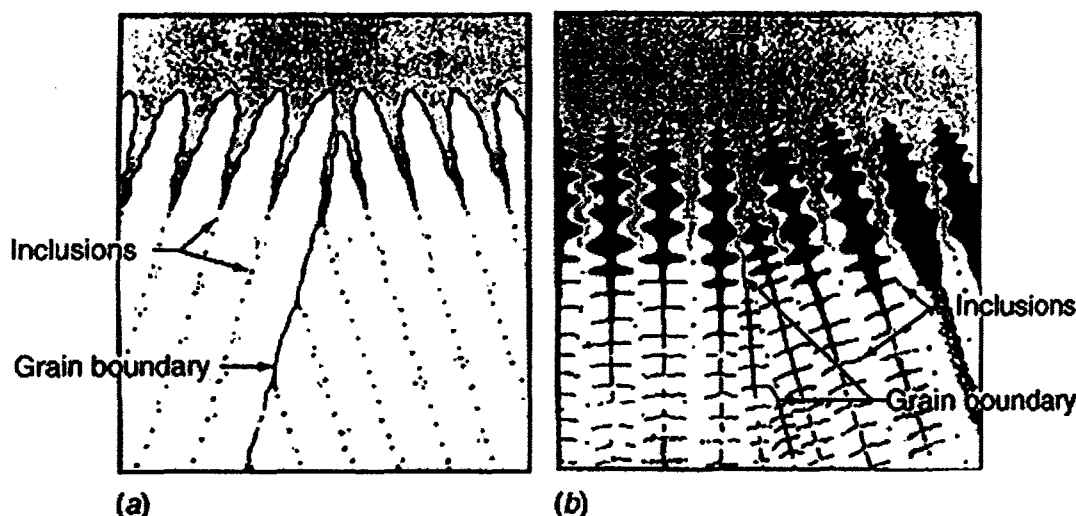
عوامل متعددی جهت تشریح تأثیر سودمند انجماد فریتی روی مقاومت ترک خوردگی انجمادی در فولادهای زنگ نزن آستنیتی مورد استفاده قرار گرفته است. این عوامل در جدول ۲۰ به صورت خلاصه آورده شده است. تعدادی از این عوامل تأثیر کم و یا هیچگونه تأثیری روی حساسیت به ترک خوردگی ندارند که در ستون سمت راست به صورت قابل صرف نظر کردن نشان داده شده است. فریت حلالیت بیشتری برای ناخالصی‌هایی از قبیل فسفر و گوگرد دارد که در طول انجماد فریت اولیه از توزیع این عناصر در مناطق بین دندریتی جلوگیری می‌کند. از عوامل بسیار مهم طبیعت ترشوندگی و انحناء ذاتی مرز می‌باشد. انحناء مرز زمانی اتفاق می‌افتد که هم فریت و هم آستنیت در مرحله نهایی انجماد وجود داشته باشند.



جدول ۲۰: اثرات مفید فریت جهت جلوگیری از ترک انجمادی جوش [۳].	
عامل	تأثیر
حلالیت بالای عناصر ناخالصی	تا حدودی
داکتیلیته بهتر در درجه حرارت بالا نسبت به آستنیت	قابل صرف نظر کردن
محدوده دمایی انجمادی کوچکتر	قابل صرف نظر کردن
توزیع عناصر آلیاژی کمتر در طول انجماد	تا حدودی
تر شونده‌گی کمتر در مرزهای F-F و F-A	قوی
اشاعه ترک مشکلت‌ر در طول مرزهای انحناء دار F-A در مرحله نهایی انجماد	قوی

در انجماد نوع FA مرز فریت-آستنیت در انتهای انجماد وجود دارد که برای لایه‌های مذاب مشکل‌تر شونده‌گی ایجاد می‌کند و یک مسیر ترک بسیار نامسطح بوجود می‌آورد. بنابراین زمانیکه یک ترک جوانه‌زنی می‌کند، اشاعه آن در طول این مرز انحناءدار بسیار مشکل می‌باشد. هر دو نوع مرز آستنیت-آستنیت (نوع A) و فریت-فریت (نوع F)، یکنواخت می‌باشند، زیرا محصول انجمادی ثانویه‌ای وجود ندارد. این امر موجب تسهیل بیشتر اشاعه ترک می‌شود. در نوع AF، مقداری فریت در طول مرز نسبتاً صاف A-A وجود دارد که موجب بهبود حساسیت به ترک خوردگی نسبت به انجماد کاملاً آستینیتی (نوع A) می‌گردد.

تأثیر انحناء مرز به صورت شماتیک در شکل ۵۱ نشان داده شده است. ترکهای انجمادی جوش ترجیحاً در طول مرز دانه‌های انجمادی (SGBs) رخ می‌دهند. تحت انجماد نوع A، این مرزها بسیار مستقیم و یکنواخت بوده و فریت باقیمانده وجود ندارد و در نتیجه، اگر لایه مذاب مرز را تر کند، مقاومت کمی در برابر اشاعه ترک وجود خواهد داشت. در مقابل مرز دانه‌های انجمادی در انجماد نوع FA حاوی مخلوطی از فریت و آستنیت می‌باشند که ترشونده‌گی لایه مذاب را کاهش می‌دهد و از آنجائیکه ترک باید از یک فصل مشترک آستنیت-فریت بسیار انحناءدار عبور کند، توسعه ترک مشکل می‌شود.



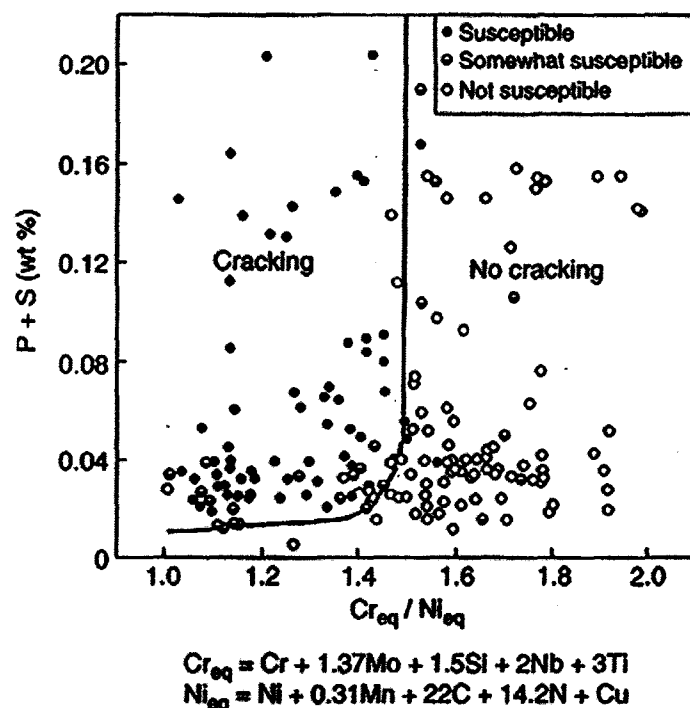
شکل ۵۱: اثر نوع انجماد بر پیچیدگی مرزدانه (a) انجماد A (b) انجماد FA با فریت اسکلتی [۳].

۷-۴-۱-۲- استفاده از دیاگرامهای پیش بینی کننده

دیاگرام های مختلفی جهت پیش بینی حساسیت به ترک بر اساس ترکیب شیمیایی ارائه شده است که یکی از دیاگرام های اولیه در دهه ۱۹۸۰ توسط kujanpää و Suutala ارائه شد که به نمودار Suutala معروف است (شکل ۵۲).

این نمودار اهمیت ترکیب شیمیایی را در مورد حساسیت ترک خوردگی فلز جوشهای فولاد زنگ نزن آستنیتی بیان می کند. زمانیکه میزان Cr_{eq}/Ni_{eq} از حد بحرانی بیشتر می شود، مقاومت بروز ترک صرفنظر از میزان ناخالصی افزایش قابل ملاحظه ای می یابد.

این افزایش ناشی از تغییر رفتار انجمادی از آستنیت اولیه به فریت اولیه می باشد. در مقادیر بسیار کم S+P، مقاومت به بروز ترک در تمام محدوده ترکیب شیمیایی بالا می باشد. حصول چنین مقادیر کمی از ناخالصی معمولاً با استفاده از روشهای ذوب متداول، مقرون به صرفه نیست. روش ذوب AOD موجب کاهش مؤثر میزان گوگرد می شود اما تأثیری روی میزان فسفر ندارد. حتی در فولادهای بسیار تمیز، انتظار می رود میزان S+P از ۰/۰۲٪ (200 ppm) تجاوز کند. در نتیجه بهترین روش کنترل ترک انجمادی، کنترل رفتار انجمادی می باشد.

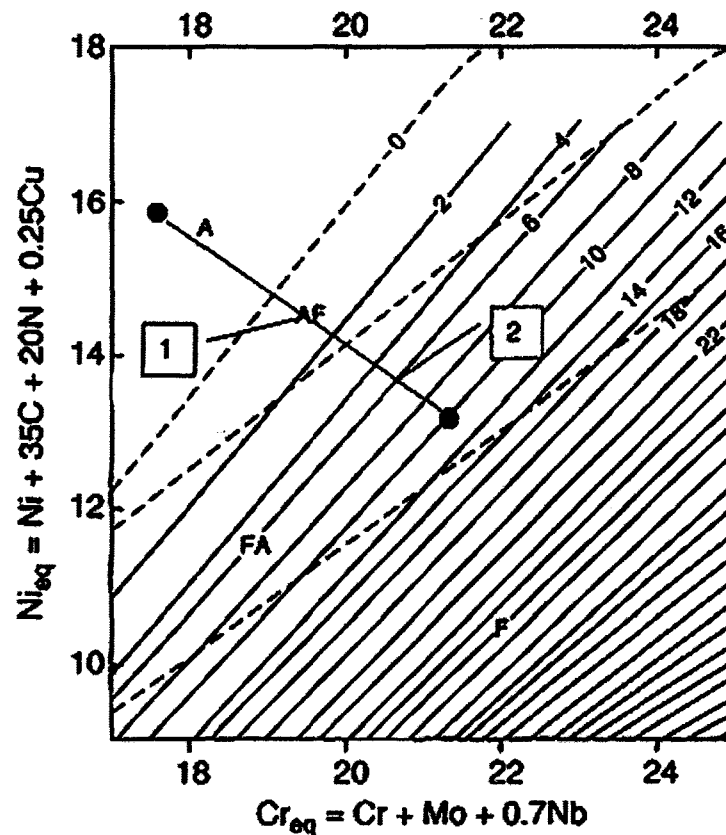


شکل ۵۲: دیاگرام Suutala جهت پیش بینی احتمال ترک انجمادی جوش با توجه به ترکیب شیمیایی فلز جوش [۳].

دیاگرام WRC-1992 (شکل ۱۱) نیز می‌تواند جهت تخمین هم عدد فریت (FN) و هم رفتار انجمادی مورد استفاده قرار گیرد.

براساس ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فلزات جوش، میزان فریت در محدوده ۰ تا ۲۰ قابل انتظار است. در یک محدوده مشخص برای یک آلیاژ خاص، رفتار انجمادی می‌تواند در محدوده A تا FA یا حتی F به همراه یک محدوده مطابق و مشابه در FN، تغییر کند. بنابراین حساسیت به ترک انجمادی فلز جوش می‌تواند با ترسیم ترکیب شیمیایی آن روی دیاگرام WRC-1992 و تعیین نوع انجماد، تخمین زده شود. همچنانکه قبلاً اشاره شد اگر ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز پرکننده مشخص باشد، مقدار FN و رفتار انجمادی همچنانکه در شکل ۵۳ نشان داده شده است قابل تخمین است. در این مثال، فلز پایه کاملاً آستنیتی با استفاده از یک فلز پرکننده با FN=10 جوشکاری شده است. ترکیب شیمیایی جوش بین این دو ماده باید در طول خط واصل آنها قرار گیرد. موقعیت در طول خط اتصال توسط رقیق سازی فلز پرکننده بوسیله فلز پایه تعیین می‌گردد. اگر رقیق سازی ۵۰٪ باشد (مورد ۱)، فلز جوش به نوع AF منجمد خواهد شد و FN برابر ۱ می‌باشد. این فلز جوش ممکن است اگر حد مهار به اندازه کافی بالا باشد، به طور ذاتی به ترک خوردگی انجمادی

جوش حساس باشد. اگر رقیق سازی به ۲۰٪ (مورد ۲) کاهش یابد (مثال از جوشهای با حرارت ورودی کم) نوع انجماد به نوع FA با میزان FN برابر ۶ تغییر می یابد. این فلز جوش حتی در شرایطی با مهار بالا نسبت به ترک خوردگی مقاوم می باشد.



شکل ۵۳: استفاده از دیاگرام WRC-1992 به منظور پیش بینی رفتار انجمادی و عدد فریت [۳].

۷-۴-۱-۳- اثر عناصر ناخالصی

عناصر ناخالصی به خصوص فسفر و گوگرد موجب پیشرفت ترک انجمادی در فولادها می شوند. حتی درصدهای پایین این عناصر آلیاژی در صورتیکه انجماد به صورت آستنیت اولیه (A یا AF) رخ دهد، می تواند موجب پیشرفت ترک در فولادهای زنگ نزن آستنیتی شود. این مطلب به طور واضح در نمودار Suutala (شکل ۵۲) جاییکه درصدهای پایین S+P (هنگامیکه مقدار C_{req}/N_{ieq} زیر ۱/۴۸ است)، می توانند موجب پیشرفت ترک خوردگی شوند، نشان داده شده است.



در فولادهای زنگ نزن مقادیر S+P بسته به نوع فولاد و مشخصات آن در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۰۵wt% می باشد. حذف گوگرد از فولادهای زنگ نزن به راحتی با استفاده از عملیات ذوب و کربوره کردن آرگون - اکسیژن (AOD) انجام می گردد. با استفاده از این روش، مخلوط Ar-O₂ جهت کاهش میزان کربن و آزادسازی Co، Co₂، به درون فولاد مذاب دمیده می شود. به طور همزمان اکسیژن با گوگرد ترکیب شده و به صورت SO₂ از مذاب خارج می شود. در فولادهای فرآوری شده با روش AOD حصول مقادیر گوگرد تا حد ۰/۰۲wt% تنها با کنترل دقیق ماده اولیه امکانپذیر می باشد.

اگر انجماد به صورت FA باشد، بدون توجه به میزان عناصر ناخالصی مقاومت در برابر بروز ترک بسیار بالاست. همانطور که در دیاگرام Suutala نشان داده شده است، اگر انجماد در حالت FA رخ دهد (نسبت $\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}}$ بالاتر از ۱/۴۸ باشد) مقادیر بالایی از گوگرد و فسفر می توانند برای فولاد قابل تحمل باشند، بدون آنکه ترک خوردگی اتفاق افتد.

۷-۴-۱-۴- اندازه گیری میزان فریت

مقدار فریت موجود در فلز جوش از اهمیت خاصی برخوردار است، زیرا به عنوان معیاری از بیان رفتار انجماد جوش و در نتیجه مقاومت به بروز ترک معرفی می شود. با این حال تنها در نظر گرفتن ترکیب شیمیایی برای پیش بینی رفتار انجماد و میزان فریت کافی نخواهد بود، زیرا یک تغییر بسیار کوچک در ترکیب شیمیایی گاهی منجر به تغییرات بزرگی در رفتار پیش بینی شده می شود. این امر بخصوص در مورد عناصر کربن و نیتروژن صادق است که قابلیت آستنیت زایی زیادی دارند. بنابراین بسیار مهم است که بتوان میزان دقیق فریت را در فلزات جوش اندازه گیری کرد. در این رابطه فرضاً می توان از تکنیکهای اندازه گیری متالوگرافی استفاده کرد که نیاز به نمونه های زیاد و روشهای اندازه گیری خاصی دارند. اما این تکنیکها سه عیب اصلی دارند. اول اینکه مخربند و نیاز به نمونه هایی دارند که باید از مقطع جوش مورد نظر جدا شود. دوم اینکه زمان بسیاری صرف می کنند و دقت کافی نیز ندارند مگر اینکه نمونه های زیادی در نقاط و جهت گیری های مختلف تحت بررسی قرار گیرند. سوم اینکه قابلیت اندازه گیری مجدد میزان فریت در آزمایشگاه های مختلف توسط این روشهای متالوگرافی ضعیف است.

به دلایل ذکر شده، طراحی و استفاده از روشهای مغناطیسی به طور گسترده ای رایج شده است. اساس این تکنیکها بر آن است که فریت بر خلاف آستنیت در دمای اتاق فرومغناطیسی است. یکی از این تکنیکها که به طور وسیعی نیز مورد استفاده قرار می گیرد، براساس نیرویی است که لازم است تا

یک آهنربای کوچک را از سطح فلز جوش جدا کرد (نیروی گسیختگی)^۱. براساس این تکنیک ابزار متعددی نیز طراحی شده‌اند که معروفترین آنها عبارتند از Magnegage و Severn Gage. تکنیک دیگری نیز وجود دارد که از یک جریان گردابی برای اندازه‌گیری میزان فریت استفاده می‌کند. ابزار به کار رفته در این روش همچون Fischer Ferit Scope کاربرد زیادی در سایت دارند، زیرا قابل حمل بوده و می‌توانند به فضاهای کوچک نیز دسترسی پیدا کنند. تمامی این ابزارها را می‌توان طوری کالیبره کرد که میزان فریت را به صورت یک عدد فریت (FN) نشان دهند. FN چندان با درصد حجمی فریت ارتباط دقیق نداشته و بسته به ترکیب فریت بین ۰ تا ۱۴۰ و یا بیشتر تغییر می‌کند. در مقادیر زیر ۸، FN تقریباً با درصد حجمی فریت برابر است. در مقادیر بالاتر FN، که در فلز جوش فولادهای زنگ نزن دو فازی یا آستنیتی یافت می‌شود، درصد حجمی فریت حدود ۷۰٪FN می‌باشد.

۷-۴-۱-۵- جلوگیری از ترک انجمادی جوش

حذف و یا به حداقل رساندن ترکهای انجمادی جوش در فولادهای زنگ نزن آستنیتی با کنترل ترکیب شیمیایی مواد فلز پایه و فلز پرکننده براحتی انجام می‌گیرد. با حصول اطمینان از انجماد به صورت فریت اولیه، احتمال ترک خوردگی انجمادی به صفر می‌رسد. این بدان معنی است که برای اغلب فلزهای جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی ترکیب شیمیایی باید به گونه‌ای کنترل شود که انجماد نوع FA حاصل شود که نتیجه آن مقدار FN بین ۳ تا ۲۰ در رسوب جوش می‌باشد. همچنانکه در شکل ۵۳ نشان داده شده است، استفاده از نمودار WRC-1992 در صورتیکه ترکیب فلز پایه و فلز جوش مشخص باشد، بسیار سودمند است.

در سیستمهایی که ترکیبات فلز پرکننده مانع از انجماد به صورت FA می‌شود (یعنی انجماد به صورت آستنیت اولیه (A یا AF) رخ می‌دهد)، احتمال ایجاد ترک بیشتر است. بهترین روش جهت جلوگیری از وقوع ترک در چنین فلزات جوشی، کاهش میزان ناخالصی و یا به حداقل رساندن مهار جوش می‌باشد. فلزات جوش فولادهای کاملاً آستنیتی با خلوص بالا، تحت شرایط مهار کم یا متوسط، کاملاً به ترک مقاوم می‌باشند. مهره‌های محدب و چاله‌های انتهایی پر شده جوش نیز می‌تواند مفید باشد.

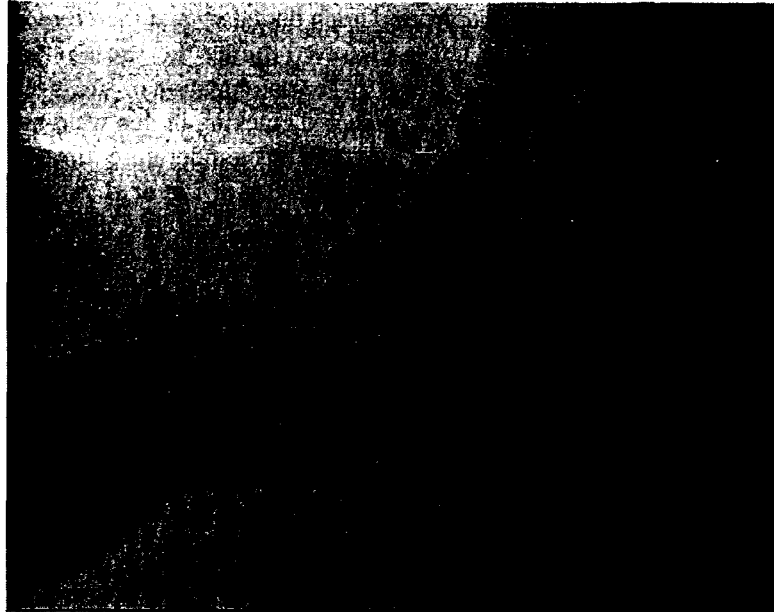
۱- Tearing Force



بسته به کاربرد و یا شرایط کاری، هنگام انتخاب میزان فریت فلز جوش، باید ملاحظات در نظر گرفته شود. با وجود اینکه در مقادیر FN بین ۳ تا ۲۰، اطمینان از عدم وقوع ترک انجمادی وجود دارد، اما اگر میزان FN بالاتر از ۱۰ باشد خواص مکانیکی قطعه جوشکاری شده در صورتیکه تحت عملیات تنش‌زدایی قرار گیرد یا در کاربردهایی که دما بسیار پایین تر از صفر است و در درجه حرارتهای کاری از ۴۲۵ تا ۸۷۰°C بدلیل تشکیل فاز سیگما و آلفاپریم که هر دو ترجیحاً در فصل مشترک آستنیت- فریت تشکیل می‌شوند، احتمال تردی وجود دارد. برای فلزات جوش با FN بالاتر از ۱۰، تشکیل این فازها می‌تواند موجب کاهش شدید چقرمگی و داکتیلیتی گردد. بنابراین اگرچه استفاده از نمودار WRC-1992 روش ساده‌ای برای کنترل ترکیب شیمیایی جهت بوجود آوردن انجماد نوع FA و یک مقدار مطمئن فریت برای جلوگیری از ترک انجمادی جوش می‌باشد، اما مهندس باید از مفهوم و معنی میزان فریت بالای فلز جوش آگاه باشد.

