

۱- جوش پذیری فولادهای زنگ زن فریتی- (Ferritic stainless steels Weld ability)

اغلب فولادهای زنگ زن فریتی در استاندارد SAE/AISI در سری 400 قرار دارند که 10.5 تا 30 درصد کرم و مقداری مولیبدن در ساختار خود همراه دارند.

از مهم ترین خواص آنها مقاومت در برابر ترک های ناشی از خوردگی تنشی (SCC=stress-corrosion cracking) مقاومت در برابر حفره ها و خوردگی ناشی از کلراید هاست.

۲- ۱- طبقه بندی فولادهای زنگ زن فریتی

به طور کلی فولادهای زنگ زن فریتی به سه دسته تقسیم می شوند:

گروه I: فولادهای زنگ زن فریتی استاندارد شده.

گروه II: فولادهای زنگ زن اصلاح شده استاندارد.

گروه III: فولادهای زنگ زن با درصد ناچیز و کنترل شده عناصر مخرب کربن نیتروژن و اکسیژن.

گروه I: فولادهای زنگ زن فریتی سری AISI-400 از گذشته های بسیار دور به عنوان فولادهای مقاوم در برابر خوردگی و درجه حرارت در صنایع گوناگون کاربرد داشته اند. جدول (۱) استانداردهای امریکایی و آلمانی ترکیب شیمیایی تعدادی از فولادهای این خانواده را نشان می دهد.

ساختار اغلب این فولادها در اثر انجام عملیات جوشکاری به حالت مارتنزیتی استحاله نموده بنابراین پس از جوشکاری با کاهش خواص چقرمگی، انعطاف پذیری، و مقاومت به خوردگی این فولادها مواجه هستیم. به همین دلیل عملیات پیش گرمایی و پس گرمایی از اصلی ترین مقدماتی است که در حین جوشکاری این فولادها باید به کار بست.

گروه II: برای بر طرف کردن برخی مشکلات فولادهای زنگ نزن فریتی در حین جوشکاری باید ساختار آنها را اصلاح نمود و این امر به وسیله تنظیم درصد عناصر آلیاژی به ویژه کاهش میزان کرم و کربن و پایدار کننده های فریت امکان پذیر است. جدول (۲) آنالیز شیمیایی بعضی از انواع فولادهای زنگ نزن فریتی اصلاح شده استاندارد را نشان می دهد.

جدول (۱): مقایسه استاندارد و ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن فریتی استاندارد شده گروه I (سری

AISI-400)

عدد استاندارد	استاندارد DIN	استاندارد AISI	کربن (درصد)	کرم (درصد)	مولیدن (درصد)	سایر عناصر (درصد)
-	-	429	0.12	14-16	-	-
1.4016	X8Cr17	430	0.12	16-18	-	-
1.4104	X12CrMoS17	430F	0.12	16-18	0.6	0.06P+0.15S
-	-	430F Se	0.12	16-18	-	0.15Se
1.4113	X6CrMo17	434	0.12	16-18	0.75-1.25	-
-	-	436	0.12	16-18	0.75-1.25	Nd+Ta=5x%C
-	-	442	0.2	18-23	-	-
-	-	446	0.2	23-27	-	-

مهم ترین کاربردهای این فولادها در ساخت انواع لوله هایی است که در برابر درجه حرارت های بالا کار می کنند. محفظه کوره های آنیل، مخازن نگه داری کودهای شیمیایی، مبدل های حرارتی و غیره را نیز از این فولادها می سازد.

به طور مثال فولاد AISI با ۱۲ درصد کرم (که دارای مقدار کربن ناچیزی نیز هست)، دارای ۱/۰ تا ۰/۳ درصد آلومینیوم است که در طی جوشکاری بسیار سخت می شود. برای دستیابی به حداکثر انعطاف پذیری و مقاومت به خوردگی استفاده از عملیات حرارتی آنیل کردن توصیه شده است. استفاده از مواد پر کننده با ترکیب شیمیایی نزدیک به فولادهای AISI - ۴۳۰ و یا AISI- ۳۰۹ نیز تاثیر به سزایی در بهبود خواص کیفی جوش این قبیل فولادها دارند.

فولاد زنگ نزن استاندارد AISI- ۴۰۹ نسبت به نوع پیشین کمی فریتی تر است. وجود تیتانیوم باعث این امر بوده و امکان به کار گیری این فولاد را در تهیه سیستم های حرارتی بویلرها و سازه های در معرض بخارات داغ فراهم کرده و شرایط مناسبی برای جوشکاری این خانواده از فولاد به خصوص به صورت جوشکاری مقاومتی پدید می آورد.

گروه III: در بین سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ میلادی تلاش های بسیار زیادی در ساخت و به

کارگیری فولاد های زنگ نزن کرم - مولیدن دار با درصد بسیار بالای کرم و مولیدن اعمال شد که حاصل آن تهیه فولادهای زنگ نزن فریتی بود که عموماً در برابر خوردگی های معمولی حفره دار شدن و ترک های SCC مقاومت می نمایند. دستیابی به این خواص علاوه بر درصد بالای کرم و مولیدن مرهون کنترل دقیق مقدار عناصر مخربی چون کربن نیتروژن و اکسیژن در حداقل مقدار ممکن است. جوش حاصل در صورتی که پروسه های صحیح پیشگرمایی و پسگرمایی روی آن اعمال شود از

مقاومت به خوردگی، چقرمگی و انعطاف پذیری بالایی برخوردار