۷-۴-۲- ترک بازگرمی

بروز ترک بازگرمی یا ترک تنش‌زدایی در فولادهای زنگ‌نزن استاندارد آستنیتی معمول نیست، اما ممکن است در آلیاژهایی که در هنگام سیکل حرارتی تنش‌زدایی، کاربردهای نوع MC را تشکیل می‌دهند، ایجاد شوند. به عنوان مثال نوع ۳۴۷ که حاوی نایوبیم است و کاربرد NbC در آن تشکیل می‌شود مستعد به این نوع ترک خوردگی می‌باشد. مکانیزم ایجاد این نوع ترک مشابه با فولادهای کم آلیاژ حاوی V, Mo, Cr می‌باشد. در هنگام جوشکاری، کاربردهای آلیاژی در دمای بالا و در منطقه HAZ مجاور مرز ذوب، حل می‌شوند. فلز جوش نیز حاوی کربن و عناصر آلیاژی تشکیل‌دهنده کاربرد به صورت محلول هست. زمانیکه در هنگام عملیات حرارتی تنش‌زدایی جوش حرارت داده می‌شود، کاربردها در داخل دانه رسوب کرده و باعث استحکام دهی این مناطق نسبت به مرزهای دانه می‌گردد. اگر در محدوده دمایی تنش‌زدایی آزادسازی تنش قابل ملاحظه‌ای رخ دهد، ترک در امتداد مرز دانه‌ها ایجاد می‌شود. این پدیده، هم در HAZ و هم در فلز جوش می‌تواند به وجود آید. در شکل ۵۴ نمونه‌ای از ترک بازگرمی در فلز جوش فولاد ۳۴۷ نشان داده شده است. این ترک مربوط به جوشی است که درجه مهار آن بالا بوده است و نیاز به عملیات حرارتی تنش‌زدایی در ۹۰۰°C داشته است.



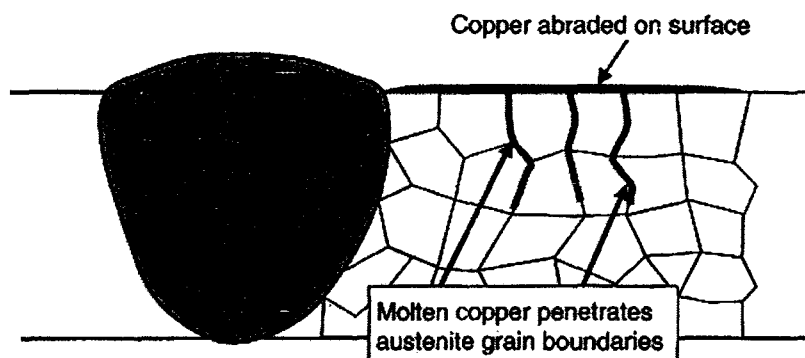
شکل ۵۴: ترک بازگرمی در فلز جوش فولاد ۳۴۷ [۳].

۷-۴-۳- ترک ناشی از آلودگی مس

ترک ناشی از آلودگی مس^۱ (CCC)، ترک شناخته شده در فولادهای سازه و فولادهای زنگ نزن آستنیتی می باشد. این ترک توسط مکانیزم تردی فلز مذاب ایجاد می شود که به موجب آن مس ذوب شده به مرز دانه های آستنیتی نفوذ می کند.

از آنجائیکه برای ایجاد این ترک، حضور مس مذاب نیاز می باشد، این ترک تنها در درجه حرارتهای بالاتر از نقطه ذوب مس (تقریباً 1083°C) ایجاد می شود تخریب های مربوط به جوشکاری به دلیل CCC معمولاً همیشه ناشی از جذب مس در قطعات مورد اتصال از گیره ها، درپوشها یا بقیه ابزاری که از مس ساخته شده است، می باشد. مس افزوده شده به ماده به عنوان عنصر آلیاژی موجب پیشرفت CCC نمی شود. شماتیکی از CCC در شکل ۵۵ نشان داده شده است.

۱-Copper Contamination Cracking



شکل ۵۵: ترک ناشی از آلودگی ناشی از جذب مس روی قطعه ای که جوشکاری می‌شود [۳].

بدلیل اینکه مس به طور موثر مرزدانه‌ها را در درجه حرارت‌های نزدیک به 1100°C تر می‌کند، CCC معمولاً در فاصله چند میلیمتری از مرز ذوب مشاهده می‌شود. درجه ترک خوردگی بستگی به سیکل حرارتی جوش و تنش اعمالی دارد. تنش‌های باقیمانده و یا خارجی تمایل به تسریع CCC دارند. معمولاً تعیین مکانیزم ترک اگر از نوع CCC باشد، آسان است. مس در طول مرزدانه آستنیت در نمونه متالوگرافی بسیار مشخص و واضح است چرا که رنگ مس بسیار متمایز از فولاد زنگ نزن می‌باشد.

بعد از تشخیص مس، مساله مهم حذف منبع مس می‌باشد. معمولاً منبع مس ناشی از ابزار در تماس با قطعه مورد جوشکاری می‌باشد. در بعضی مواقع گیره‌های مسی توسط کروم، نیکل یا فلزات دیگر پوشش داده می‌شود تا از ورود مس به قطعات مورد جوشکاری جلوگیری شود.

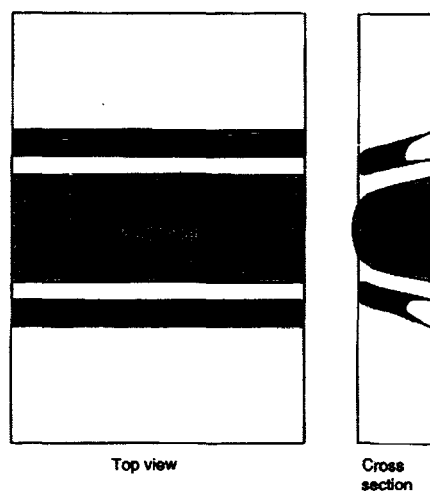
۷-۵- مقاومت به خوردگی

اگرچه فولادهای زنگ نزن اغلب به دلیل مقاومت به خوردگی‌شان انتخاب می‌شوند، احتیاط‌های لازم هنگام انتخاب این آلیاژها در مواردی که جوشکاری می‌شوند و در محیط‌های خاصی به کار می‌روند، ضروری است. مقاومت به خوردگی اتمسفری فولادهای زنگ نزن بسیار خوب است. در درجه حرارت اتاق، خوردگی اتمسفری وجود نداشته و فلز بدون هیچ مشکلی زنگ نزن باقی می‌ماند. در درجه حرارت‌های بالا، نرخ کلی خوردگی افزایش یافته و مقدار خورده شدن و کاهش وزن ماده در طول زمان رخ می‌دهد. در محیط‌های دریایی با آب تازه، نرخ کلی خوردگی بسیار کم و در حدود

$2.5 \times 10^{-5} \text{ mm/gr}$ می باشد. علاوه بر خوردگی عمومی، فولادهای زنگ نزن آستنیتی ممکن است دچار خوردگی های حفره ای، بین دانه ای، تنش، شیار، گالوانیکی، سایشی و میکروبیولوژیکی شوند. جوشکاری می تواند تغییرات متالورژیکی را ایجاد کند که ماده مستعد به خوردگی شود. با ترکیب تنش های پسماند ناشی از جوشکاری، مسأله خوردگی بسیار شدیدتر می شود. دو نوع مختلف از خوردگی مرتبط با جوشکاری بطور گسترده در فولادهای زنگ نزن آستنیتی مورد مطالعه قرار گرفته است که شامل خوردگی مرز دانه ای (IGC) یا حمله مرز دانه ای (IGA) در منطقه HAZ و ترک خوردگی تنش (SCC) می شود. SCC می تواند هم بصورت مرز دانه ای و هم درون دانه ای بسته به ریزساختار و چگونگی تنش وجود داشته باشد. زمانیکه SCC به صورت بین دانه ای رخ می دهد، به ترک خوردگی تنش مرز دانه ای (IG SCC) موسوم است.

۷-۵-۱- خوردگی مرز دانه ای^۱

شکل ۵۶ ظاهر جوشی را که دچار حمله مرز دانه ای در منطقه HAZ شده است، را نشان می دهد. روی سطح جوش که در معرض محیط خورنده قرار دارد، معمولاً منطقه خطی از خوردگی موازی مرز ذوب دیده می شود.



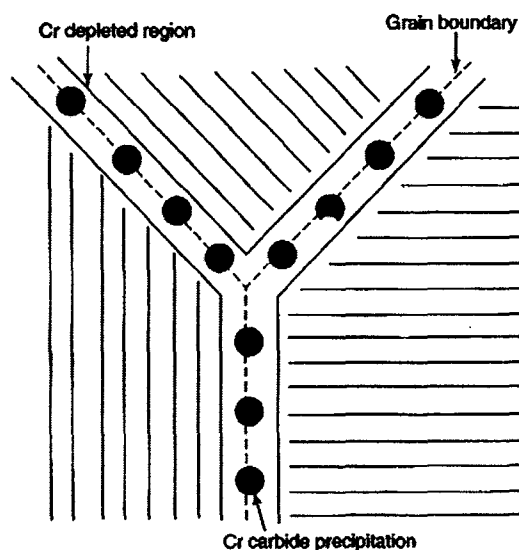
شکل ۵۶: خوردگی مرز دانه در HAZ یک فولاد زنگ نزن آستنیتی [۳].

۱- Intergranlar Corrosion



این مناطق متقارن بوده و در هر طرف جوش با هم موازی هستند. در مقطع عرضی، حمله شدید (یا فاسد شدن جوش) را در طول باند حساس شده در منطقه HAZ می‌توان مشاهده کرد. لازم به ذکر است که این باند از مرز ذوب مقداری فاصله دارد. این حالت به این دلیل است که رسوب کاربیدهایی که منجر به حساس شدن می‌شود در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۸۵۰°C رخ می‌دهد. در دماهای بالاتر از این محدوده کاربیدها بصورت محلول درآمده و نواحی مجاور مرز ذوب نسبتاً عاری از رسوب می‌شود (با این فرض که سرعت سرد شدن به حدی است که از رسوب گذاری کاربیدها در حین سرد شدن جلوگیری می‌شود).

در منطقه HAZ اغلب فولادهای زنگ نزن آستنیتی، کاربیدهای $M_{23}C_6$ غنی از کروم ترجیحاً در مرزدانه‌ها تشکیل می‌شوند (شکل ۵۷). این پدیده منجر به ایجاد منطقه عاری از کروم در امتداد مرزدانه‌ها می‌شود که نسبت به خوردگی حساس است. در اینجا، اصطلاح حساس شدن^۱ اغلب جهت توصیف شرایط متالورژیکی منجر به حمله مرزدانه‌ای بکار می‌رود. موارد استثناء در فولادهای زنگ نزن مربوط به رده‌های پایدار شده با Nb یا Ti (مثل نوع ۳۴۷ و ۳۲۱) می‌باشد. در این فولادها Nb و Ti کربن را بصورت کاربیدهای پایدار MC درآورده و تشکیل کاربیدهای $M_{23}C_6$ در مرزدانه‌ها را به حداقل می‌رساند.



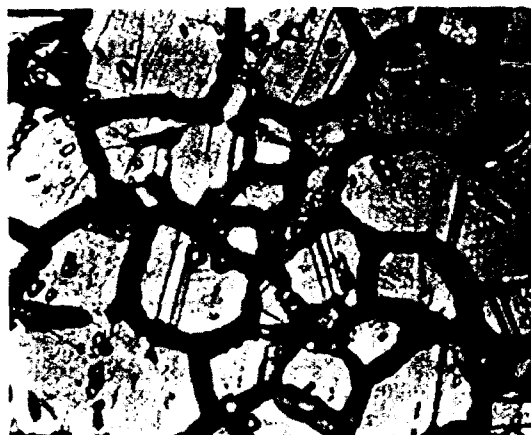
شکل ۵۷: رسوب کاربید در مرزدانه‌ها و تهی شدن جزئی کروم [۳].

^۱-Sensitization

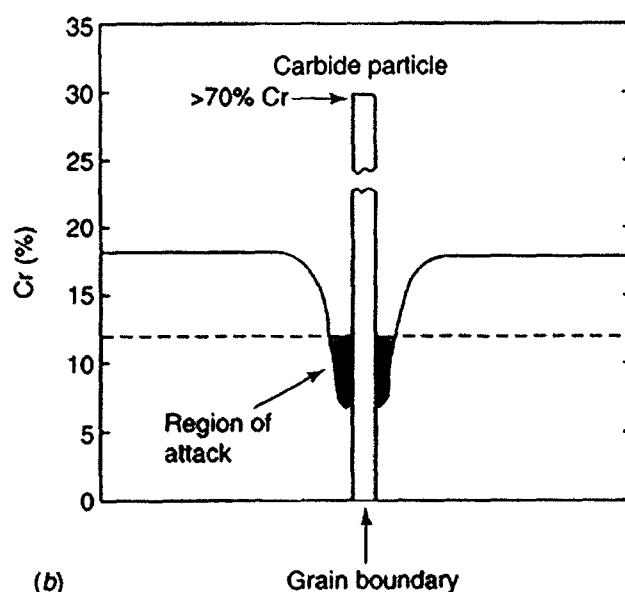


خوردگی مرز دانه ای از رسوب گذاری موضعی کاربردهای غنی از کروم یا کربونیتريدها در مرزدانه‌ها ناشی می‌شود. این رسوب گذاری نیازمند نفوذ کوتاه برد کروم از زمینه مجاور می‌باشد که منجر به تشکیل یک محیط عاری از کروم در اطراف رسوب می‌گردد (شکل ۵۸). این پدیده مقاومت به خوردگی موضعی ریزساختار را کاهش داده و حمله سریع به مناطق مرزدانه‌ای را تشویق می‌کند. در بسیاری از مواقع دانه‌ها بصورت واقعی از ساختار محو می‌شوند زیرا تمام مرزدانه‌ها مورد حمله قرار گرفته و حل شده اند.

مقدار کربن تأثیر زیادی بر احتمال ایجاد IGC در فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارد. با استفاده از آلیاژهای کم کربن (رده L) خطر حساس شدن در نتیجه کاهش رسوب گذاری کاربید به حداقل رسانده می‌شود. منحنی زمان-دما- رسوب گذاری کاربید $M_{23}C_6$ (شکل ۵۹) اثر کربن بر زمان رسوب گذاری را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در مقدار کربن کم ($C < 0.04\%$) مدت رسوب گذاری در حدود ۱ ساعت می‌باشد در حالی که برای مقدار کربن از ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ زمان رسوب گذاری کمتر از یک دقیقه است. این تفاوت مزیت استفاده از آلیاژهای کم کربن جهت کاهش یا محدود کردن حساس شدن مرزدانه منطقه HAZ در حین جوشکاری را نشان می‌دهد. وجود تنش‌های پسماند در منطقه HAZ می‌تواند واکنش رسوب گذاری را تسریع کند.



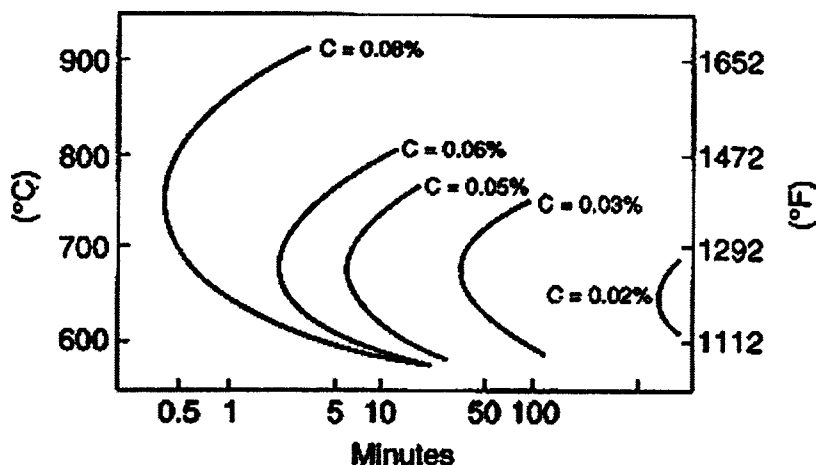
(a)



(b)

شکل ۵۸: خوردگی مرزدانه‌ای (a) حمله در مرزدانه در فولاد ۳۰۴ (C=۰/۰۶٪) (b) تهی شدن کروم مجاور کاربید مرزدانه‌ای

در اغلب موارد، حساس شدن در منطقه HAZ رخ داده و دلیل آن سیکل گرمایی جوش می‌باشد. توجه به این نکته ضروریست که محدوده دمایی جهت تنش‌زدایی در اغلب فولادهای زنگ نزن آستنیتی با محدوده رسوب گذاری کاربیدها همپوشانی دارد. بایستی دقت شود که کل سازه بعد از عملیات حرارتی پس از جوشکاری حساس نشود. این مورد به ویژه در مورد آلیاژهایی که دارای بیش از ۰/۰۴٪wt کربن هستند باید در نظر گرفته شود.



شکل ۵۹: منحنی زمان-دما-رسوب گذاری کاربید $M_{23}C_6$ برای آلیاژهای 18Cr-8Ni با میزان کربن متغیر [۳].

بطور کلی، فلز جوش آلیاژهای ۳۱۶ و ۳۰۸ نسبت به فلز پایه ۳۱۶ و ۳۰۴ تمایل به حساسیت کمتری دارند. فریت موجود در فلز جوش نسبت به آستنیت از کروم غنی تر بوده و کروم با سرعت بسیار بیشتری در فریت نسبت به آستنیت نفوذ می کند که به جلوگیری از تهی شدن مناطق اطراف از کروم کمک می کند. کاربیدهای $M_{23}C_6$ تمایل بیشتری به رسوب گذاری در مرزدهانه های نامنظم و انحناءدار فریت-آستنیت در مقایسه با مرزدهانه های صاف آستنیت-آستنیت دارند. تمام این فاکتورها تمایل به حساس شدن را در فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی حاوی فریت به طور مؤثر محدود می کند.

۷-۵-۱-۱- جلوگیری از حساسیت

با استفاده از روش های زیر می توان خوردگی مرز دانه ای را در جوش های فولاد زنگ نزن آستنیتی به حداقل رساند:

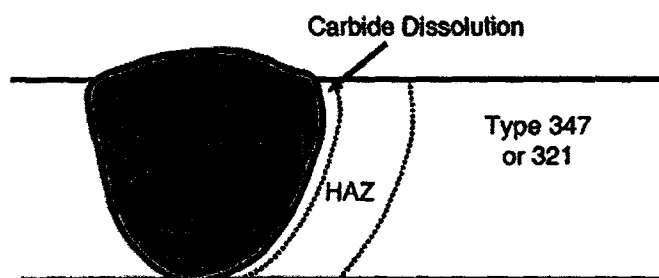
- انتخاب فلز پایه و فلز پرکننده با حداقل مقدار کربن (فولادهای رده L مثل ۳۰۴L و ۳۱۶L)
- استفاده از فلز پایه ای که با اضافه کردن Nb و Ti پایدار شده اند. این عناصر کاربیدزهای قوی تری نسبت به کروم می باشند و در نتیجه کربن را در ترکیب خود داشته و احتمال تشکیل کاربیدهای مرزدهانه ای غنی از کروم را کاهش می دهند.
- استفاده از فلز پایه آنیل شده یا انجام عملیات آنیل قبل از جوشکاری جهت حذف کارسرد (کار سرد رسوب گذاری را افزایش می دهد).



- استفاده از حرارت ورودی کم و دمای بین پاسی کم جهت افزایش نرخ سرد شدن جوش که منجر به کاهش محدوده زمانی حساس شدن می‌شود.
- عملیات حرارتی محلول سازی بعد از جوشکاری. گرم کردن ساختار در دمای ۹۰۰ تا ۱۱۰۰°C همه کاربیدهایی را که ممکن است در مرزدانه‌های منطقه HAZ تشکیل شود را حل می‌کند. سپس ساختار از این دما کوئنچ می‌شود تا از ایجاد رسوبات در حین سرد شدن جلوگیری کند. لازم به ذکر است که دلایل تجربی و عملی زیادی وجود دارد که استفاده از این روش را مفید نمی‌داند. اعوجاج در حین کوئنچ کردن یکی از مشکلات ورق‌ها می‌باشد. همچنین عدم امکان کوئنچ کردن قطعات پیچیده جوشکاری شده در لوله‌ها نیز یک فاکتور محدود کننده است.

۷-۵-۱-۲- خوردگی شیار چاقویی

حمله مرز دانه ای می‌تواند در محل‌های خاصی از انواع فولادهای پایدار شده مثل ۳۴۷ و ۳۲۱ رخ دهد. این حالت در شکل ۶۰ به طور شماتیک نشان داده شده است و معمولاً بصورت یک شیار بسیار باریک در مجاورت خط ذوب ایجاد می‌گردد. این پدیده به خوردگی شیار چاقویی^۱ موسوم است، زیرا شکل آن مشابه بریده شدن جوش بوسیله چاقو می‌باشد. این حمله زمانی رخ می‌دهد که کاربیده‌های پایدار (TiC-NbC) در درجه حرارت بالا در مناطق مجاور منطقه ذوب حل می‌شوند. در حین سرد شدن، کاربیده‌های غنی از کروم سریعتر از NbC یا TiC تشکیل می‌شوند و در نتیجه منطقه باریک حساس شده‌ای به وجود می‌آید، در مناطق دورتر از منطقه ذوب، NbC و TiC حل نشده و حساس شدن اتفاق نمی‌افتد.



شکل ۶۰: موقعیت حمله شیار چاقویی در فولادهای زنگ نزن پایدار شده [۳].

۱-Knife Line Attack



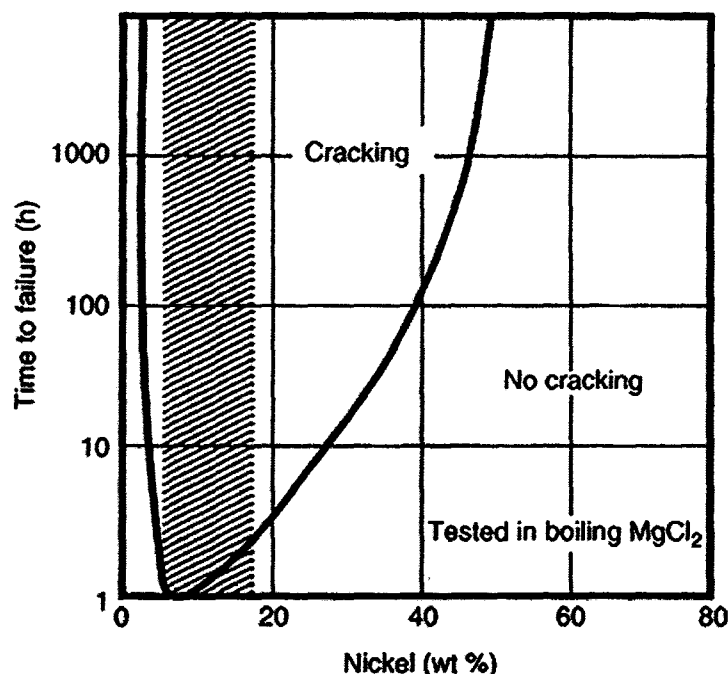
بنابراین حمله شیار چاقویی در محل حل شدن کاربید MC، به دلیل تشکیل مجدد $M_{23}C_6$ در هنگام سرد شدن رخ داده است.

۷-۵-۲- ترک خوردگی تنش (SCC)

بسیاری از فولادهای زنگ نزن آستنیتی بخصوص در محیط های حاوی کلر (مثل آب دریا) به طور ذاتی مستعد به SCC می باشند. منحنی Copson که در شکل ۶۱ نشان داده شده است، مقاومت به SCC را در محیط کلراید منیزیم جوشان برحسب تابعی از میزان نیکل نشان می دهد. استفاده از چنین محیط خورنده ای بدلیل تسریع فرآیند خوردگی است که ممکن است در بقیه محیط های حاوی کلر رخ دهد (از قبیل آب دریا). محدوده بین ۸ تا ۱۲٪ محدوده ایست که مربوط به مقدار نیکل در بیشتر فولادهای زنگ نزن آستنیتی معمول مثل ۳۰۴ و ۳۱۶ می باشد.

SCC می تواند با انتخاب آلیاژی حاوی مقادیر بالاتر از ۲۰٪ یا کمتر از ۵٪ نیکل محدود شود. در مورد اول استفاده آلیاژهای سوپر آستنیتی یا آلیاژهای پایه نیکل متداول می باشد. در مورد دوم، معمولاً فولادهای زنگ نزن دوفازی یا فریتی انتخاب می شوند. SCC همچنین در محیط های قلیایی (PH بالا) مشاهده می شود.

بهترین راه کنترل ترک خوردگی تنش، انتخاب مناسب آلیاژ می باشد. استفاده از فولادهای زنگ نزن فریتی و دوفازی در جاهایی که باید از فولاد زنگ نزن آستنیتی استفاده شود، از ایجاد SCC جلوگیری می کند. ممکن است جوشکاری موجب تشدید SCC در سیستمهای آلیاژی مقاوم به دلیل تغییر ریزساختار و تنشهای پسماند گردد. حساس شدن می تواند SCC مرز دانه ای را در فولادهای زنگ نزن فریتی و آستنیتی تشدید کند یا همچنین طراحی جوش یا شرایطی که تنشهای پسماند زیادی تولید کند باعث تمرکز تنش شود SCC را تشدید می کند. در بعضی موارد تنش زدایی پس از جوشکاری می تواند این تنشها را کاهش داده و تمایل به SCC را به حداقل برساند. اما همانطور که در بالا ذکر شد تنش زدایی پس از جوشکاری نیاز به دقت بالا به جهت جلوگیری از حساس شدن دارد.



شکل ۶۱: منحنی Copson برای SCC در فولادهای زنگ نزن. مناطق هاشورخورده محدوده نیکل بسیاری از فولادهای زنگ نزن آستنیتی را مشخص می‌کند [۳].

۷-۵-۲- خوردگی انتخابی فریت

به طور کلی در اغلب محیط های خورنده فلزات جوش آستنیتی حاوی مقدار کمی فریت، دارای مقاومت به خوردگی برابر با فلزات پایه عاری از فریت، می‌باشند.

اگرچه در محیط های مشخصی مثل محلیط هایی که در آنها اوره تولید می‌شود یا در اسیدهای آبی جوشهای فولاد زنگ نزن آستنیتی در معرض حمله انتخابی فریت قرار می‌گیرند. اگر میزان قابل توجهی از فریت (به طور معمول عدد فریت بیش از ۵ باشد) موجود باشد. خوردگی در امتداد شبکه‌های فریت پیشرفت می‌کند و به طور مؤثر فلز جوش را تخریب می‌کند. در این شرایط به طور معمول نوع ۳۱۶L یا آلیاژهای مشابه کاربرد دارند و فلزات پرکننده ویژه مشابه با ۳۱۶L در دسترس می‌باشند. در استاندارد AWS، فلزات پرکننده‌ای با این مشخصات معرفی نشده‌اند، اما در استانداردهای ISO 3581 و EN1600 فلزات پرکننده 18Cr-15Ni-3Mo بدون نیتروژن (18-15-3L) و همراه با نیتروژن (18-16-5N L) معرفی شده‌اند که قابل کاربرد در این شرایط می‌باشند [۳].



۷-۵-۳- خوردگی شیاری و حفره‌ای

خوردگی شیاری و حفره‌ای پدیده‌هایی مربوط به هم می‌باشند.

خوردگی شیاری اغلب در شکاف‌ها و نواحی درزدار روی سطح فلز که حالت مرده داشته^۱ و در معرض محیط خورنده قرار دارند، اتفاق می‌افتد. وجود حجم‌های کوچک از محلول‌ها یا مایعات، که در اثر وجود شیار در سطوح قطعاتی مثل واشرها، زیرپیچ و مهره‌ها، میخ پرچ‌ها و مواضع جوشکاری شده و به طور کلی محل‌های قرار گرفتن دو فلز روی هم که اصطلاحاً فضای ساکن و مرده‌ای ایجاد کرده‌اند با تشکیل پیل غلظتی، (اختلاف پتانسیل یون فلز پایه و یون اکسیژن باعث ایجاد پیل الکتروشیمیایی می‌شود) خوردگی شیاری اتفاق می‌افتد که در پاره‌ای موارد به آن خوردگی لکه‌ای یا واشری یا غلظتی هم می‌گویند. در محیط‌های کلریدی این پدیده تشدید می‌گردد. برای جلوگیری از بروز این خوردگی، باید روش‌های زیر را مدنظر قرار داد:

- لازم است جوش‌ها سالم و بدون هرگونه عیب باشند و نفوذ کامل مذاب به داخل درز جوش انجام پذیرد تا از ایجاد شیار و حفره در طرف دیگر خط جوش جلوگیری شود.
- تانک‌ها و مخازن باید طوری طراحی شوند که هنگام تخلیه، هیچ گونه مایعی داخل آن‌ها باقی نماند. از گوشه‌های تیز و نواحی مرده و ساکن استفاده نگردد و همواره از تخلیه کامل، شستشو و تمیز کردن مخزن اطمینان حاصل شود تا از تجمع رسوب‌ها در کف آن جلوگیری به عمل آید.
- در صورت امکان، به جای واشرهای فلزی از واشرهای تفلونی استفاده شود.
- به جای پرس کردن، پیچ و پرچ کردن و سایر اتصالات، باید سعی کرد که از جوشکاری استفاده شود.

خوردگی حفره‌ای یا حفره‌دار شدن، نوعی خوردگی شدیداً موضعی است که سبب سوراخ شدن فلز می‌شود. این سوراخ‌ها، ممکن است قطره‌ای مختلفی داشته باشند. معمولاً در صورتی که قطر دهانه محل خورده شده تقریباً مساوی یا کوچکتر از عمق آن باشد، خوردگی حاصل را حفره می‌نامند. حفره دار شدن در اثر یک واکنش آندی منحصر به فرد و اتوکاتالیتیک اتفاق می‌افتد، یعنی واکنش‌های خوردگی در داخل حفره شرایطی را به وجود می‌آورند که محرک ادامه خوردگی می‌باشند. به این ترتیب، حفره اولیه طی روزها، هفته و سالیان دراز گسترش یافته، رشد می‌کند و باعث تخریب کلی سازه می‌گردد.

۱- Shielded Areas



در هر صورت، مکانیزم رشد حفره اساساً شبیه خوردگی شیاری است با این تفاوت که در خوردگی حفره‌ای، هیچ گونه شیار اولیه‌ای وجود ندارد بلکه خود شیار را به وجود می‌آورد. اکثر انهدام‌های ناشی از حفره‌دار شدن، در اثر وجود کلرورها و یون‌های حاوی کلر می‌باشد که به مقادیر مختلف در آب دریا و آب‌های نمک‌دار و سایر محیط‌های کاری یافت می‌شوند. فولادهای زنگ نزن آستینیتی از نظر متالورژیکی، برای حفره‌دار شدن مستعدتر از تمام فلزات و آلیاژهای دیگر هستند.

برای جلوگیری از حفره‌دار شدن فولادهای زنگ نزن جوشکاری شده، علاوه بر توصیه‌های که در رابطه با خوردگی شیاری ارائه شد به موارد زیر نیز باید توجه نمود:

- در انتخاب فلز پرکننده هنگام جوشکاری، به جای سیم‌ها یا الکترودهای گروه ۳۰۸ یا ۳۰۴ باید از خانواده ۳۱۶ استفاده کرد.

- نگهداری انواع فولادهای زنگ نزن آستینیتی در درجه حرارت حساس شدن^۱، مقاومت حفره‌دار شدن آن‌ها را تقلیل می‌دهد، در حالی که این فولادها اگر از بالای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد در عملیات حرارتی آنیل محلولی^۲ سریع سرد شوند، بیشترین مقاومت در برابر حفره‌دار شدن را از خود نشان می‌دهند.

- کار سرد مکانیکی، اغلب حفره‌دار شدن را برای فولادهای زنگ نزن آستینیتی افزایش می‌دهد که باید از آن تا حد امکان پرهیز کرد.

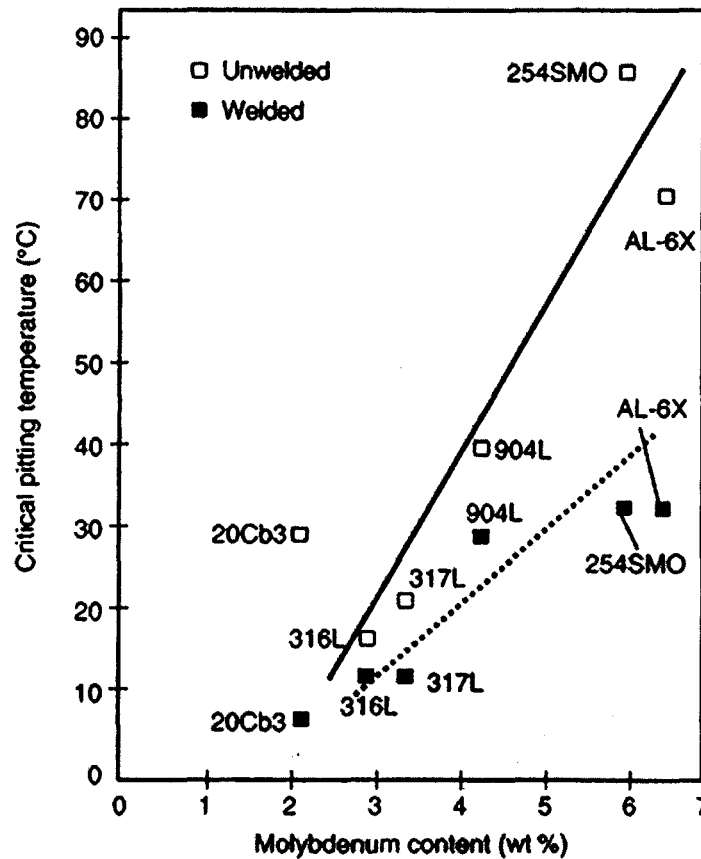
- پولیش کردن سطح، به ویژه پس از جوشکاری، اگر باعث خراشیدگی و بروز شیار نشود، مفید خواهد بود [۴].

کروم، مولیبدن، تنگستن و نیتروژن عناصر آلیاژی هستند که مقاومت در برابر خوردگی شیاری و حفره‌ای را بهبود می‌بخشند. تحقیقات انجام شده بر روی تعدادی از فلزات پایه فولاد زنگ نزن و جوشهای آنها (بدون استفاده از فلزات پرکننده) نشان می‌دهند که با افزایش مولیبدن دمای بحرانی حفره‌دار شدن^۳ (CPT) افزایش می‌یابد (شکل ۶۲). در شکل مشاهده می‌شود که دمای بحرانی برای فلز جوش با ترکیب شیمیایی مشابه همواره کمتر از فلز پایه است که علت آن امر ناشی از جدایش مولیبدن در حین انجماد است که منجر به تهی شدن برخی از مناطق از مولیبدن می‌شود [۳].

۱- Sensitizing Temperature

۲- Solution Annealing

۳-Critical Pitting Temperature



شکل ۶۲: دمای بحرانی حفره‌دار شدن برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی مولیبدن بالا و جوشهای ذوبی آنها بدون استفاده از فلز پرکننده [۳].

۶-۷- انتخاب فلز پرکننده

از آن جایی که اغلب فولادهای زنگ نزن آستنیتی به صورت جوش داده شده در سرویس کاری قرار می‌گیرند، بنابراین ضروری است که در انتخاب فلز پرکننده هنگام جوشکاری، دقت بسیاری به عمل آمده و نزدیک‌ترین فلز پرکننده به فلز پایه انتخاب شود.

به طور کلی، اگر فلز جوش با فریت اولیه، جامد شود تهیه دستورالعمل جوشکاری و انتخاب فلز پرکننده، به راحتی جوشکاری فولادهای ساده کربنی خواهد بود، در غیر این صورت، به دلیل احتمال بروز ترک‌های گرم باید در انتخاب مواد پرکننده دقت زیادی اعمال گردد.

تعداد زیادی از فلزات پرکننده در ترکیبات و تنوع‌های گوناگون برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی وجود دارد.



سازندگان مواد مصرفی جوشکاری، با اعمال تغییرات جزئی در بعضی خواص متالورژیکی یا مکانیکی مواد، از یک ترکیب پرکننده، چند نوع پرکننده با خواص متفاوت اما نزدیک به هم تولید و عرضه کرده‌اند. این عمل، اغلب با تغییر در مواد تشکیل دهنده پوشش الکتروود انجام می‌پذیرد. هر چند گاهی مغزی پرکننده نیز، براین اساس طراحی و انتخاب می‌شود. به طور مثال، در استاندارد ANSI/AWS A5.4 سه نوع الکتروود یکسان با پوشش‌های مختلف با طبقه‌بندی E308L-15، E308L-16 و E308L-17 وجود دارد. به طور کلی E308L-15 نسبت به دو نوع دیگر از مقاومت به خوردگی و ترک بیشتری برخوردار است و E308L-16 نیز همین نسبت را به نوع سوم دارد. همچنین الکتروود E308L-15 جوشی با دانه تسبیحی‌های محدب ایجاد می‌کند در حالی که شکل پروفیل جوش حاصل از الکتروود E308L-16 به صورت مسطح و در مورد E308L-17 به صورت مقعر می‌باشد. در هنگام استفاده از E308L-15، حساسیت به ورود نیتروژن در حوضچه مذاب نسبت به E308L-16 و E308L-17 به مراتب کمتر است. البته این مثال، در حالت کلی نیز قابل تعمیم بوده، روابط فوق-الذکر بین الکتروودهای E308L-15، E308L-16 و E308L-17 نیز برقرار است، که XXX می‌تواند در هر یک از موارد 308L، 309L، 316L و سایر انواع باشد.

در اغلب موارد، مهمترین تحقیق راجع به این الکتروودها، در رابطه با مقدار کربن موجود در مغزه و روکش آنهاست، زیرا هر چه مقدار کربن بیشتر باشد، مقاومت جوش حاصل، به ویژه در حرارت‌های بالا در زمان سرویس کاری، افزایش می‌یابد و هر چه مقدار کربن کمتر باشد، مقاومت به خوردگی جوش حاصل افزایش می‌یابد. در جدول ۲۱ فلزات پرکننده مختلف برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستینیتی ارائه شده است.



جدول ۲۱: فلزات پرکننده توصیه شده برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی
کار شده و ریختگی [۲].

Type of stainless steel		Recommended filler metals		
Weight	Cast	SAW ^a	GTAW, PAW, SAW ^b	FCW ^c
201	-	E309	ER309	EN307-X
202	-	E309	ER309	EN307-X
203	-	E309	ER309	EN307-X
204	CP-30	E308	ER308	EN307-X
205	CP-8	E308	ER308	EN307-X
206	CP-8	E308	ER308	EN307-X
207	CP-3	E308L	ER308L	EN308L-T-X
208	CP-3	E347	ER347	EN347-T-X
209	CP-30	E309	ER309	EN307-X
209L	-	E309L	ER309L	EN309L-T-X
210	-	E309L	ER309L	EN309L-T-X
211	CP-30	E309	ER309	EN307-X
212	CP-30	E309	ER309	EN307-X
213	-	E310	ER310	EN310-T-X
214	-	E310C	ER310	EN310-T-X
215	CP-40	E314	ER314	EN314-T-X
216	CP-30	E314L	ER314L	EN314L-T-X
217	CP-42	E316-3	ER316-3	EN316-T-X
218	CP-42	E316	ER316	EN316-T-X
219	-	E317	ER317	EN317L-T-X
220	-	E317L	ER317L	EN317L-T-X
221	-	E308L	ER321	EN308L-T-X
222	-	E347	ER321	EN347-T-X
223	RT	E330	ER330	-
224	CP-30	E308L	ER347	EN308L-T-X
225	CP-30	E347	ER347	EN347-T-X
226	-	E347	ER347	EN347-T-X

- a. Castings higher in carbon but otherwise of generally corresponding composition are available in heat treating grades. These castings carry the "H" designations (EH, HH, and FH, for instance). Electrodes best suited for welding these high-carbon versions are the standard electrodes recommended for the corresponding lower-carbon versions without castings shown above.
- b. Covered electrodes for shielded metal arc welding (SMAW).
- c. Bare welding rods and electrodes for gas metal arc (GMAW), gas tungsten arc (GTAW), plasma arc (PAW), and submerged arc welding (SAW).
- d. Tubular electrodes for flux cored arc welding (FCW). The suffix -x can be -1, -2, or -3 (see Table 2.2).

در ادامه انتخاب فلز پرکننده جهت اتصال دو فولاد زنگ نزن غیرمشابه ۳۱۶L و ۳۲۰، به عنوان یک مثال کاربردی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در صورتیکه از الکتروود ۳۱۶L برای اتصال این دو فلز استفاده شود، ترک انجمادی بزرگی به وجود خواهد آمد. به دلیل آن که فولاد زنگ نزن ۳۲۰ دارای نیکل به میزان زیاد می باشد، ریشه جوش ایجاد شده توسط الکتروود ۳۱۶L به دلیل تجمع نیکل ناشی از فلز پایه ۳۲۰، حاوی فریت نمی باشد. عدم حضور فریت موجب می شود که فلز جوش نسبت به



ترک انجمادی حساس باشد. در جدول ۲۲، ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۲۰ و ۳۱۶L و فلز پرکننده الکتروود روپوش دار ۳۱۶L آمده است.

در استفاده از الکتروودهای روپوش دار، درجه رقت ۳۰٪ قابل انتظار است که نصف آن مربوط به هر طرف اتصال می باشد. بنابراین انتظار می رود ترکیب شیمیایی پاس ریشه شامل ۱۵٪ فلز پایه ۳۲۰، ۱۵٪ فلز پایه ۳۱۶L و ۷۰٪ فلز پرکننده ۳۱۶L باشد. ترکیب شیمیایی محاسبه شده پاس ریشه در جدول ۲۲ مشاهده می شود. همچنین کروم معادل (Cr_{eq}) و نیکل معادل (Ni_{eq}) و عدد فریت محاسبه شده برای هر ترکیب شیمیایی، براساس دیاگرام WRC-1992 در این جدول آمده است. استفاده از فلز پرکننده ۳۲۰ نیز نتایج بدتری را همراه خواهد داشت، زیرا به دلیل میزان نیکل بالای آن، حتی مقدار کمی فریت نیز در آن وجود ندارد. بنابراین انتخاب این فلز پرکننده (یا نوع ۳۲۰LR)، راه حل مناسبی به نظر نمی رسد.

جدول ۲۲: ترکیب شیمیایی فلزات پایه ۳۲۰ و ۳۱۶L، الکتروود روپوش دار E۳۱۶L و پاس ریشه [۳].

Metal	Nominal Composition (%)								
	C	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	N	Cr_{eq}	Ni_{eq}
320	0.02	20.0	34.0	2.5	0.30	3.5	0.02	22.7	36.0
316L	0.02	17.0	12.0	2.3	—	0.2	0.02	19.3	13.1
E316L	0.03	18.5	12.0	2.3	—	0.2	0.06	20.8	14.3
Root pass	0.027	18.5	15.3	2.33	0.045	0.7	0.048	20.9	17.4

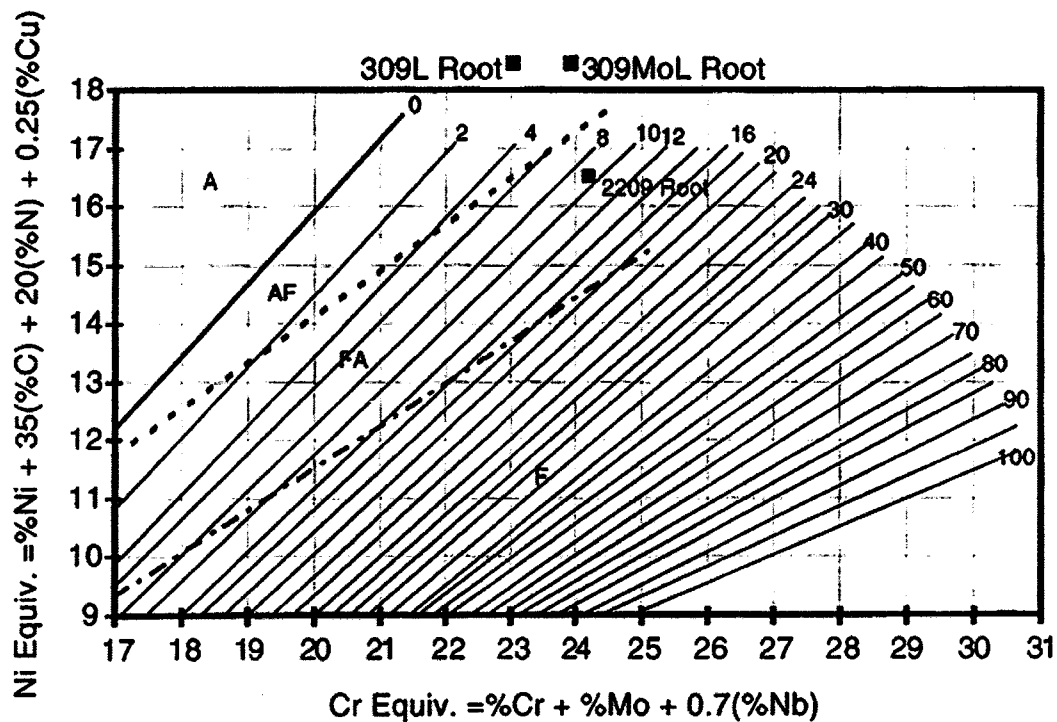
لذا لازم است فلزات پرکننده دیگری در نظر گرفته شوند. برای اینکار می توان آلیاژهای آستیتی ۳۰۹L، ۳۰۹LMO و ۳۱۲ یا آلیاژ دوفازی ۲۲۰۹ را به عنوان کاندید در نظر گرفت. از میان این آلیاژها، نوع ۳۱۲، انتخاب مناسبی برای بسیاری از ترکیبات فلزی غیرمشابه می باشد، اما به دلیل آنکه هر دو طرف این اتصال خاص دارای میزان کربن کم می باشد و از طرفی کربن فلز پرکننده ۳۱۲ حدود ۰/۰۸٪ می باشد، بنابراین انتخاب این فلز پرکننده به جهت آنکه ممکن است خواص خوردگی نامطلوبی را همراه داشته باشد، مناسب به نظر نمی رسد. در انتخاب بقیه این فلزات می توان مشابه با جدول ۲۲، ترکیب شیمیایی پاس ریشه را بدست آورد تا احتمال ترک انجمادی جوش مورد بررسی قرار گیرد. لذا با توجه به جدول ۲۳، می توان دید که پاس ریشه حاصل از فلز پرکننده ۳۰۹L دارای میزان ناکافی از فریت (۱/۶) می باشد و احتمال ترک انجمادی بالاست. در نگاه اول، انتخاب فلز پرکننده 309LMO و



پاس ریشه ناشی از آن با $\frac{3}{\Delta FN}$ قابل قبول به نظر می‌رسد اما با رجوع به دیاگرام WRC-1992 (شکل ۶۳) و اینکه پاس ریشه با این ترکیب شیمیایی کجای دیاگرام قرار می‌گیرد، می‌توان به این نتیجه رسید که این انتخاب مناسب نیست.

جدول ۲۳: ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده ۳۰۹L، ۳۰۹MoL و ۲۲۰۹ و ترکیب شیمیایی پاس ریشه اتصال فولاد زنگ نزن ۳۲۰ به ۳۱۶L با این الکترودها [۳].

Metal	Nominal Composition (%)								Cr _{eq}	Ni _{eq}	FN
	C	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	N				
E309L	0.03	23.5	13.5	0.2	—	0.2	0.06	23.8	15.7	10.5	
E309L root	0.027	22.07	16.28	0.86	0.045	0.7	0.048	23.0	18.4	1.6	
E309MoL	0.03	23.0	13.5	2.2	—	0.2	0.06	25.2	15.7	16.8	
E309MoL root	0.027	21.65	16.28	2.26	0.045	0.7	0.048	23.9	18.4	3.5	
E2209	0.03	22.5	9.0	3.0	—	0.1	0.15	25.5	13.1	35.4	
E2209 root	0.027	21.3	13.2	2.82	0.045	0.6	0.111	24.2	16.5	9.0	



شکل ۶۳: دیاگرام WRC-1992 با ترکیب شیمیایی پاس ریشه برای فلزات پرکننده اشاره شده [۳].



ترکیب شیمیایی فولاد ۳۲۰ خارج از دیاگرام است (بالاتر از حداکثر $Ni_{eq} = ۱۸$ در دیاگرام). پاس ریشه ۳۰۹L و ۳۰۹LMo، هر دو کمی بالاتر از حداکثر $Ni_{eq} = ۱۸$ بوده، اما بسیار به آن نزدیک بوده و جهت بررسی مناسب می‌باشند. به طور کلی هیچ عدد فریتی وجود ندارد که توسط آن بتوان ترکیبهای شیمیایی موجود در دیاگرام WRC-1992 که حساس به ترک انجمادی هستند یا نیستند را جدا کرد. اگرچه در دیاگرام خط چین پیرنگی وجود دارد که ترکیبهای شیمیایی که به صورت آستنیت اولیه (منطقه AF) جامد می‌شوند و در نتیجه مستعد به ترک هستند را از آنهایی که به صورت فریت اولیه جامد شده (منطقه FA) و در نتیجه مستعد به ترک نیستند را جدا می‌کند. این خط چین با شیب کمی به خطوط ایزوفریت نزدیک می‌شود. در انتهای سمت پائین و چپ آن FN در حدود ۱ و در انتهای سمت بالا و راست آن FN در حدود ۵ می‌باشد.

به طور معمول و با توجه به آنچه در تجربه بدست آمده است، ترکیبهای شیمیایی با مقادیر FN بیشتر از ۳ یا ۴ عاری از ترک انجمادی می‌باشند اگرچه برای فلزات پرآلیاژتر FN بیش از ۵ ممکن است ضروری باشد.

بنابراین با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که هیچ یک از فلزات پرکننده ۳۰۹L و ۳۰۹MoL انتخاب مناسبی جهت اتصال فلزات پایه فولاد زنگ نزن ۳۲۰ و ۳۱۶L نمی‌باشند (هر دو در منطقه‌ای قرار می‌گیرند که انجماد به صورت AF است). با توجه به جدول ۲۳، مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از فلز پرکننده فولاد زنگ نزن دوفازی ۲۲۰۹ عدد فریت در پاس ریشه ۹ خواهد بود و بنابراین با توجه به دیاگرام انجماد به صورت FA خواهد بود و پاس ریشه تشکیل شده از فلز پرکننده ۲۲۰۹ دارای مقداری بیشتری از مولیبدن است که می‌تواند مطلوب باشد. مقاومت به خوردگی فلز پرکننده ۲۲۰۹ بهتر از فلز پایه ۳۱۶L و استحکام کشی آن بالاتر ۳۱۶L می‌باشد. البته از انتخاب این فلز پرکننده در شرایطی که حضور فریت می‌تواند مخرب باشد، باید اجتناب کرد:

- ۱- در ساخت اوره، جایی که فریت به طور انتخابی خورده می‌شود.
 - ۲- در شرایطی که دمای کاری بالاست و تردی ناشی از فاز سیگما ممکن است رخ دهد.
 - ۳- در شرایطی که دما زیر صفر است و حفظ چقرمگی از اهمیت بالایی برخوردار است [۳].
- جهت اتصال فولادهای زنگ نزن آستنیتی به مارتنزیتی می‌توان با استفاده از فلز پرکننده نوع ۳۰۹، یک لایه با فر بر روی فولاد مارتنزیتی نشانند و سپس اتصال را با فلز پرکننده نوع ۳۰۸ پرکرد [۲].



۷-۷- طراحی اتصال

در جدول ۲۴ ابعاد مورد نیاز برای اتصالات فولادهای زنگ نزن آستنیتی با جوشهای شیاری ارائه شده است.

جدول ۲۴: طراحی اتصال برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی برای جوشهای شیاری با توجه به فرآیند جوشکاری مورد استفاده AWS [۳].

Joint design	Welding process ^a	Thickness, in.	Root opening, in.	Root face, in.	Groove angle, degrees
Square-groove, one pass	SMAW	0.04-0.13	0-0.04	—	—
	GTAW	0.04-0.13	0-0.08	—	—
	GMAW	0.08-0.16	0-0.08	—	—
Square-groove, two-pass	SMAW	0.12-0.25	0-0.08	—	—
	GTAW	0.12-0.25	0-0.04	—	—
	GMAW	0.12-0.32	0-0.04	—	—
	SAW	0.15-0.32	0	—	—
Single-V-groove ^b	SMAW	0.12-0.50	0-0.08	0.06-0.12	60
	GTAW	0.15-0.25	0-0.01	0.06-0.08	90
	GTAW	0.25-0.63	0-0.02	0.04-0.06	70
	GMAW	0.15-0.50	0-0.08	0.06-0.12	60
	SAW	0.31-0.50	0-0.08	0.06-0.16	60
Single-U-groove	GMAW	0.5-0.75	0-0.08	0.08-0.12	15°
Double-V-groove ^b	SMAW	0.5-1.25	0.04-0.13	0.06-0.16	60
	SAW	0.5-1.25	0-0.08	0.08-0.12	60
Double-U-groove	SMAW	over 1.25	0.04-0.08	0.08-0.12	10-15°

- a. SMAW—Shielded metal arc welding
GTAW—gas tungsten arc welding
GMAW—gas metal arc welding
SAW—submerged arc welding

b. For welding in the horizontal position, the lower member should be beveled only 10 to 15 degrees, and the top member 45 to 55 degrees.

c. Groove radius—0.25 to 0.31 in.

۷-۸- فرآیندهای جوشکاری قوسی فولادهای زنگ نزن آستنیتی

روشهای جوشکاری قوسی معمول جهت اتصال این دسته از فولادها عبارتند از:

۱- فرآیند SMAW

مهمترین نکات در این رابطه عبارتند از:



- ۱- در صورت استفاده از این روش، امکان به کارگیری و استفاده از الکترودهای بسیار زیادی وجود دارد.
- ۲- امکانات مربوط به این روش جوشکاری همواره در دسترس بوده و بسیار ارزان‌تر از سایر روش‌های جوشکاری است.
- ۳- به آموزش و تخصص ویژه و پیچیده‌ای نیاز ندارد.
- ۴- در جوش‌های چندپاسی، سرباره پاس قبل باید به طور کامل پاک شود، در غیر این صورت بین پاس‌ها اتصال لازم برقرار نشده و عیب محسوب می‌شود.
- ۵- الکترودها باید همیشه خشک و تمیز نگهداری شوند زیرا در غیر این صورت عیب‌های متعددی را در جوش ایجاد می‌کنند.
- ۶- استفاده از این روش با توجه به مقدار نفوذ و رسوب وزنی جوش نسبت به وزن الکتروود، و با توجه به بازدهی الکتروودها، در بعضی موارد مقرون به صرفه نیست.
- ۷- از روش SMAW بیشتر در کارهای ساختمانی، تعمیراتی و تولید محصولات کوچک و کم تعداد استفاده می‌شود.
- ۸- مقدار شدت جریان مصرفی برای الکترودهای زنگ زن آستنیتی، با توجه به قطر و وضعیت قرار گرفتن و زاویه الکتروود تعیین می‌شود، اما به طور کلی، این مقدار کمتر از الکترودهای غیرزنگ زن می‌باشد.
- ۹- در حالت قائم (عمودی)، مقدار شدت جریان پایین‌تر از وضعیت افقی و تخت انتخاب می‌شود.
- ۱۰- باید سعی کرد که جوشکاری فولادهای زنگ زن آستنیتی را با قوس کوتاه انجام داد. طول قوس نباید از ۵mm/۰ تجاوز کند.
- ۱۱- الکترودهایی که با جریان AC جوشکاری می‌شوند، رسوب دهی بالایی ندارند و به شدت جریان نسبتاً بالاتری نیاز دارند.
- ۱۲- اگر ضخامت ورق فولادی زنگ زن قطعه کار کمتر از ۶ میلی‌متر باشد، برای جوشکاری آن نباید از روش SMAW استفاده کرد زیرا دچار پیچیدگی و اعوجاج می‌شود این فولادها، دارای ضریب انبساط حرارتی زیاد و ضریب هدایت حرارتی کم می‌باشند.
- ۱۳- برای پاک کردن سرباره از سطح جوش، به ویژه جوش‌های چند پاسی، حتماً باید از برس فلزی با سیم‌هایی از جنس فولاد زنگ زن آستنیتی استفاده کرد.



۱۴- سیالیت مذاب جوش در فولاد زنگ نزن آستنیتی به مراتب کمتر از سیالیت مذاب جوش در فولاد زنگ نزن فریتی است، اما وجود نیکل بیشتر در فولاد زنگ نزن آستنیتی سبب می‌شود تا حجم سرباره تولیدی افزایش یابد.

۱۵- عرض حرکت موجی الکتروود که توسط دست جوشکار به وجود می‌آید، در جوشکاری SMAW فولادهای زنگ نزن آستنیتی هرگز نباید از چهار برابر قطر مغزه الکتروود یا ۱۵mm بیشتر باشد.

۱۶- برای کاستن از مشکل پیچیدگی و تاب برداشتن قطعه کار در هنگام جوشکاری، به ویژه ورق‌های زنگ نزن نازک، استفاده از نگه دارنده‌ها، گیره‌ها، پشت بند و مبرد توصیه شده است.

۱۷- بعد جوش در پاس ریشه نباید از ۱۲/۵ میلیمتر تجاوز کند.

۱۸- تا حد امکان سعی شود از الکتروود با قطر بیش از ۵ یا ۶ میلی‌متر استفاده نشود.

۱۹- فولادهای زنگ نزن آستنیتی را باید در حالت آنیل شده جوشکاری کرده ضمن آنکه برای AISI ۳۲۱، AISI ۳۴۷ عملیات آنیل محلولی قبل از جوشکاری نیز توصیه شده است، زیرا فولادهای زنگ نزن آستنیتی پیشگرم نمی‌شوند و پس از جوشکاری نیز به وسیله عملیات حرارتی بعدی سختی پذیر نمی‌باشند.

۲۰- در جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی به حالت تخت، پاس اول (ریشه) باید به صورت دانه تسبیحی باریک و پیوسته^۱ جوشکاری شود و به وسیله حرکت دست جوشکار می‌توان موج عرضی بسیار کمی نیز در جوش اعمال کرد. در پاس‌های بعدی نیز باید همین رویه را ادامه داد.

۲۱- در جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی به حالت عمودی- سرازیر^۲، روش توضیح داده شده در حالت قبل اعمال شود، با این تفاوت که باید با کج کردن زاویه الکتروود طوری عمل کرد که نیروی قوس مذاب را، با قدرت بیشتری به طرف حوضچه هدایت کرده و در برقراری اتصال قوی‌تر و با نفوذ بالاتر به قوس الکتریکی کمک شود.

۲۲- جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی به حالت عمودی- سربالا^۳، استفاده از یک حرکت موجی سه جانبه را ایجاب می‌کند که عرض موج آن نباید از ۱۰mm کمتر باشد. برای این

۱-Stringer-Bead

۲-Vertical-Down

۳-Vertical-Up



کار باید از الکترودهایی با قطر کوچکتر یا مساوی 4mm استفاده کرد. به این ترتیب، زائده‌ای در کف اتصال در طرف کوچکتر ایجاد می‌شود، بقیه پاس‌ها را باید به وسیله حرکات موجی بسیار کوتاه و کم عرض رو به بالا، روی پاس اول ایجاد کرد.

۲۳- در جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی به حالت سقفی^۱، با حرکات دایره ای شکل الکتروود، حوضچه مذاب کاملاً هم زده می‌شود که از حرکات موجی باید اکیداً خودداری کرد. طول قوس نیز باید بسیار کوتاه (کمتر از ۵mm/۰) و سرعت دست جوشکار تا جای ممکن بالا باشد [۴].

۲۴- ریشه جوشهایی که در آنها از پشت بند استفاده نشده است یا جوشهای شیاری با پخ V دو طرفه، باید قبل از جوشکاری طرف دوم، کاملاً تمیز گردند. در این حالت سطح ریشه جوش ممکن است نیاز به عملیات سنگ زنی یا رویه برداری قوسی داشته باشد تا فلز جوش سالمی بدست آید و نفوذ کامل جوش به وسیله جوش پستی حاصل گردد.

۲۵- پوششهایی که برای الکترودهای فولاد زنگ نزن به کار می‌رود، سرباره ناشی از آنها حاوی فلورایدی می باشند که در صورت عدم حذف سرباره از سطوح فولاد زنگ نزن- شامل ریشه جوش- در شرایط سرویس این فلورایدها می‌توانند بسیار خورنده باشند و خوردگی شیاری و حفره‌ای را تسریع کنند و همچنین منجر به ترک ناشی از خوردگی تنشی شوند (SCC). در صورتیکه جوش به صورتی است که دستیابی به سمت پشتی اتصال مقدور نیست، برای ایجاد پاس ریشه نباید از فرآیند SMAW استفاده کرد و به جای آن باید فرآیندهای GMAW، GTAW یا PAW مورد استفاده قرار گیرد.

۲۶- گاهی اوقات در یک طرف و یا دو طرف اتصال، عیب سوختگی کنار جوش^۲ ایجاد می‌گردد که معمولاً در زمانیکه جوشکاری در موقعیتهای عمودی و بالای سر جایی که کنترل حوضچه جوش مذاب مشکل است، بروز این عیب بیشتر است. سوختگی کناره جوش می‌تواند ناشی از جریان بیش از حد جوشکاری یا حرکت نامناسب الکتروود حاصل شود.

۲۷- رطوبت موجود در پوشش الکتروودها می‌تواند منجر به تخلخل در فلز جوش شود، از این رو خشک کردن و نگهداری آنها با هدف جلوگیری از جذب رطوبت محیط ضروریست [۲].

۱-Overhead

۲-Undercut

۲- فرآیند GMAW

در فرآیند GMAW، در صورتیکه محافظت کافی توسط گاز خنثی به عمل آید، از دست رفتن عناصر آلیاژی هنگام انتقال فلز پرکننده از میان قوس بسیار کم خواهد بود. عناصر فعال نظیر تیتانیم نیز می‌توانند از میان قوس منتقل شوند. بنابراین در این فرآیند استفاده از فلز پرکننده زنگ نزن ER321 مقصور خواهد بود. در صورت محافظت توسط گاز آرگون، بازدهی انتقال ۹۰٪ گزارش شده است، اندازه استاندارد فلزات پرکننده در محدوده ۰/۵ تا ۳/۲mm قرار دارد.

با استفاده از گاز محافظ آرگون و جریان مستقیم با قطبیت مثبت در صورتیکه دانسیته جریان بالاتر از جریان انتقال باشد و ولتاژ قوس در محدوده ۲۶ تا ۳۳۷ قرار گیرد، انتقال فلز از الکترود به قطعه کار، به صورت اسپری خواهد بود. مقدار جریان آستانه برای انتقال اسپری پایدار در حدود ۳۰۰A برای الکترود ۱/۶mm می‌باشد.

انتقال فلز می‌تواند به صورت اتصال کوتاه و اسپری پالسی باشد. این شرایط در فرآیند GMAW، در جریانهای پایین‌تر و مقدار ولتاژ بین ۱۸ تا ۲۴۷ حاصل می‌گردد. در این حالت، به دلیل حرارت ورودی کمتر نسبت به انتقال اسپری جوشهایی با اعوجاج کمتر به وجود خواهد آمد.

گازهای محافظ مورد استفاده برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی شامل آرگون، آرگون-اکسیژن، آرگون-هلیوم و هلیوم-آرگون حاوی دی اکسید کربن می‌باشد. مخلوط آرگون-اکسیژن منجر به مقداری اکسیداسیون در حوضچه جوش می‌شود که موجب عمل تر کنندگی بهتر و بهبود پایداری قوسی نسبت به آرگون خالص می‌شود.

برای جوشکاری با حالت انتقال اسپری کاربرد آرگون-۱٪ اکسیژن بسیار معمول است. مخلوط آرگون-هلیوم همراه با ۲ تا ۳٪ دی اکسید کربن معمولاً جهت جوشکاری فولادهای زنگ نزن با حالت انتقال فلز اتصال کوتاه به کار می‌رود. استفاده از گاز دی اکسید کربن خالص منجر به از دست رفتن مقادیر زیادی از سیلیسیم و منگنز، همچنین افزایش کربن در رده‌های کم کربن فولادهای زنگ نزن خواهند شد. جذب کربن می‌تواند کاهش مقاومت به خوردگی را همراه داشته باشد در نتیجه گاز CO₂ برای جوشکاری فولاد زنگ نزن توصیه نمی‌گردد[۲].

۳- فرآیند GTAW

مهمترین نکات قابل توجه در این فرآیند عبارتند از:

- ۱- روش TIG برای جوشکاری ورق‌های فولاد زنگ نزن آستنیتی از ضخامت ۰/۰۵ تا ۶/۲۵mm میلی‌متر مناسب است.



۲- برای جوشکاری ورق‌های ضخیم‌تر از ۵mm باید قبل از جوشکاری، لبه‌سازی انجام شود و تا ضخامت‌های حدود ۱۲/۵mm با چند پاس امکان برقراری اتصال به روش TIG وجود دارد. جوش TIG در مورد ورق‌های ضخیم‌تر از ۱۲/۵mm هرگز از استحکام لازم برخوردار نخواهد بود.

۳- چندین نوع الکترود تنگستن خالص، تنگستن به علاوه توریم ERT_h2، تنگستن به علاوه زیرکونیم در قطرهای گوناگون و طول‌های مختلف برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی توصیه شده است. تنگستن خالص، برای جوشکاری‌های دستی مناسب بوده و کروی شدن نوک الکترود ضمن جوشکاری سبب بروز قوس ملایم می‌گردد. الکترود تنگستن به علاوه توریم که نوک آن به صورت مخروطی تراشیده می‌شود و همچنین الکترود تنگستن به علاوه زیرکونیم برای جریان AC مناسب می‌باشند.

۴- برای دستیابی به بهترین نفوذ جوش، استفاده از جریان DC با قطب مثبت (DCEP) توصیه شده است.

۵- گاز آرگون در هنگام جوشکاری TIG دستی ورق‌های ضخیم‌تر از ۱/۵mm به کار می‌رود، زیرا در برابر تغییرات طول قوس و تکنیک جوشکاری حساس نمی‌باشد.

۶- کاربرد گاز هلیم برای قطعات سنگین و ضخیم، و در مواردی که می‌توان حرارت ورودی را به اندازه کافی بالا برد، در حالت جوش اتوماتیک، ترجیح داده می‌شود (از نظر اقتصادی، گاز هلیم گران‌تر از گاز آرگون است).

۷- از روش TIG، برای ایجاد پاس ریشه در جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی نیز استفاده می‌شود، زیرا در بعضی مواردی که ضخامت قطعه کار زیاد است ترجیح داده می‌شود که پاس ریشه را با روش TIG ایجاد کنند و بقیه اتصال را با روش‌های دیگر مانند SAW یا SMAW پرکنند.

۸- در صورتی که لازم باشد نرخ رسوب در روش جوشکاری TIG در فولادهای زنگ نزن آستنیتی افزایش یابد، بهتر است با سیم گرم، کار شود. در روش سیم گرم، منبع قدرت جداگانه‌ای، مفتول پرکننده را گرم کرده و به طور خودکار به محل حوضچه و نقطه برقراری قوس هدایت می‌کند.

۹- روش TIG در حالت دستی در وضعیت‌های تخت، افقی، عمودی و سقفی و در حالت اتوماتیک در وضعیت‌های عمودی و سقفی نیاز به استفاده از فیکسچرها و نگه‌دارنده‌های ویژه دارد.



۱۰- سیم جوش‌های قابل استفاده در جوشکاری TIG فولادهای زنگ نزن آستنیتی در استاندارد AWS: A5.9-81 طبقه‌بندی شده‌اند.

۱۱- معمولاً در جوشکاری لوله‌های زنگ نزن از روش TIG استفاده می‌کنند زیرا در روش TIG دستی و اتوماتیک، ابزار جوشکاری به گونه‌ای است که امکان مانور برای جوشکاری یا اپراتور در محل اتصال لوله‌ها به یکدیگر را فراهم می‌آورد.

۱۲- عدم محافظت کافی از حوضچه جوش منجر به آلودگی نیتروژن در فلز جوش شده، و میزان فریت ترکیب شیمیایی فلز جوش تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۴].

۴- فرآیند SAW

فرآیند SAW به طور متداول جهت اتصال اغلب فولادهای زنگ نزن آستنیتی به خودشان و در روکش‌دهی فولاد کربنی و فولاد کم آلیاژ توسط فولاد زنگ نزن آستنیتی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مشکلاتی که در SAW مشاهده می‌شوند، شامل حرارت ورودی بالا، مهره‌های جوشکاری بزرگ و سرعت سرد شدن و انجماد پایین می‌باشد. این عوامل منجر به افزایش تمایل به جدایش عناصر آلیاژی و درشت شدن ریزساختار می‌شود. مهره‌های جوش بزرگ می‌تواند به ویژه در فلزات جوش کاملاً آستنیتی منجر به افزایش حساسیت به بروز ترک شود. به نظر می‌رسد این نوع ترک خوردگی مربوط به ناخالصی‌های فلز جوش و الگوی انجمادی مهره باشد.

عناصری از قبیل سیلیسیم، گوگرد و فسفر زمانیکه در مقادیر بیش از حد انجماد وجود داشته باشد، مضر می‌باشند. از طرف دیگر منگنز و کربن در محدوده مجاز مفید هستند. مقدار سیلیسمی که از فلاکس به درون فلز جوش انتقال می‌یابد، می‌تواند در فرآیند SAW بیشتر از جوشهای ایجاد شده در روشهای دیگر باشد. مقادیری از سیلیسیم می‌تواند در نتیجه واکنشهای فلز-سرباره دمای بالا به فلز جوش انتقال داده شود و به درون محلول رفته یا ناخالصیهایی را در فلز جوش ایجاد کند. فسفر و گوگرد نیز می‌توانند از فلاکس و فلز پایه (به دلیل رقیق شدن ناشی از فلز پایه) انتقال داده شوند.

• دستورالعملهای جوشکاری

منابع الکتریکی جریان متناوب و مستقیم به طور متداول برای SAW استفاده می‌شوند. اگرچه جریان مستقیم به ویژه در جوشکاری مواد نازک ترجیح داده می‌شود. بسیاری از طرحهای اتصال و شرایط جوشکاری مورد استفاده برای فولاد ساده کربنی به طور تقریبی قابل استفاده برای فولاد زنگ نزن می‌باشند. به جز آنکه جریان جوشکاری برای فولاد زنگ نزن باید ۲۰ درصد پایین تر از



مقدار مورد استفاده برای جوش مشابه در فولاد کربنی باشد. مقاومت الکتریکی بالاتر و درجه حرارت ذوب کمی پایین تر فولاد زنگ نزن آستنیتی منجر به نرخ رسوبی می شود که ۲۰ تا ۳۰٪ بالاتر از این مقدار در فولاد کربنی می باشد. در جدول ۲۵ نمونه هایی از شرایط جوشکاری برای جوش های با پنخ V دو طرفه برای ورق فولاد زنگ نزن آمده است.

جدول ۲۵: شرایط جوشکاری قوس زیر پودری اتصالات شیار با پنخ V دو طرف در صفحه فولاد زنگ نزن آستنیتی [۲].

Plate thickness, in.	Root face, in.	First Weld				Second Weld			
		Electrode diam., in.	Welding current, A	Voltage, V	Travel speed in./min.	Electrode diam., in.	Welding current, A	Voltage, V	Travel speed in./min.
0.375	0.25	0.188	525	30	20	0.188	575	32	24
0.50	0.25	0.188	700	35	18	0.188	900	33	18
0.625	0.25	0.188	700	33	16	0.250	900	35	12
0.75	0.25	0.250	700	33	15	0.250	950	35	12
0.875	0.31	0.250	715	33	15	0.250	1025	35	12

a. Groove angle-90 degrees

به دلیل مقاومت الکتریکی فولاد زنگ نزن آستنیتی میزان طول موثر سیم جوش^۱ نسبت به فولاد ساده کربنی بحرانی تر است. حرارت مقاومتی الکتروود قبل از اینکه وارد قوس شود می تواند نرخ رسوب را تحت تاثیر قرار دهد. به دلیل مقاومت بالاتر فولاد زنگ نزن آستنیتی و درجه حرارت ذوب پایین تر در شرایط جوشکاری مشابه نرخ ذوب الکتروود فولاد زنگ نزن آستنیتی حدوداً ۳۰٪ بالاتر از الکتروود فولاد ساده کربنی می باشد.

• درجه رقیق شدن

کنترل درجه رقیق شدن می تواند مهمترین عامل در SAW فولادهای زنگ نزن آستنیتی باشد. رقیق شدن ناشی از فلز پایه در این فرآیند می تواند از مقادیر کمتر از ۱۰٪ تا ۷۰٪ متفاوت باشد. اغلب موارد مطلوب و گاهی الزامی است که ترکیب شیمیایی فلز جوش در بازه های کوچکی نگه داشته شود و کنترل درجه رقیق شدن برای حصول این امر لازم می باشد.

حدود ۴ تا ۱۰٪ فریت دلتا در فلز جوش جهت کنترل ترک گرم مطلوب می باشد. میزان فریت بیش از این حد می تواند منجر به تردی فاز سیگما در درجه حرارت بالا گردد. رقت ناشی از فلز پایه

۱- Stick- Out



کمتر از ۴۰٪ به طور متداول جهت ایجاد جوشهای سالم و بی عیب در فولاد زنگ نزن آستنیتی لازم می‌باشد.

• الکترودها

انواع الکترودهای فولاد زنگ نزن آستنیتی مورد استفاده در فرآیند SAW در جدول ۳ فهرست شده است. با کنترل مناسب ترکیب شیمیایی، انواع الکترودها بجز الکترودهای کاملاً آستنیتی ER310 و ER320 می‌تواند به طور موثر و مفید در فرآیند SAW مورد استفاده قرار گیرد. فولادهای زنگ نزن کاملاً آستنیتی تمایل به ترک گرم دارند و جوشکاری آنها با فرایند SAW توصیه نمی‌شود.

• فلاکس

فلاکس های مورد استفاده در فرآیند SAW فولاد زنگ نزن آستنیتی از نظر متالورژیکی براساس اثرشان روی فلز جوش خنثی یا بازی می‌باشند. مشخصات استاندارد برای فلاکس های فولاد زنگ نزن وجود ندارد و عموماً مشاوره با سازنده توصیه می‌شود. فلاکس های مورد استفاده در فرآیند SAW فولادهای کربنی برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن مناسب نیستند که این امر بدلیل کاهش کروم به دلیل انتقال به فلاکس و تجمع منگنز و سیلیسیم در فلز جوش از فلاکس می‌باشد [۲].

۸- فولادهای زنگ نزن دو فازی

فولادهای زنگ نزن دو فازی را به نحوی آلیاژسازی کرده و تهیه می کنند که دارای ریزساختاری متشکل از مقادیر تقریباً یکسان فریت و آستنیت باشد. فاز فریت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی به عنوان یک فلز جوش یا جزء ریختگی آلیاژ که ترک گرم را کاهش می دهد محسوب می شود، فولادهای زنگ نزن دو فازی خانواده جدیدی از این نوع فولادها می باشند که با انتخاب صحیح نوع و درصد عناصر آلیاژی و فرآیند تولید، مقادیر تقریباً یکسانی از فریت و آستنیت دارند. این میکروساختار و ماهیت ترکیب شیمیایی این فولاد که حاوی درصد نسبتاً زیادی از کروم و مولیبدن است موجب شده است تا این فولادها با استحکامی تقریباً دو برابر استحکام فولادهای زنگ نزن آستنیتی آیل شده، از مقاومت بسیار خوب خوردگی در ارتباط با خوردگی های حفره ای، شیاری و تنش در محیط های سولفیدی و کلریدی برخوردار باشد. مشابه با فولادهای زنگ نزن آستنیتی در اینجا نیز با بهبود شرایط فولادسازی نظیر استفاده از روش AOD و آلیاژسازی با مقادیر کم عناصر بین نشینی



امکان تهیه فولادهای زنگ نزن دو فازي که دارای انعطاف پذیری و چقرمگی خوبی باشند وجود دارد. شایان توجه است که فولادهای زنگ نزن دو فازي هم در شرایط کار شده و هم در شرایط ریختگی تهیه شده اند [۱].

به دلیل آنکه این فولادها دارای میزان فریت بالاتری نسبت به فولادهای آستنیتی هستند. فعالیت فرومغناطیسی بیشتری داشته و دارای هدایت حرارتی بالاتر و انبساط حرارتی کمتری می باشند. فولادهای زنگ نزن دو فازي نسبت به انواع فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارای استحکام قابل توجهی می باشند. استحکام تسلیم آنها بالاتر از ۴۲۵ MPa است در حالی که برای انواع آستنیتی این مقدار در حدود ۲۱۰ MPa می باشد. علاوه بر استحکام، سختی این فولادها نیز در مقایسه با انواع آستنیتی بالاتر بوده و کاربرد آنها را در محیط هایی که سایش نیز به همراه خوردگی وجود دارد افزایش می دهد. محدوده دمایی کاربرد فولادهای زنگ نزن دو فازي بین ۴۰- تا ۲۸۰°C می باشد. انبساط حرارتی فولادهای زنگ نزن دو فازي بسیار نزدیک به فولادهای کم آلیاژ و کربنی است. به همین دلیل آلیاژهای دو فازي در مصارفی همچون مخازن تحت فشار با فولادهای کربنی سازگار می شوند. استفاده از فولادهای دو فازي نسبت به انواع آستنیتی به دلیل نزدیکی انبساط حرارتی آنها با فولاد کربنی، تنشهای وارده را کاهش می دهد. با این حال به دلیل واکنشهای رسوبگذاری در دماهای نسبتاً پایین در این فولادها، استفاده از آنها در مصارفی که نیاز به اعمال تنش زدایی حرارتی دارند (همچون عملیات حرارتی پس از جوش) مناسب نمی باشند.

۸-۱- آلیاژها و مواد مصرفی

در جدول ۲۶ ترکیب شیمیایی تعدادی از فولادهای زنگ نزن دوفازي آمده است. مواد مصرفی برای جوشکاری به گونه ای انتخاب می شود تا تعادل فازي مناسب در رسوب جوش و مقاومت به خوردگی لازم حداقل برابر با خود فلز پایه فراهم شود. معمولاً مقدار نیکل فلزات پرکننده جوش نسبت به فلز پایه افزایش داده می شود تا حین سرد کردن سریع جوش، آستنیت زدایی تشویق شود. یکی از این فلزات پرکننده که دارای ۹٪ Ni می باشد AWS ER/E2209 می باشد که معمولاً برای فلزات پایه ای همچون ۲۳۰۴ و ۲۲۰۵ که دارای ۵٪ Ni هستند به کار می رود. در جدول ۲۷ ترکیب شیمیایی تعدادی از فلزات پرکننده براساس استاندارد AWS ارائه شده است.



جدول ۲۶: ترکیب شیمیایی گروهی از فولادهای زنگ نزن دوفازی فریت-آستنیتی [۳].

Type ^a	UNS No. ^a	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

^aA single value is a maximum.

جدول ۲۷: ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده مورد استفاده در جوشکاری فولاد زنگ نزن دوفازی فریتی-آستنیتی [۳].

Class	Source ^a	Composition (wt%) ^a										
		C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W
E2209-XX	A5.4	0.04	0.5–2.0	0.04	0.03	1.00	21.5–23.5	8.5–10.5	2.5–3.5	0.08–0.20	0.75	—
ER2209	A5.9	0.03	0.50–2.0	0.03	0.03	0.90	21.5–23.5	7.5–9.5	2.5–3.5	0.08–0.20	0.75	—
E2209TX-X	A5.22	0.04	0.5–2.0	0.04	0.03	1.0	21.0–24.0	7.5–10.0	2.5–4.0	0.08–0.20	0.5	—
E2552-XX	A5.4	0.04	1.0	0.04	0.03	1.00	24.0–27.0	4.0–6.0	1.5–2.5	0.08–0.22	2.5–3.5	—
E2553-XX	A5.4	0.06	0.5–1.5	0.04	0.03	1.00	24.0–27.0	6.5–8.5	2.9–3.9	0.10–0.25	1.5–2.5	—
E2553TX-X	A5.22	0.04	0.5–1.5	0.04	0.03	0.75	24.0–27.0	8.5–10.5	2.9–3.9	0.10–0.20	1.5–2.5	—
ER2553	A5.9	0.04	1.5	0.04	0.03	1.0	24.0–27.0	4.5–6.5	2.9–3.9	0.10–0.25	1.5–2.5	—
E2593-XX	A5.4	0.04	0.5–2.5	0.04	0.03	1.00	24.7–27.0	8.5–11.0	2.9–3.9	0.08–0.25	1.5–3.0	—
E2594-XX	A5.4	0.04	0.5–2.0	0.04	0.03	1.00	24.0–27.0	8.0–10.5	3.5–4.5	0.20–0.30	0.75	—

^aA single value is a maximum.

^aAWS standard.

۲-۸- متالورژی فیزیکی

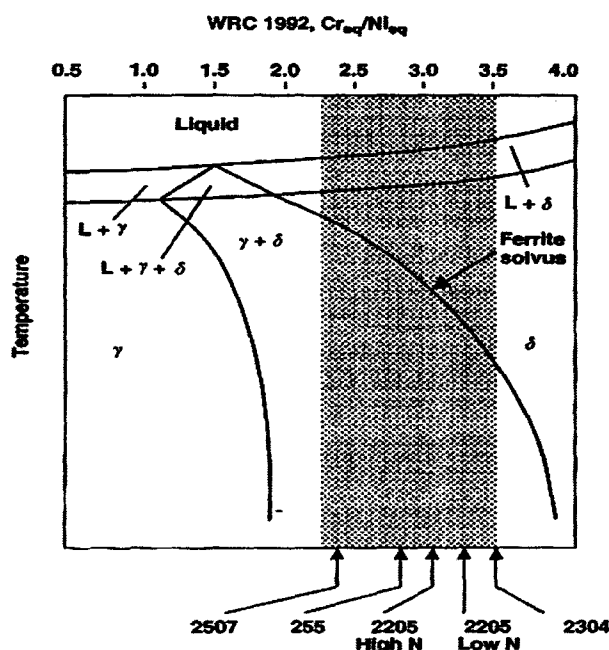
۲-۸-۱- تعادل فازی آستنیت-فریت

فولادهای زنگ نزن دوفازی بر پایه سیستم آلیاژی Fe-Cr-Ni-N می‌باشند. ترکیب شیمیایی آنها طوری تنظیم می‌گردد که ریزساختار فلز پایه شامل ۵۰٪ آستنیت شود و به همین دلیل دوفازی نامیده می‌شوند. با این حال تمامی این فولادها به صورت تقریباً ۱۰۰٪ فریتی جامد می‌شوند و ریزساختار نهایی آنها وابسته به دگرگونی حالت جامد به آستنیت است. نیتروژن معمولاً به عنوان عنصر آلیاژی افزوده می‌شود تا این دگرگونی را سرعت بخشیده و پایداری فاز آستنیت را افزایش دهد ضمن اینکه مقاومت به خوردگی حفره‌ای را نیز بهبود می‌بخشد. Mo، W و Cu نیز از جمله عناصری



هستند که برای افزایش مقاومت به خوردگی به برخی از فولادها افزوده می‌شوند. به دلیل بالاتر بودن میزان عناصر آلیاژی و ضمناً دقت بیشتر فرآیندهای ترمومکانیکی قطعات کار شده، قیمت تمام شده فولادهای زنگ نزن دوفازی از انواع آستنیتی بیشتر خواهد بود.

فولادهای زنگ نزن دوفازی نسبت به انواع آستنیتی دارای عناصر فریت‌زای بیشتری در مقایسه با عناصر آستنیتی‌زا می‌باشند و از اینرو انجماد اولیه آنها تقریباً ۱۰۰٪ فریتی است. شکل ۶۴ نشان می‌دهد آلیاژهایی که کروم معادل آنها بر اساس دیاگرام WRC1992 تقریباً ۱/۸۵ برابر نیکل معادل یا بیشتر باشد، به صورت ۱۰۰٪ فریتی جامد خواهند شد که این نسبت در فولادهای زنگ نزن دوفازی معمولاً بین ۲/۲۵ تا ۳/۵ می‌باشد. در دماهای بالا (بالاتر از خط انحلال فریت) این آلیاژها ۱۰۰٪ فریتی باقی می‌مانند. آستنیت فقط در زیر دمای انحلال فریت می‌تواند جوانه‌زنی و رشد کند. بنابراین آنیل کردن و کارگرم این فولادها معمولاً در زیر دمای انحلال فریت صورت می‌گیرد تا هر دو فاز آستنیت و فریت بتواند در تعادل با هم حضور داشته باشند. با کنترل دمای فرآیند و سرعت سرد کردن می‌توان نسبت و توزیع هر یک از این فازها را در محصول کار شده نهایی تعیین کرد.



شکل ۶۴: محدوده دمایی بالا در دیاگرام فازی شبه دوتایی برای ترکیب‌های شیمیایی فولاد زنگ نزن دوفازی. منطقه هاشورخورده محدوده آلیاژهای تجاری را مشخص می‌کند [۲].

۸-۲-۲- واکنشهای رسوب گذاری

به دلیل آلیاژسازی پیچیده فولادهای زنگ نزن دو فازی واکنشهای رسوب گذاری مختلفی در محدوده دمایی کمتر از تقریباً 1000°C می تواند رخ دهد. با توجه به شکل ۶۵ تمام این واکنشهای رسوب دهی. وابسته به زمان و دما می باشند. بسیاری از این رسوبها، منجر به تردی آلیاژهای دو فازی شده و باید از تشکیل آنها جلوگیری به عمل آید. این رسوبات شامل فاز سیگما (σ) فاز چی (χ) آلفا پریم (α') و نیتريد کروم می باشد. توجه به این نکته مهم است که با افزودن یا افزایش کروم، مولیبدن و تنگستن، تشکیل این رسوبات، به خصوص فازهای سیگما و چی تسريع می شود. این تسريع در رسوب گذاری، در هنگام عملیات PWHT یا جوشکاری چندپاسه شرایط را برای تردی فراهم می کند. واکنشهای رسوب گذاری در دماهای کمتر، استفاده از آلیاژهای دوفازی را تا دماهای زیر 280°C به طور مؤثر محدود می کند.

۸-۳- خواص مکانیکی

خواص کششی فولادهای زنگ نزن دو فازی کار شده در ASTM A240 و برای فولادهای ریختگی در ASTM A890 ارائه شده است. حداقل خواص مکانیکی این فولادها در جدول ۲۸ آمده است. آلیاژهایی حاوی مقادیر بالاتر کروم و نیتروژن (آلیاژهای سوپر دوفازی) دارای استحکام بالاتری نسبت به آلیاژهای استاندارد می باشد.

جدول ۲۸: خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن دو فازی فریتی-آستنیتی [۳].

Type ^a	UNS No. ^a	Tensile Strength ^b		Yield Strength ^b		Elongation ^b (%)
		MPa	ksi	MPa	ksi	
—	S32201	620	90	450	65	25.0
2304	S32304	600	87	400	58	25.0
2205 ^c	S31803	620	90	450	65	25.0
2205 ^c	S32205	620	90	450	65	25.0
329	S32900	620	90	485	70	15.0
—	S32950	690	100	485	70	15.0
—	S31260	690	100	485	70	20.0
—	S32520	770	112	550	80	25.0
CD4MCu	—	690	100	485	70	16
CD4MCuN	—	690	100	485	70	16
255	S32550	760	110	550	80	15.0
2507	S32750	795	116	550	80	15.0
—	S32760	750	108	550	80	25.0
CD3M-WCuN	—	690	100	450	65	25

^aThe compositions are grouped according to similar Cr first, then similar N, then Mo.

^bA single value is a minimum.



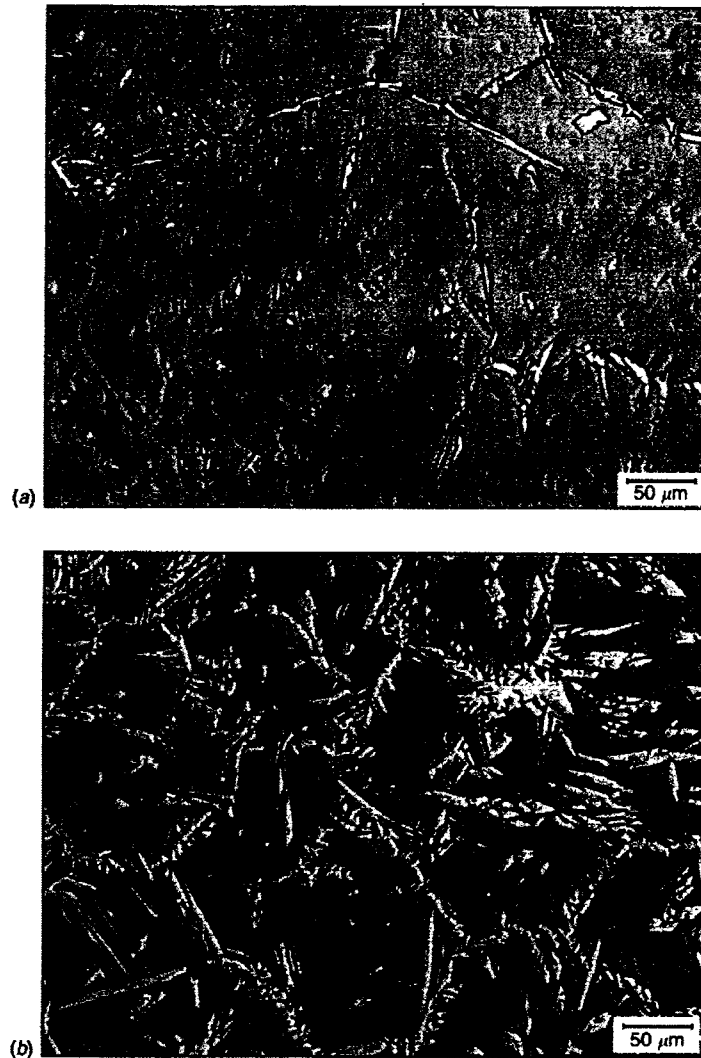
۸-۴- متالورژی جوشکاری

۸-۴-۱- رفتار انجماد

تمام فولادهای زنگ نزن دو فاز با فاز اولیه فریت جامد می‌شوند و در پایان انجماد نیز کاملاً فریتی خواهند بود. بسته به ترکیب شیمیایی، فاز فریت قبل از آنکه در دماهایی زیر خط انحلال در فریت قرار گیرد و استحاله به آستنیت شروع شود، در محدوده دمایی بالاتر پایدار است. طبیعت استحاله فریت به آستنیت بستگی به ترکیب شیمیایی و سرعت سرد شدن دارد. این استحاله است که تعادل نهایی فریت-آستنیت و توزیع آستنیت در فلز جوش را تعیین می‌کند. ترکیب استحاله برای فولادهای زنگ نزن دوفازی به صورت زیر است:

$$L \rightarrow L + F \rightarrow F \rightarrow F + A$$

فلزات جوش فولاد زنگ نزن دوفازی حاوی مخلوطی از آستنیت و فریت می‌باشند. به دلیل آنکه انجماد با فاز فریت آغاز می‌شود و آستنیتی در انتهای انجماد تشکیل نمی‌گردد، فریت در دماهای بالا در صورت حالت جامد، پایدار است. زمانیکه دما به زیر خط انحلال فریت رسید، استحاله به آستنیت آغاز می‌شود، آستنیت ابتدا در امتداد مرزهای دانه فریت تشکیل می‌شود. این پدیده توسط فرآیند جوانه‌زنی و رشد رخ می‌دهد و آستنیت به طور کامل مرزهای دانه فریت را پوشش می‌دهد. آستنیت اضافی ممکن است به صورت صفحات ویدمن اشتاتن بیرون از آستنیت مرزدانه‌ای یا به صورت درون دانه‌ای داخل دانه‌های فریت تشکیل گردد. نمونه‌هایی از ریزساختار فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی دوفازی با میزان فریت بالا و متوسط در شکل ۶۵ نشان داده شده است.



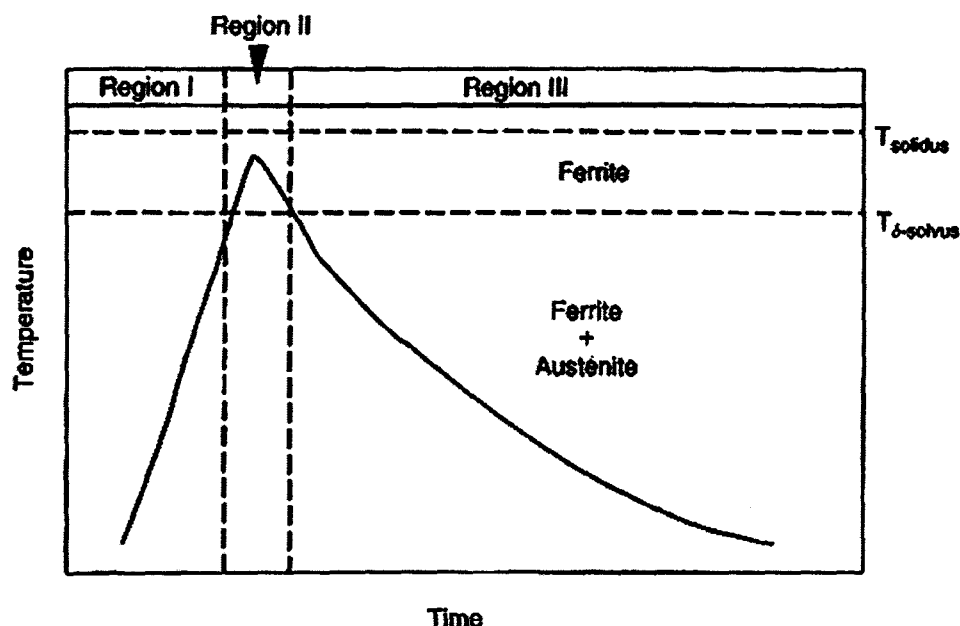
شکل ۶۵: ریزساختار فلز جوش فولادهای زنگ نزن دوفازی (a) میزان فریت بالا ($FN = 100$)
(b) میزان فریت متوسط ($FN = 70$) [۳].

۸-۴-۲- منطقه متأثر از حرارت (HAZ)

سیکل حرارتی HAZ در منطقه مجاور مرز ذوب می‌تواند به سه قسمت مجزا تقسیم گردد. شکل ۶۶ تقسیم‌بندی این سه منطقه را برای فولاد زنگ نزن دوفازی که در دمای بالا ساختار تماماً فریتی دارد (مثل آلیاژ ۲۲۰۵ با $0.1\%N$) نشان می‌دهد. در محدوده زمانی اول فلز پایه تا دمایی نزدیک خط انحلال در فریت گرم می‌شود. در این دما آستنیت با یک فرآیند رشد نفوذی به فریت تبدیل می‌شود تا اینکه ساختار کاملاً فریتی گردد. ضمناً



در این دما تمامی رسوباتی که قبلاً در فرآیندهای ترمومکانیکی ایجاد شده بودند حل خواهند شد. این رسوبات شامل کاربیدها و به خصوص نیتrideها می‌باشند.



شکل ۶۶: سیکل حرارتی HAZ نزدیک خط ذوب فولاد زنگ نزن دوفازی با Cr_{eq}/Ni_{eq} بالا.
واکنشهای مناطق: منطقه ۱، آستنیت به فریت استحال پیدا می‌کند و رسوبات حل می‌شوند.
منطقه ۲، ساختار کاملاً فریتی و رشد دانه‌ها
منطقه ۳، تشکیل مجدد آستنیت و واکنشهای رسوب گذاری (کاربیدها و نیتrideها) [۳].

در محدوده زمانی دوم، بالای خط انحلال در فریت دانه‌های فریت بدون هیچ گونه مزاحمتی از طرف فاز دوم آستنیت یا رسوبات موجود، شروع به رشد می‌کنند. این پدیده مشابه همان رشد سریع دانه‌ها در فولادهای زنگ نزن فریتی است.

در مرحله زمانی سوم با سرد شدن به زیر دمای انحلال فریت، دانه‌های آستنیت شروع به جوانه‌زنی و رشد کرده و رسوبات دوباره شکل می‌گیرند. دگرگونی فریت به آستنیت در آلیاژ مورد نظر به سرعت سرد کردن بستگی دارد که سرعتهای بالاتر جلوی این دگرگونی را گرفته و مقدار فریت را در HAZ بالا می‌برد. برای اندازه‌گیری تأثیر سرعت سرد کردن بر مقدار فریت معمولاً سرعت سرد کردن از دمای $1200^{\circ}C$ به $800^{\circ}C$ (ΔT_{12-8}) را در نظر می‌گیرند. میزان تشکیل رسوبات نیز تابعی از

سرعت سرد کردن می‌باشد. در سرعت‌های بالاتر، که موجب حفظ فریت در ساختار می‌شود، رسوب گذاری کاربیدها و نیتريد‌ها نیز در فاز فریت قابل توجه بیشتر است.

زمان قرارگیری دما بالای خط انحلال فریت تأثیر زیادی بر رشد دانه‌های فریت دارد. در این دما تقریباً هیچ مزاحمتی برای رشد دانه‌ها وجود نداشته و اندازه دانه‌ها به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه اندازه دانه‌های فریت تأثیر زیادی بر چقرمگی و داکتیلیته فولاد دارد، بهتر است که زمان باقی ماندن در منطقه کاملاً فریتی به حداقل خود برسد. این عمل را می‌توان با تنظیم ترکیب شیمیایی (انتخاب آلیاژ) و یا حرارت ورودی جوشکاری و شرایط حرارتی انجام داد. هر چه نسبت C_{req}/Ni_{eq} کاهش یابد، خط انحلال در فریت افزایش و زمان ماندگاری در بالای این دما در یک سیکل حرارتی HAZ مشخص کاهش می‌یابد (شکل ۶۴).

در نسبت C_{req}/Ni_{eq} ثابت، کاهش حرارت ورودی باعث ایجاد گرادیانهای حرارتی شدیدتر شده و زمان ماندن در منطقه تمام فریتی را به حداقل می‌رساند. محدوده دمای خط انحلال در فریت در فولادهای زنگ نزن دو فازی بسته به ترکیب شیمیایی آنها بین ۱۲۵۰ تا ۱۳۵۰°C تغییر می‌کند. بنابراین عرض منطقه کاملاً فریتی در HAZ می‌تواند بسیار متفاوت باشد.

۸-۵- کنترل تعادل فریت-آستنیت

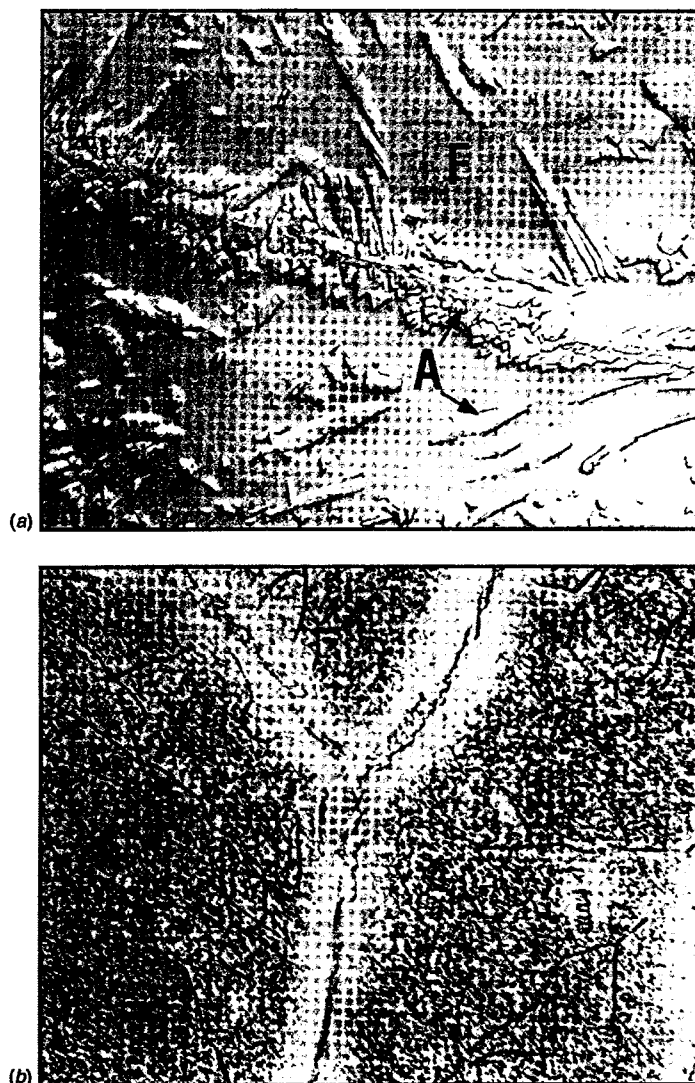
مقدار فریت موجود در جوش را می‌توان با توجه به ترکیب شیمیایی و همچنین شرایط حرارتی جوش کنترل کرد. برای غلبه بر اثر سریع سرد کردن که موجب افزایش مقدار فریت از حد لازم می‌شود، اکثراً فلزات پرکننده دارای مقدار نیکل بیشتری نسبت به فلزات پایه می‌باشند. همچنین بالاتر بودن میزان نیتروژن فلز پرکننده و فلز پایه مفید خواهد بود. هر چند که به هر حال حد نهایی برابر با ۰/۳ تا ۰/۳۵٪ وزنی نیتروژن برای فلزات پرکننده وجود دارد که مقادیر بیشتر از آن موجب ایجاد حفره و تخلخل می‌شود. افزایش مقدار نیکل یا نیتروژن، نسبت C_{req}/Ni_{eq} را کاهش داده و در نتیجه به دلیل افزایش خط انحلال در فریت استحاله آستنیت به فریت در HAZ در دماهای بالاتر صورت می‌گیرد. این امر همچنین شکل گیری آستنیت در حین سرد کردن را تسریع می‌کند. با کنترل دمای پیشگرم و بین پاسی می‌توان سرعت سرد شدن را کاهش داده و اجازه داد تا دگرگونی فریت به آستنیت کامل شود. ممکن است عملیات حرارتی پس از جوش نیز صورت گیرد اما احتیاط‌های لازم برای جلوگیری از ترد شدن می‌بایست در نظر گرفته شود.



هنگامی که فلز پایه انتخاب گردید تعادل فریت- آستنیت در HAZ را فقط می‌توان با تنظیم سیکل حرارتی کنترل کرد. توصیه می‌شود که در همان ابتدای کار در صورت امکان از فلز پایه پر نیتروژن استفاده شود. سرعت‌های بالای سرد کردن در مقاطع ضخیم و یا حرارت ورودی کم موجب بالا رفتن مقادیر فریت در ریزساختار HAZ در نواحی مجاور منطقه ذوب خواهد شد.

۸-۵-۱- اثر سرعت سرد شدن

در سرعت‌های سرد کردن بیش از حد، از بالای خط انحلال در فریت، تعادل فریت- آستنیت می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای به هم خورد. در شکل ۶۷ ریزساختار آلیاژ ۲۵۵ با سرعت سرد کردن معمولی و همچنین با کوئنچ شدن از دمای 1350°C (بالای خط انحلال در فریت) نشان داده شده است. در ریزساختار کوئنچ شده فقط مقدار کمی آستنیت در امتداد مرز دانه‌های فریت مشاهده می‌شود. در درون دانه‌های درشت فریت که در بالای خط انحلال فریت وجود دارند هیچ گونه آستنیتی دیده نمی‌شود. در درون این دانه‌ها واکنش‌های رسوبگذاری انجام می‌شود. این رسوبات، نیتrideهای Cr_2N می‌باشند که به دلیل فوق اشباع شدن سریع نیتروژن در فریت در حین کوئنچ کردن بوجود می‌آیند. این حالت می‌تواند در جوشهای مقاومتی، لیزر، پرتو الکترونی و جوشکاری زائده‌ای فولادهای زنگ نزن دوفازی به وجود آید. به دلیل میزان فریت بیش از حد، خواص مکانیکی (چقرمگی و داکتیلیتی) به شدت کاهش یافته و با تشکیل نیتريد کروم مقاومت به خوردگی نیز کم خواهد شد. بنابراین در هنگام استفاده از روشهای پرنرزی در جوشکاری فولادهای زنگ نزن می‌بایست تمامی احتیاط‌های لازم در نظر گرفته شود.



شکل ۶۷: اثر سرعت سرد شدن از بالای خط انحلال در فریت بر ریزساختار فولاد زنگ نزن دوفازی
(a) سرعت سرد شدن جوش معمول (b) کوئچ شده از بالای خط انحلال در فریت [۳].

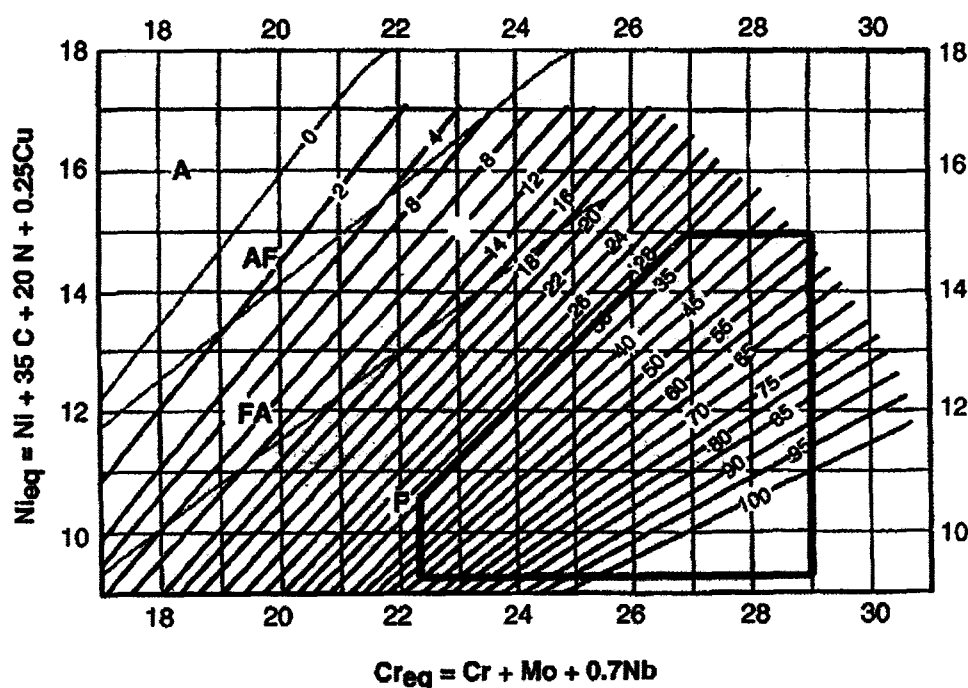
۸-۵-۲- پیش بینی و اندازه گیری فریت

همان ابزاری که در پیش بینی و اندازه گیری میزان فریت در آلیاژهای آستنیتی به کار می روند در فولادهای زنگ نزن دوفازی نیز کاربرد دارند. با استفاده از دیاگرام WRC-1992 می توان فریت را برحسب ترکیب شیمیایی تا ۱۰۰ FN پیش بینی کرد. نوع دیگری از این دیاگرام هنگام استفاده از فلزات پرکنند، غیرهمجنس و یا در جوشکاری آلیاژهای دوفازی به فلزات پایه غیرهمجنس کاربرد دارد. به دلیل فرو مغناطیسی بودن فریت می توان از ابزار مغناطیسی همچون MagneGage،



Inspector Gauge یا Feritscope برای اندازه‌گیری فریت برحسب FN استفاده کرد. در ناحیه HAZ که باریکی آن می‌تواند استفاده از روشهای مغناطیسی را با مشکل مواجه کند، می‌توان از روشهای متالوگرافی برای اندازه‌گیری مقدار فریت استفاده کرد. این روشها، زمانبر بوده و مقدار فریت را به جای FN برحسب درصد حجمی ارائه می‌کند. با تبدیل کلی و خام می‌توان گفت که درصد حجمی تقریباً ۷۰٪ FN است. به عنوان مثال ۱۰۰ FN یعنی اینکه ساختار تقریباً ۷۰٪ حجمی فریت دارد. با استفاده از دیاگرام WRC-1992 می‌توان بسته به ترکیب شیمیایی میزان فریت را برحسب FN و رفتار انجمادی پیش بینی کرد.

در شکل ۶۸ محدوده عدد FN آلیاژهای دوفازی متداول بر روی دیاگرام مشخص شده است. مقدار فریت می‌تواند بین ۳۰ تا ۱۰۰ FN متغیر بوده و ضمناً کل این بازه در محدوده انجماد نوع F انجماد اولیه (کاملاً فریتی) قرار می‌گیرد. در فرآیندهای جوشکاری با محافظت فلاکس (SAW, FCAW, SMAW) دیده می‌شود که خواص فلز جوش مانند چقرمگی و داکتیلیتی با افزایش FN به بالاتر از ۶۰ و یا ۷۰ به شدت کاهش می‌یابد.

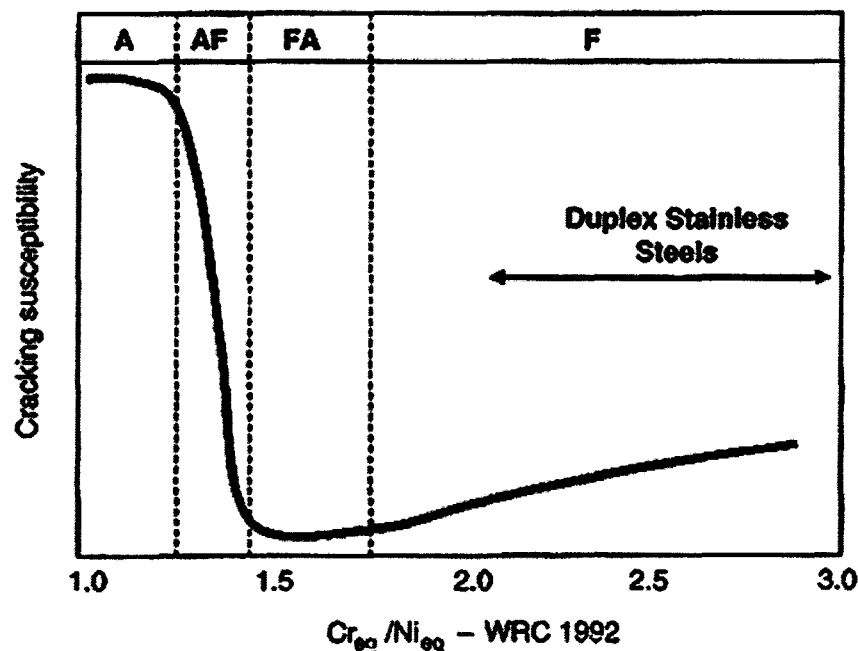


شکل ۶۸: دیاگرام WRC-1992 با محدوده تقریبی ترکیب‌های شیمیایی فولاد زنگ نزن دوفازی [۳].

۸-۶- جوش پذیری

۸-۶-۱- ترک انجمادی جوش

همانطور که در شکل ۶۹ نشان داده شده است، ترک انجمادی تابع ترکیب شیمیایی و نسبت Cr_{eq}/Ni_{eq} می باشد. تمام آلیاژهای دوفازی به فرم F جامد شده و بنابراین ذاتاً قابلیت ترک انجمادی در آنها بیشتر از آلیاژهای آستنیتی است که به فرم FA جامد می شوند. این افزایش به دلیل وجود مرزهای فریت-فریت در پایان انجماد است که نسبت به مرزهای فریت-آستنیت، راحت تر توسط فیلم های نازک مایع تر می شوند. در عین حال قابلیت ایجاد ترک در این آلیاژها از آلیاژهای آستنیتی که به فرم A جامد می شوند کمتر است. در عمل آلیاژهای دوفازی کاملاً در برابر ترک انجمادی جوش مقاومت. این امر ممکن است به دلیل حجم کم ناخالصی ها و تمایل اندک این آلیاژها در تشکیل فیلم های مایع پیوسته در مرزدانه ها باشد. در بعضی از موارد ترک خوردگی کمی در شرایط به شدت مهار شده گزارش شده است که می توان آنها را با رعایت نکات لازم از میان برد. استفاده از فلزات پرکننده آستنیتی (مثل نوع ۳۰۹) می تواند موجب بهبود مقاومت به بروز ترک شود اما مقاومت به خوردگی فلز جوش را در مقایسه با فلز پایه کاهش می دهند.



شکل ۶۹: احتمال ترک انجمادی جوش براساس Cr_{eq}/Ni_{eq} [۳].



۸-۶-۲- ترک ناشی از هیدروژن (HIC)

هر چند که فولادهای زنگ نزن دوفازی در برابر ترک ناشی از هیدروژن از مقاومت خوبی برخوردارند، اما با این حال گاهی به دلیل وجود مقادیر بالای هیدروژن و در عین حال کنترل ضعیف ریزساختار، تخریبهای بسیار پرهزینه‌ای در سازه‌های ساخته شده از این فولادها اتفاق می‌افتد. فلزات جوش با مقدار FN بالا در صورت وجود هیدروژن و تنش زیاد، قابلیت ترک هیدروژنی را دارا می‌باشند. بهترین راه جلوگیری از ترک هیدروژنی در آلیاژهای دوفازی، کنترل مقدار FN رسوب فلز جوش است. در صورت وجود آستنیت کافی در ساختار، به دلیل حضور شبکه‌های پیوسته آستنیت نه فقط در طول مرزدانه‌ها بلکه در درون دانه‌های فریت، نفوذ هیدروژن به شدت محدود می‌شود.

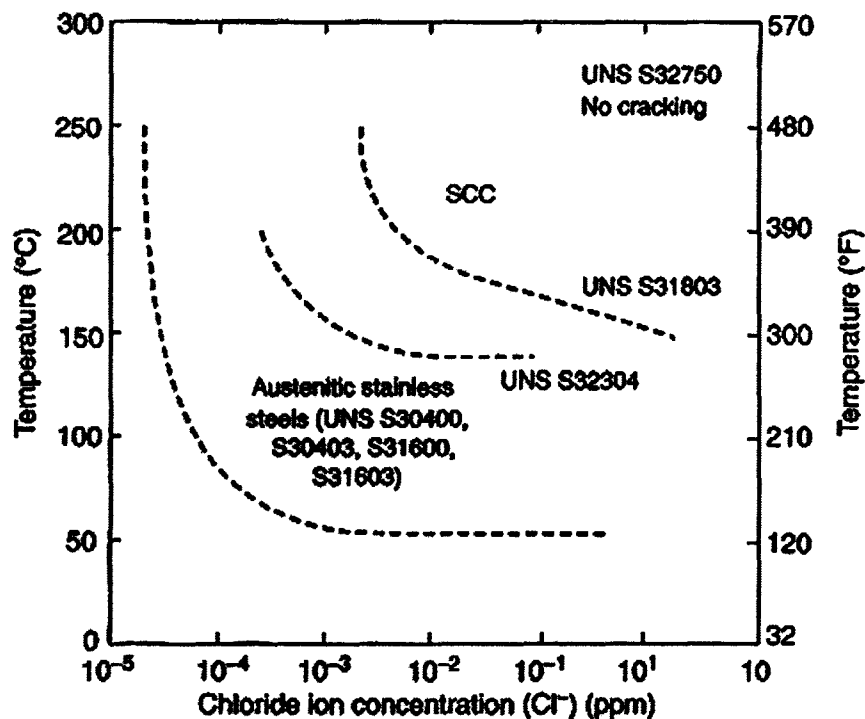
۸-۶-۳- تردی دمای میانی

تشکیل فازهای بین فلزی تأثیر مخربی بر خواص چقرمگی، داکتیلیته و مقاومت به خوردگی دارد. به دلیل بالا بودن مقادیر Cr و Mo فولادهای زنگ نزن دوفازی، این آلیاژها در صورت قرار گرفتن در دماهای مناسب مستعد تشکیل ترکیبات بین فلزی خواهند بود. به همین دلیل حداکثر دمای مناسب سرویس برای این فولادها حدود 280°C می‌باشد. تردی دمای میانی می‌تواند ناشی از تشکیل فازهای آلفا پریم و سیگما باشد.

۸-۷- مقاومت به خوردگی

۸-۷-۱- ترک خوردگی تنشی (SCC)

فولادهای زنگ نزن دوفازی به دلیل مقاومت به خوردگی بالای خود نسبت به فولادهای آستنیتی ترجیح داده می‌شوند. این فولادها بخصوص در محیط‌های کلرایدی به دلیل Ni کم و Cr بالای خود به SCC مقاومت دارند. در شکل ۷۰ نمودار مقاومت به SCC به صورت تابعی از دما و غلظت یون Cl^- نشان داده شده است.



شکل ۷۰: مقاومت به ترک خوردگی تنش فولادهای زنگ نزن دوفازی [۳].

۸-۷-۲- خوردگی حفره‌ای

خوردگی حفره‌ای پدیده‌ای است که در آن حملات خوردگی بر روی سطح به طور موضعی ظاهر شده و به سرعت تبدیل به حفره‌های عمیق می‌گردد و یکپارچگی ساختار را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در فولادهای زنگ نزن این خوردگی در درجه اول تابع ترکیب شیمیایی آلیاژ بوده و برای بیان این رابطه فرمولهای متعددی برای ثابت مقاومت به خوردگی حفره‌ای (PRE) معرفی شده اند که معروفترین آنها در زیر نشان داده شده است. به تأثیر زیاد نیتروژن در مقاومت به خوردگی حفره‌ای در این فرمول توجه شود.

$$PRE_N = Cr + 3.3(Mo + 0.5W) + 16N$$



۹- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی

فولادهای زنگ نزن رسوب سختی (PH^1) برای دستیابی به استحکام و چقرمگی بالا و در ضمن داشتن مقاومت خوب خوردگی توسعه یافته‌اند. محدودیتهای افزایش استحکام فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فریتی توسط تشکیل محلول جامد و کرنش سختی، همچنین انعطاف پذیری و چقرمگی محدود فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی (که دارای درصد کربن زیاد و در نتیجه سختی بالایی هستند) منجر به تولید و گسترش این نوع فولادها شده است. فولادهای زنگ نزن رسوب سختی بخش مهمی از استحکام خود را از طریق واکنشهای رسوب گذاری بدست می‌آورند.

این فولادها دارای عناصری هستند که در عملیات حرارتی رسوبات دانه ریزی را تشکیل می‌دهند. همچنین سخت کردن اغلب این فولادها با تشکیل مارتنزیت انجام می‌گیرد. میزان عناصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن رسوب سختی باید به خوبی تنظیم شود تا بتوان در دمای اتاق یکی از انواع زمینه‌های مارتنزیت پایدار، آستنیت ناپایدار (که به سادگی بتوان آن را به مارتنزیت تبدیل کرد) و یا آستنیت کاملاً پایدار را داشت. بنابراین طراحی آلیاژ این امکان را فراهم می‌کند که بتوان سه خانواده از فولادهای زنگ نزن رسوب سختی را دارا بود. این سه خانواده عبارتند از: مارتنزیتی، نیمه آستنیتی و آستنیتی.

فولادهای زنگ نزن رسوب سختی در برخی از رده‌ها دارای استحکامی معادل با 1520 MPa می‌باشند. بعلاوه اگر این فولادها به طور مناسب عملیات حرارتی شوند، دارای داکتیلیته و چقرمگی مطلوبی خواهند بود. دماهای کاری برای سرویس های پیوسته این فولادها به حدود 315°C محدود می‌گردد. اگرچه رده‌های آستنیتی این فولادها ممکن است تا دمایهای 650°C یا بالاتر نیز مورد استفاده قرار گیرند. مقاومت به خوردگی اغلب فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مشابه آلیاژ آستنیتی نوع ۳۰۴ می‌باشد. شرایط عملیات حرارتی بر مقاومت به خوردگی مؤثر است و در زمانی که خوردگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است باید به دقت کنترل گردد.

انواع مارتنزیتی این فولادها در ساخت سوپاپ، چرخ دنده‌ها و محورها کاربرد دارند. آلیاژهای رسوب سختی شبه آستنیتی در مواردی چون مخازن تحت فشار، فریم‌های هواپیما و وسایل جراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. فریم‌های موتور جت، سخت افزار و پره‌های توربین نیز از انواع آستنیتی ساخته می‌شوند.

¹-Precipitation Hardening Stainless Steels



۹-۱- آلیاژها و مواد مصرفی

فولادهای زنگ نزن رسوب سختی دارای سیستم نامگذاری شامل سریهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ فولادهای زنگ نزن دیگر نمی‌باشند. اغلب آلیاژهای این گروه براساس نامهای تجاری شناخته می‌شوند. در جدول ۲۹ برخی از فولادهای زنگ نزن رسوب سختی لیست شده‌اند. اغلب آلیاژها، مارتنزیتی یا مخلوطی از مارتنزیت، فریت و میزان کمی از آستنیت می‌باشند. آلیاژهای نوع آستنیتی ۶۶۰ و ۶۶۲ مشابه با سوپر آلیاژهای پایه نیکل از طریق رسوب گاماپریم استحکام دهی می‌شوند و به عنوان سوپر آلیاژهای پایه آهن شناخته می‌شوند. مهمترین مشکل جوشکاری این آلیاژها نیز ترک انجمادی است. تحقیقاتی جهت اصلاح این مشکل انجام شد و فولادی با نام JBK-75 که به طور قابل توجهی مقاومت به ترک انجمادی بالاتری دارد، تولید گردید. به جز آلیاژ 17-4PH (نوع ۶۳۰)، برای سایر آلیاژها فلزات پرکننده با ترکیب شیمیایی منطبق با فلزات پایه در جدول ۲۹ توسط استاندارد AWS طبقه‌بندی نشده است. اغلب فلزات پرکننده تنها به صورت میله‌ها یا سیم‌های جامد برای فرآیندهای GTAW و/یا GMAW تهیه می‌شوند. در جدول ۳۰ ترکیب شیمیایی تعدادی از این فلزات پرکننده لیست شده است.

جدول ۲۹: ترکیب شیمیایی برخی از فولادهای زنگ نزن رسوب سختی [۳].

UNS No.	ASTM Type	Common Name	Nominal Composition (%) ^a										
			C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Other
Martensitic Types													
S13800	XM-13	13-8Mo	0.05	0.20	0.010	0.008	0.10	12.25-13.25	7.50-8.50	2.00-2.50	0.90-1.35	—	N: 0.01
S15500	XM-12	15-5PH	0.07	1.00	0.040	0.030	1.00	14.00-15.50	3.50-5.50	—	—	—	Cu: 2.50-4.50 Nb ^b : 0.15-0.45
S17400	630	17-4PH	0.07	1.00	0.040	0.030	1.00	15.00-17.50	3.00-5.00	—	—	—	Cu: 3.00-5.00 Nb ^b : 0.15-0.45
S17600	635	—	0.08	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-17.50	6.00-7.50	—	0.40	0.40-1.20	—
S45000	XM-25	Custom 450	0.05	1.00	0.030	0.030	1.00	14.00-16.00	5.00-7.00	0.50-1.00	—	—	Cu: 1.25-1.75 Nb ^b : 8 × C-0.75
S45500	XM-16	Custom 455	0.05	0.50	0.040	0.030	0.50	11.00-12.50	7.50-9.50	0.50	—	0.80-1.40	Cu: 1.50-2.50 Nb ^b : 0.10-0.50
Semi-Austenitic Types													
S15700	632	15-7Mo	0.09	1.00	0.040	0.030	1.00	14.00-16.00	6.50-7.75	2.00-3.00	0.75-1.50	—	—
S17700	631	17-7PH	0.09	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	6.50-7.75	—	0.75-1.50	—	—
S35000	633	AM350	0.07-0.11	0.50-1.25	0.040	0.030	0.50	16.00-17.00	4.00-5.00	2.50-3.25	—	—	N: 0.07-0.13
S35500	634	AM355	0.10-0.15	0.50-1.25	0.040	0.030	0.50	15.00-16.00	4.00-5.00	2.50-3.25	—	—	N: 0.07-0.13
Austenitic Types													
S66220	662	Discaloy	0.08	1.50	0.040	0.030	1.00	12.00-15.00	24.00-28.00	2.50-3.50	0.35	1.55-2.00	B: 0.0010-0.010
S66286	660	A-286	0.08	2.00	0.040	0.030	1.00	13.50-16.00	24.00-27.00	1.00-1.50	0.35	1.00-1.50	V: 0.10-0.50 B: 0.0010-0.010
—	—	JBK-75 ^c	0.01-0.03	0.20	0.010	0.006	0.10	13.5-16.0	29.0-31.0	1.0-1.5	0.15-0.35	2.0-2.3	V: 0.1-0.5; B: 0.0020 O: 0.005; N: 0.010

^aA single value is a maximum unless stated otherwise.

^bNb includes incidental Ta.

^cNo UNS number or ASTM specification is known for this alloy, but it is found in a company specification [5,6].



جدول ۳۰: ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن رسوب سختی [۳].

UNS No.	AMS Spec.	Common Name	Nominal Composition (%) ^a										
			C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Other
Martensitic Types													
S13889	5840	13-8Mo	0.05	0.10	0.008	0.010	0.10	12.25-13.25	7.50-8.50	2.00-2.50	0.90-1.35	—	N: 0.01; H: 0.0025
S15500	5826	15-5PH	0.07	1.00	0.040	0.030	1.00	14.00-15.50	3.50-5.50	—	—	—	Cu: 2.50-4.50 Nb ^b : 0.15-0.45
S17480	5825 (AWS A5.9 ER630)	17-4PH	0.05	0.25-0.75	0.04	0.03	0.75	16.00-16.75	4.50-5.00	—	—	—	Cu: 3.25-4.00 Nb ^b : 0.15-0.30
W37410	AWS A5.4	E630-XX	0.05	0.25-0.75	0.04	0.03	0.75	16.00-16.75	4.5-5.0	0.75	—	—	Cu: 3.25-4.00 Nb ^b : 0.15-0.30
S45000	5763	Custom 450	0.05	1.00	0.030	0.030	1.00	14.00-16.00	5.00-7.00	0.50-1.00	—	—	Cu: 1.25-1.75 Nb ^b : 8 × C-0.75
S45500	5617 Grade 2	Custom 455	0.010	0.50	0.010	0.010	0.20	11.00-12.50	7.50-9.50	0.50	—	1.00-1.35	Cu: 1.50-2.50; N: 0.010
Semi-Austenitic Types													
S15789	5812	15-7Mo	0.09	1.00	0.010	0.010	0.50	14.00-15.25	6.50-7.75	2.00-2.75	0.75-1.25	—	H: 0.0025; O: 0.005
S17780	5824	17-7PH	0.09	1.00	0.025	0.025	0.50	16.00-17.25	6.50-7.75	—	0.75-1.25	—	—
S35080	5774	AM350	0.08-0.12	0.50-1.25	0.040	0.030	0.50	16.0-17.0	4.00-5.00	2.50-3.25	—	—	N: 0.07-0.13
S35580	5780	AM355	0.10-0.15	0.50-1.25	0.04	0.03	0.50	15.0-16.0	4.00-5.00	2.50-3.25	—	—	N: 0.07-0.13; Cu: 0.50
Austenitic Types													
S66286	5805	A-286	0.04	0.35	0.01	0.005	0.25	13.50-16.00	24.00-27.00	1.00-1.50	0.35	1.90-2.30	V: 0.10-0.50; B: 0.003-0.005; O: 0.005; N: 0.005; H: 0.0005
—	5811A	JBK-75 ^c	0.01-0.03	0.20	0.010	0.006	0.10	13.5-16.0	29.0-31.0	1.0-1.5	0.15-0.35	2.0-2.3	V: 0.1-0.5; B: 0.0020; O: 0.005; N: 0.010

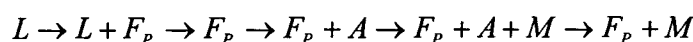
^aA single value is a maximum unless stated otherwise.

^bNb includes incidental Ta.

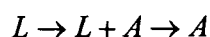
^cNo UNS number or ASTM specification is known for this alloy, but it is found in a company specification [5,6].

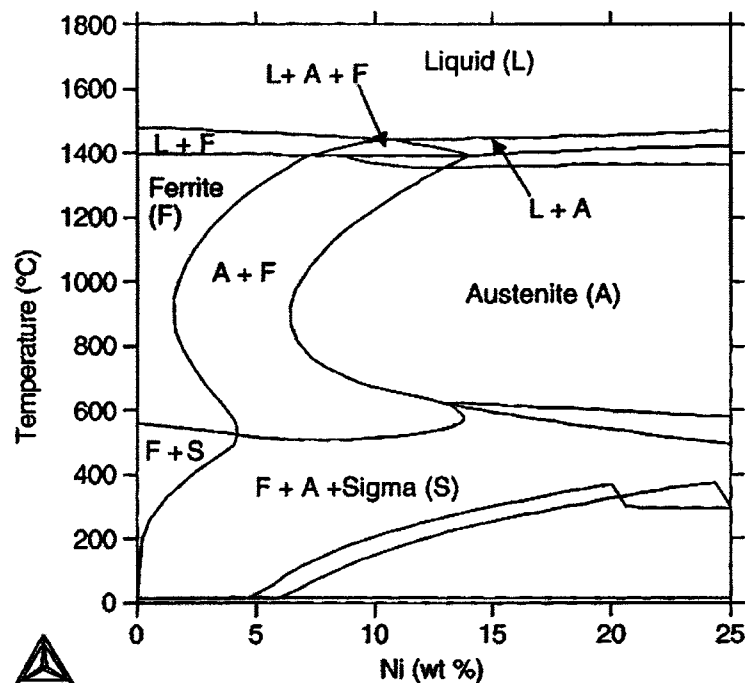
۹-۲- متالورژی فیزیکی و مکانیکی

شکل ۷۱ نشان دهنده دیاگرام شبه دوتایی آلیاژهای ۱٪Ti-۱۶٪Cr با مقدار نیکل متفاوت می باشد. برای آلیاژهایی با محدوده ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی و شبه آستنیتی ترتیب ظاهر شدن فازها در هنگام انجماد از حالت مذاب به صورت زیر می باشد:



از سوی دیگر فولادهای زنگ نزن رسوب سختی آستنیتی به دلیل میزان بالای نیکل (۲۵٪ یا بیشتر) تماماً به صورت ۱۰۰٪ آستنیتی جامد می گردد. برای فولادهای رسوب سختی آستنیتی ترتیب ظاهر شدن فازها در هنگام انجماد از حالت مذاب به صورت زیر می باشد:





شکل ۷۱: دیاگرام شبه دوتایی برای آلیاژ ۰.۰۵٪C-۱۶٪Cr-۱٪Ti-۰.۳٪Mn-۰.۲٪Si-۲۵٪Ni تا ۰

۹-۲-۱- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی

انواع مختلفی از فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی موجود می‌باشد که می‌توان آنها را براساس استحکامشان تقسیم بندی کرد. برخی از آنها دارای استحکام کششی کمتر از ۲۰۰ ksi و برخی دیگر دارای استحکام بالا و بیش از ۲۰۰ ksi می‌باشند. از نظر متالورژیکی این فولادها با یکدیگر مشابه هستند. اغلب آنها تحت عملیات حرارتی انحلالی در دمای حدوداً ۱۰۴۰°C قرار می‌گیرند تا ساختار آنها آستنیتی شود. سپس در عملیات کوئنچ بعدی در دمای بین ۱۵۰ و ۹۰°C آستنیت به مارتنزیت استحاله پیدا می‌کند. اگرچه ممکن است میزان کمی از آستنیت باقیمانده در دمای محیط یا حتی دماهای پائینتر باقی بماند. برخی از این فولادها نظیر ۱۷-۴PH دارای تعداد کمی از رشته‌های فریت در زمینه مارتنزیتی می‌باشند و انجماد این دسته از فولادها به صورت ۱۰۰٪ فریت بوده است. در هنگام سرد شدن فریت به آستنیت استحاله می‌یابد. اما ممکن است برخی از آنها تحت این استحاله قرار نگیرند و در دمای محیط در ریزساختار باقی بمانند. ریزساختار اغلب و به ویژه فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی حاوی رشته‌های فریت می‌باشد.



بعد از عملیات کوئنچ، عملیات پیرسازی انجام می‌گیرد تا استحکام دهی آلیاژ از طریق مکانیزم رسوب گذاری در هنگام عملیات فراهم گردد. دمای پیرسازی برای استحکام حداکثر به رسوب ویژه‌ای که باید تولید شود بستگی دارد. شرایط پیرسازی به صورت یک حرف "H" همراه با دمای پیرسازی بر حسب فارنهایت نشان داده می‌شود (به عنوان مثال H900 یا H1150). در جدول ۳۱ خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن PH براساس عملیات حرارتی ویژه آنها ارایه شده است. نوع رسوباتی که موجب افزایش استحکام این فولادها می‌شوند به عناصر آلیاژی موجود بستگی دارد و بحث‌های مختلفی نیز در این ارتباط وجود دارد.

رسوبی که در فولاد 17-4PH و 15-5PH ایجاد می‌گردد، یک رسوب غنی از مس می‌باشد. ضمن آنکه حضور فریت غنی از کروم (آلفا پریم) و کاربیدها نیز در این فولاد گزارش شده است. در فولاد 13-8Mo رسوبی که موجب افزایش استحکام می‌شود $\beta - NiAl$ می‌باشد، اگرچه کاربیدها و فاز لاهه نیز حضور دارند. Ni_3Ti (گاما پریم)، مهمترین نقش را در استحکام‌دهی آلیاژهای حاوی تیتانیم Custom ۴۵۵ و نوع ۶۳۵ دارد. ضمن آنکه یک فاز لاهه حاوی Fe، Mo و Nb به عنوان رسوبی که موجب افزایش سختی در Custom 450 می‌شود، وجود دارد.

در جدول ۳۱ اثرات فرایبری بر خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن PH مارتنزیتی آمده است. در این جدول حداکثر استحکام در کمترین دمای عملیات پیرسازی حاصل می‌شود. دماهای بالای پیرسازی نیز نسبت به شرایط آنیل انحلالی همچنان موجب افزایش استحکام می‌شوند، اما نه به اندازه زمانی که دما کمتر است. دماهای پیرسازی بالا، داکتیلیته بالاتری و کاهش استحکام ناشی از رشد و کاهش پیوستگی^۱ رسوب در زمینه را همراه خواهد داشت.

۱- Coherency



جدول ۳۱: خواص مکانیکی فولادهای زنگ نزن رسوب سختی کاربیدزیر [۳].

Type	Precipitation Treatment	Tensile Strength		Yield Strength		Elongation (%)	Hardness (Rockwell C)	Charpy (ft-lbf)	V-Notch (J)
		MPa	ksi	MPa	ksi				
Martensitic Precipitation-Hardening Stainless Steels									
13-8Mo	Solution at 927°C (1700°F)	—	—	—	—	—	38 max.	—	—
	510°C (950°F), 4 h	1515	220	1410	205	10	45	—	—
	538°C (1000°F), 4 h	1380	200	1310	190	10	43	—	—
	Solution at 1038°C (1900°F)	—	—	—	—	—	38 max.	—	—
15-5PH and 17-4PH	482°C (900°F), 1 h	1310	190	1170	170	8	40-48	—	—
	496°C (925°F), 4 h	1170	170	1070	155	8	38-46	—	—
	552°C (1025°F), 4 h	1070	155	1000	145	8	35-43	10	14
	579°C (1075°F), 4 h	1000	145	860	125	9	29-38	15	20
635	593°C (1100°F), 4 h	965	140	790	115	10	29-38	15	20
	621°C (1150°F), 4 h	930	135	725	105	10	26-36	25	34
	760°C (1400°F), 2 h, air cool then 621°C (1150°F), 4 h	790	115	515	75	11	24-34	55	75
	Solution at 1038°C (1900°F)	825	120	515	75	5	32 max.	—	—
Custom 450	510°C (950°F), 30 min	1310	190	1170	170	8	39	—	—
	540°C (1000°F), 30 min	1240	180	1105	160	8	38	—	—
	565°C (1050°F), 30 min	1170	170	1035	150	8	36	—	—
	Solution at 1038°C (1900°F)	1140	165	1035	150	4	33 max.	—	—
Custom 455	482°C (900°F), 4 h	1240	180	1170	170	5	40	—	—
	538°C (1000°F), 4 h	1105	160	1035	150	7	36	—	—
	621°C (1150°F), 4 h	860	125	515	75	10	26	—	—
	Solution at 829°C (1525°F)	1205	175	1105	160	3	36 max.S	—	—
	510°C (950°F), 4 h	1525	222	1410	205	3	44	—	—
Semi-Austenitic Precipitation-Hardening Stainless Steels									
15-7Mo	Solution at 1065°C (1950°F)	1035	150	450	65	25	B100 max.	—	—
	760°C (1400°F), 90 min; cool to 15°C (55°F) and hold 30 min; 566°C (1050°F), 90 min; air cool	1310	190	1170	170	4	40	—	—
	954°C (1750°F), 10 min; cool rapidly to ambient; cool to -73°C (-100°F) within 24 h, hold 8 h min. warm to ambient; 510°C (950°F), 1 h	1550	225	1380	200	4	45	—	—



ادامه جدول ۳۱

17-7PH	Solution at 1065°C (1950°F) 760°C (1400°F), 90 min; cool to 15°C (55°F) and hold 30 min; 566°C (1050°F), 90 min; air cool 954°C (1750°F), 10 min; cool rapidly to ambient; cool to -73°C (-100°F) within 24 h, hold 8 h min.; warm to ambient; 510°C (950°F), 1 h Solution at 930°C (1710°F), quench; -73°C (-100°F), 3 h 455°C (850°F), 3 h 540°C (1000°F), 3 h 1038°C (1900°F), quench; -73°C (-100°F), 3 h 954°C (1750°F), 10 to 60 min; water quench; cool to -73°C (-100°F), 3 h; 455°C (850°F), 3 h 954°C (1750°F), 10 to 60 min; water quench; cool to -73°C (-100°F), 3 h; 538°C (1000°F), 3 h	1035 1170 1380 1380 1275 1140 — 1310 1170	150 170 200 200 185 165 — 190 170	450 965 1240 585 1035 1000 — 1140 1035	65 140 180 85 150 145 — 165 150	20 7 6 12 8 8 — 10 12	B92 max. 38 43 30 max. 42 36 40 max. — 37	— — — — — — — — —
633 (AM350)								
634 (AM355)								
662	Solution treat at 955 to 1040°C (1750 to 1900°F), 1 h; quench; age at 675 to 760°C (1250 to 1400°F), 5 h min.; slow cool to 650°C (1200°F), hold 20 h; air cool Solution treat at 900°C (1650°F) for 2 h; quench; age at 705 to 760°C (1300 to 1400°F) for 16 h; air cool	895 895	130 130	585 585	85 85	15 15	— —	— —
A-286								

Source: Data from ASTM [12.13].

*All values are minimum unless stated otherwise. Requirements are for 12.7mm ($\frac{1}{2}$ in.) thickness, or greatest thickness if that thickness is not made. Requirements for other thicknesses may vary slightly.



۹-۲-۲- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی آستنیتی ناپایدار

همانند فولادهای زنگ نزن PH مارتنزیتی انجماد فولادهای آستنیتی ناپایدار نیز به صورت فریت اولیه می‌باشد. در دماهای بالا استحاله فریت به آستنیت رخ می‌دهد، اما مقداری فریت (۵ تا ۱۵٪) در فولادهایی چون 15-7Mo، 17-7PH، AM350 و AM355 در دمای محیط باقی می‌ماند. آنیل انحلالی در دمای ۱۰۴۰ تا ۱۰۶۵°C موجب استحاله فریت به آستنیت و همگن کردن آستنیت می‌شود. سرد کردن سریع تا دمای محیط ریزساختاری آستنیتی را به همراه خواهند داشت. زیرا دمای Ms این فولادها کمتر از دمای اتاق است. این حالت به عنوان حالت A شناخته می‌شود. در این حالت فولاد نسبتاً نرم و داکتیل می‌باشد (جدول ۳۱). این فولاد به راحتی قابل ماشینکاری، کار سرد یا جوشکاری می‌باشد. کارسرد ممکن است سبب ایجاد مقداری مارتنزیت شود.

عملیات سخت کاری برای فولادهای PH آستنیتی ناپایدار نسبت به فولادهای PH مارتنزیتی کمی پیچیده‌تر است. این عملیات شامل سه مرحله است. با توجه به جدول ۳۱، فولاد تا دمایی حرارت می‌بیند که حالت A حاصل شود و ساختار کاملاً آستنیتی گردد. مرحله ۱ حرارت دادن در دمایی است که برخی از کربن‌های محلول در حالت A به صورت کاربید رسوب دهند و موجب افزایش دمای Ms شوند. برای مثال اگر فولاد 17-7PH در ابتدا در حالت A باشد، تا درجه حرارت ۷۶۰°C برای ۹۰ دقیقه حرارت می‌بیند تا رسوبات کافی کاربیدها موجب افزایش دما (بالاتر از دمای اتاق) شوند. در مرحله ۲ سرد کردن تا دمای ۱۵°C انجام می‌گردد تا ریزساختار کاملاً مارتنزیتی، شود. مرحله سوم مجدداً شامل حرارت دادن در دماهای کمتر از ۵۶۶°C است، جاییکه واکنش رسوب گذاری اصلی انجام می‌گردد. فولاد سرد شده دارای استحکام بسیار بالایی می‌باشد (جدول ۳۱).

روش دیگری که برای سخت کاری برخی از فولادهای زنگ نزن PH آستنیتی ناپایدار، مثل 17-7PH و 15-7Mo به کار می‌رود، به این صورت است که فولاد کاملاً آستنیتی در دمایی بالاتر قرار می‌گیرد (به عنوان مثال ۹۵۵°C)، که در نتیجه رسوب گذاری کاربیدها کمتر و Ms پایین‌تر می‌باشد. برای حصول به یک ساختار کاملاً مارتنزیتی سرد کردن تا دمای ۷۳°C لازم است. سپس عملیات پیرسازی در دمایی کمتر از دمایی که در مرحله سوم روش بالا ذکر شد، انجام می‌گیرد (به عنوان مثال ۵۱۰°C) تا رسوب گذاری انجام شود و آلیاژ سخت گردد. این روش موجب افزایش استحکام فولاد نسبت به روش قبلی می‌شود.

کار سرد شدید فولادی که به طور ابتدایی در حالت A قرار دارد نیز نوع دیگری از عملیات سخت کاری فولادهای زنگ نزن PH آستنیتی شبه پایدار می‌باشد. این روش با حالت C شناخته می‌شود. در



این حالت استحاله آستنیت به مارتنزیت در اثر کار سرد صورت می‌گیرد و فولاد هنوز دارای ۵٪ تغییر طول کششی همراه با استحکام تسلیم حدوداً ۱۳۱۰ MPa می‌باشد.

بنابراین این فولاد قبل از پیرسازی می‌تواند خم شود یا شکل بگیرد. تنها یک عملیات حرارتی ضروریست و آن عملیات پیرسازی در دمای نسبتاً پائین (480°C) می‌باشد. به نظر می‌رسد این روش تنها برای تولیدات فلزی به شکل ورق کاربرد دارد.

در ارتباط با برخی از فولادها لازم است یک روش مشخص مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال برای فولادها AM350 و AM355، جهت استحاله مارتنزیتی نیاز به سرد کردن تا -73°C می‌باشد. در این فولادها نیز نوع رسوبات تشکیل شده به ریزساختار بستگی دارد.

۹-۲-۳- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی آستنیتی

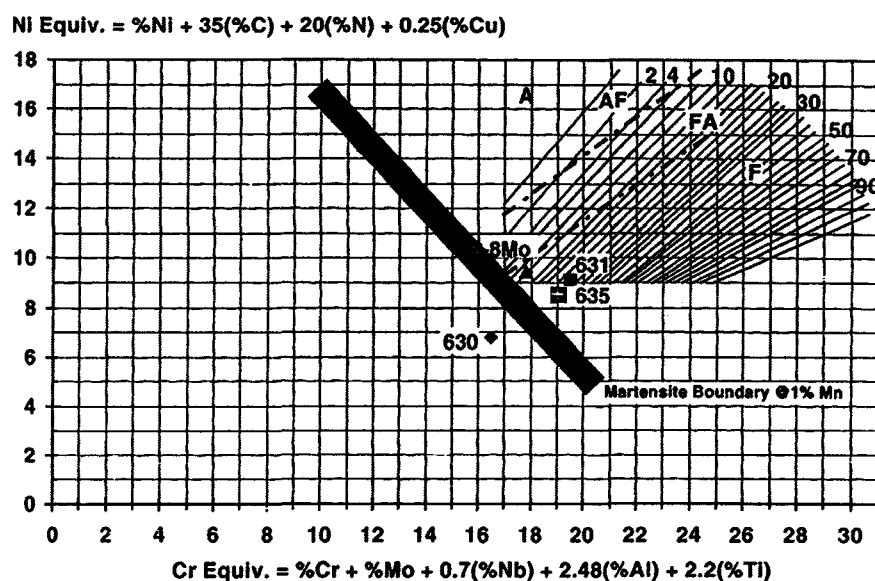
متالورژی فیزیکی فولادهای زنگ نزن PH آستنیتی نسبت به دیگر فولادهای رسوب سختی ساده‌تر بوده و نیازی به استحاله به آستنیت و عملیات مورد نیاز برای رسوب کاربیدها نمی‌باشد. فولادهای زنگ نزن این گروه به صورت آستنیت جامد می‌شوند و به دلیل مقدار نیکل بالا، ریزساختار آنها در تمامی دماها حتی پایین‌تر از -196°C آستنیتی باقی خواهد ماند. عملیات انحلالی برای این فولادها دمای بین 900°C و 980°C برای ۱ تا ۲ ساعت، همراه با سرد کردن در آب یا روغن انجام می‌گیرد. در این شرایط فولاد کاملاً نرم است.

عملیات پیرسازی این فولادها می‌تواند محدوده دمایی 675°C تا 760°C انجام گردد. به دلیل سرعت بسیار کم نفوذ عناصر آلیاژی جهت تشکیل رسوب در زمینه آستنیتی، زمان پیرسازی بیشتر از فولادهای مارتنزیتی و آستنیتی ناپایدار می‌باشد. (به عنوان مثال ۱۶ تا ۲۰ ساعت). رسوبات ایجاد شده اغلب گاماپریم بوده و شامل ترکیبات بین فلزی Ni_3Ti یا $\text{Ni}_3(\text{TiAl})$ می‌باشد.

در جدول ۳۱، خواص مکانیکی برخی از فولادهای این گروه در شرایط پیر شده آورده شده است. مشاهده می‌شود که استحکام فولاد کاملاً سخت شده این گروه به طور قابل توجهی کمتر از فولادهای زنگ نزن PH مارتنزیتی و آستنیتی ناپایدار می‌باشد.

۳-۹- متالورژی جوشکاری

همانطور که در شکل ۷۰ مشاهده می‌شود، فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی و آستنیتی ناپایدار به صورت فریت اولیه و در هر دو حالت FA یا F جامد می‌شوند. این پدیده را می‌توان با مراجعه به دیاگرام WRC-1992، برای فولادهای 17-4PH نیز مشاهده کرد. به دلیل آنکه دیاگرام WRC-1992، شامل اثر آلومینیم و تیتانیم بر کروم معادل نمی‌باشد، بنابراین تخمین اثر این عناصر جهت پیش‌بینی صحیح انجماد آلیاژیایی چون 13-8Mo، 17-7PH (نوع ۶۳۱) یا نوع ۶۳۵ لازم است. در تحقیقات انجام شده ضرایب ۲/۴۸ برای آلومینیم و ۲/۲۰ برای تیتانیم جهت بدست آوردن کروم معادل این آلیاژها در نظر گرفته شده است. این بدان معنی است که ۱٪ آلومینیم، کروم معادل را ۲/۴۸ و ۱٪ تیتانیم، کروم معادل را ۲/۲۰ افزایش می‌دهد. با استفاده از این روابط، دیاگرام اصلاح شده WRC-1992، همراه با موقعیت برخی از فولادهای زنگ نزن PH مارتنزیتی و آستنیتی ناپایدار معرفی شده است (شکل ۷۲). با توجه به شکل مشاهده می‌شود که تمامی این فولادها با ۱۰۰٪ فریت جامد می‌شوند. حجم زیادی از فریت در هنگام سرد شدن به آستنیت استحاله پیدا می‌کند، هر چند مقداری فریت باقیمانده در ریزساختار در دمای محیط قابل انتظار است. توجه به این نکته لازم است که دیاگرام اصلاح شده WRC-1992 قابلیت پیش‌بینی شرایط انجماد را دارد، اما نمی‌تواند ریزساختار نهایی فلز جوش را پیش‌بینی کند، زیرا همانطور که اشاره خواهد شد بیشتر آستنیت تبدیل به مارتنزیت می‌شود.



شکل ۷۲: دیاگرام WRC-1992 اصلاح شده با ضرایب آلومینیم و تیتانیم [۳].



۹-۳-۱- ریزساختار جوش

نوع ریزساختار جوش در فولادهای مارتنزیتی و شبه آستنیتی از چند مسیر می‌تواند تعیین گردد. اغلب آلیاژها به صورت فریت جامد می‌شوند و در پایان انجماد نیز به صورت کاملاً فریتی و هم به صورت مخلوطی از فریت و آستنیت می‌توانند باقی بمانند. حجم بالایی از فریت در دمای بالا به آستنیت استحاله پیدا می‌کند. در سرد شدن تا دمای اتاق آستنیت به صورت کامل یا جزئی به مارتنزیت تبدیل می‌شود. اگر استحاله تقریباً کامل بوده آلیاژ به عنوان فولاد مارتنزیتی طبقه‌بندی می‌شود. اما در آلیاژهایی که استحاله جزئی است و درصد حجمی زیادی از ریزساختار آستنیت باقیمانده است آلیاژها، فولاد PH آستنیتی ناپایدار می‌باشد. در هر دو حالت مقداری فریت اولیه تشکیل شده در دمای بالا در ریزساختار و در دمای محیط باقی خواهد ماند.

در آلیاژهای آستنیتی، ریزساختار در پایان انجماد کاملاً آستنیتی است و این آستنیت در سرد شدن تا دمای اتاق کاملاً پایدار است. به دلیل استحاله‌های فریت به آستنیت و آستنیت به مارتنزیت که در آلیاژهای مارتنزیتی و آستنیتی شبه پایدار رخ می‌دهد، اثری از ریزساختار انجمادی جوش (سلولها و دندریتها) در ریزساختار فلز جوش این آلیاژها مشاهده نمی‌شود.

۹-۳-۲- عملیات حرارتی بعد از جوش (PWHT)

به طور کلی جوشکاری فولادهای زنگ نزن رسوب‌سختی در شرایط محلول سازی^۱ قبل از آنکه رسوب گذاری اتفاق افتد، انجام می‌گیرد. در این شرایط، فولادهای زنگ نزن PH مارتنزیتی سخت اما دارای داکتیلیته متوسط می‌باشند. فولادهای آستنیتی ناپایدار و آستنیتی نیز کاملاً نرم و داکتیل می‌باشند. به دلیل آنکه سرعت سرد شدن فلز جوش زیاد است. هیچگونه رسوب گذاری در فلز جوش رخ نمی‌دهد، بنابراین در شرایط جوش داده شده فلز جوش از نظر خواص و ریزساختار مشابه فلز پایه‌ای که تحت عملیات آنیل انحلالی قرار گرفته است نمی‌باشد.

همانطور که در قسمت ۹-۲ اشاره شد، عملیات استحکام دهی فولادهای زنگ نزن PH کاملاً پیچیده است و نیاز به کنترل دقیقی دارد تا خواص بهینه حاصل گردد. آلیاژهای مارتنزیتی بعد از جوشکاری معمولاً تحت یک عملیات PWHT در محدوده دمایی ۴۸۰ تا ۶۲۰°C قرار می‌گیرند. این عملیات حرارتی هم موجب تمپرشدن مارتنزیت و هم ترغیب کننده استحکام دهی از طریق رسوب

۱- Treated Solution



گذاری می‌باشد. در دماهای بالاتر PWHT (بیش از 540°C) ممکن است مقداری آستنیت مجدداً در ساختار تشکیل گردد.

به دلیل آنکه آلیاژهای آستنیتی ناپایدار حاوی درصد بالایی از آستنیت پایدار در ساختار جوش داده شده می‌باشند، در دماهای بالا، عملیات حرارتی که سبب رسوب کاربید می‌شود، انجام می‌گیرد و در این دماها پایداری آستنیت کمتر شده و در سرد شدن به مارتنزیت استحاله پیدا می‌کند (مراحل اول و دوم در روش اول سخت کاری فولادهای آستنیتی پایدار). بعد از عملیات رسوب کاربید در محدوده دمایی 730°C تا 760°C ، به طور مؤثر تمام آستنیت استحاله پیدا می‌کند و در صورتیکه دماهای بالاتر انتخاب شود (930°C تا 955°C) مقداری آستنیت ممکن است بعد از سرد شدن تا دمای اتاق در ساختار باقی بماند. در این حالت سرد کردن در محیطهای بسیار سرد مورد نیاز خواهد بود.

آلیاژهای آستنیتی در محدوده دمایی 700°C تا 750°C سخت می‌شوند. به دلیل آنکه آستنیت بسیار پایدار است، تغییری در ریزساختار در این دماها یا در سرد شدن تا دمای اتاق ایجاد نخواهد شد. همانطور که قبلاً اشاره شد، این آلیاژها معمولاً توسط رسوب Ni_3Ti (گاماپریم) استحکام دهی می‌شوند.

اگر فولاد زنگ نزن PH، قبل از جوشکاری تحت عملیات آنیل انحلالی قرار گیرد و اگر عملیات سخت کاری به طور کامل اعمال گردد، استحکام جوش با فلز پایه‌ای که به طور نرمال سخت کاری می‌شود مشابه خواهد بود، اگرچه میزان داکتیلیته ممکن است کمی کمتر باشد. اگر فلزات پایه در شرایط کاملاً سخت کاری شده جوشکاری شوند، احتمال ترک خوردگی وجود دارد. بعد از پیرسازی تا استحکام حداکثر، فولادهای زنگ نزن PH مارتنزیتی و آستنیت ناپایدار دارای داکتیلیته محدود شده‌ای می‌باشند و کرنشهای ناشی از انقباض جوش ممکن است جهت ایجاد ترک در اطراف جوش کافی باشد. داکتیلیته فولادهای زنگ نزن PH آستنیتی نسبت به دیگر فولادهای PH بهتر است اما مشکل بروز ترک در این فولادها بسیار بیشتر است. بنابراین بهترین راه حل اجتناب از جوشکاری فولادهای کاملاً سخت شده می‌باشد.

جوشکاری ممکن است در شرایط فراپیری و در حالتیکه فولاد دارای داکتیلیته بالاتری می‌باشد، انجام گیرد. اگرچه در صورت انجام این عمل، نمی‌توان با عملیات پیرسازی به شرایط کاملاً سخت شده دسترسی داشت، مگر آنکه بعد از جوشکاری عملیات انحلالی، همراه با عملیات تشکیل کاربید برای فولادهای زنگ نزن PH آستنیتی پایدار انجام گردد و عملیات پیرسازی جدیدی برای انواع مختلف فولادهای زنگ نزن PH صورت گیرد.



۹-۴- جوش پذیری

شرایط عملیات حرارتی قبل از جوشکاری باید به گونه‌ای باشد که احتمال تشکیل عیوب حداقل باشد و خواص بهینه‌ای حاصل گردد. ضمن آنکه عملیات حرارتی بعد از جوش نیز مؤثر بر این عوامل می‌باشد. انواع مارتنزیتی معمولاً در شرایط آنیل شده برای قطعات نازک و در شرایط فرایبری برای قطعات ضخیم که بطور ذاتی دارای درجه مهار بالاتری می‌باشند، جوشکاری می‌شوند.

انواع آستنیتی ناپایدار به طور معمول در شرایط محلول سازی یا شرایط آنیل شده جوشکاری می‌شوند. انواع آستنیتی به دلیل بروز پدیده ترک انجمادی و ترک ذوب موضعی با مشکلات ویژه‌ای در جوشکاری همراه هستند. این فولادها نیز معمولاً در شرایط آنیل انحلالی جوشکاری می‌شوند تا مهار ذاتی آنها به حداقل برسد.

ترک انجمادی جوش در آلیاژهای PH آستنیتی مانند A-286 از مشکلات جدی به شمار می‌رود. مشابه فولادهای زنگ نزن آستنیتی که با فاز آستنیت جامد می‌شوند (حالت A)، منطقه ذوب این آلیاژها نیز به طور کامل آستنیتی و بدون هیچگونه فریت می‌باشند. A-286 یک آلیاژ کاملاً آستنیتی است و تنظیم ترکیب شیمیایی جهت تشویق انجماد از نوع FA ممکن نمی‌باشد. کاهش عناصر ناخالصی، به خصوص گوگرد، فسفر و سیلیسیم که ترکیبات زود گداز تولید می‌کنند، در جلوگیری از این نوع ترک مؤثر می‌باشد.

ترک ناشی از هیدروژن (HIC) در فولادهای زنگ نزن PH به دلیل درصد کم کربن و در نتیجه سختی کم دیده نمی‌شود.

مراکز تمرکز تنش به دلیل کاهش داکتیلیته کافی، می‌توانند احتمال بروز ترک را افزایش دهند و بنابراین در مرحله طراحی باید از حضور آنها اجتناب گردد. استفاده از الکترودهای کم هیدروژن به خصوص در مقاطع ضخیم فولادهای زنگ نزن PH مارتنزیتی و آستنیتی شبه پایدار به دلیل آنکه ممکن است قبل از عملیات PWHT استحاله به مارتنزیت در آنها رخ دهد، توصیه می‌شود. به طور معمول استفاده از پیشگرم برای این دسته از فولادهای زنگ نزن معمول نمی‌باشد.

۹-۵- مقاومت در برابر خوردگی

مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن PH به شرایط عملیات حرارتی بستگی دارد. به طور کلی، مقاومت به خوردگی، زمانی شرایط بهینه خود را خواهد داشت که فولاد در شرایط کاملاً سخت شده باشد. البته استثنائاتی برای این قانون کلی در محیطهای خورنده ویژه وجود دارد. در نتیجه



پیشنهاد می‌شود، توصیه تهیه کننده فولاد مدنظر قرار گیرد. اطلاعات کمی در ارتباط با مقاومت به خوردگی جوش این فولادها در دسترس می‌باشد. نشان داده شده است که آلیاژ 17-4PH، هنگامی که تحت عملیات حرارتی پیرسازی بعد از جوشکاری قرار می‌گیرد، مقاومت به خوردگی مشابهی با شرایط غیرجوش داده شده دارد [۳].



مراجع

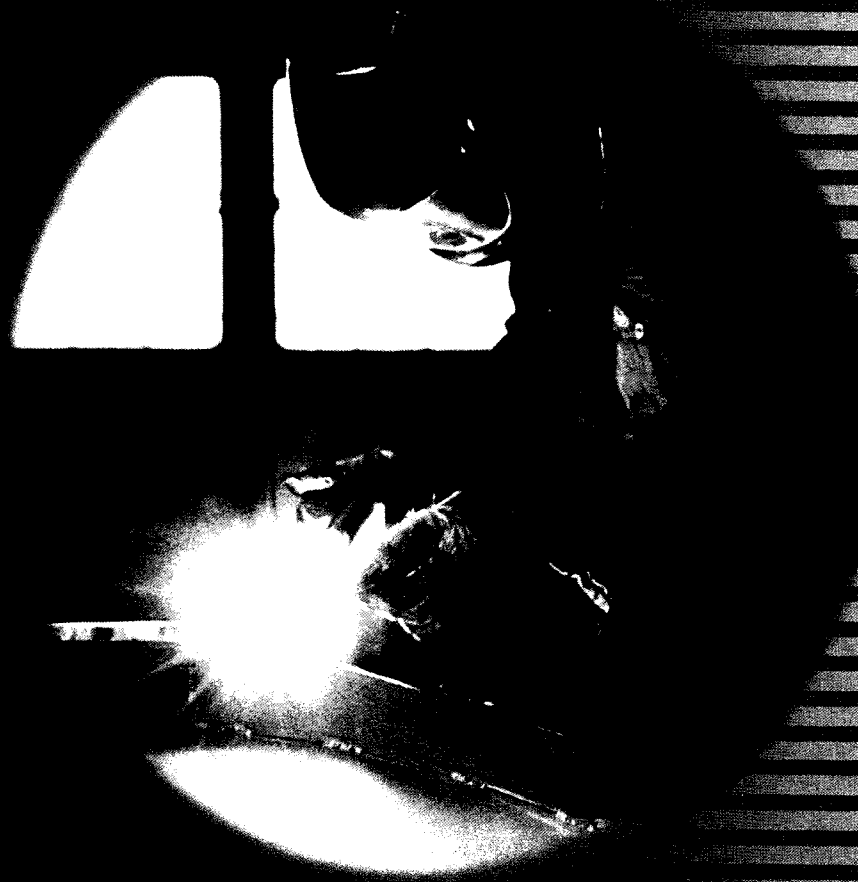
- ۱- محمدعلی گل‌عذار "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها"، ویرایش دوم، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، اصفهان، ۱۳۷۸.
- 2- AWS Handbook, 7th edition, 1997, Vol.4, "Stainless Steels"
- 3- John C. Lippold, Damian J-Kotecki "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", 2005
- ۴- مهرداد معینیان، "کلید جوشکاری"، انتشارات آزاده، ۱۳۸۲، چاپ اول



پیشنهادهای و انتقادات:



Iranian Welding Research & Engineering



*High-alloyed (stainless)
steels*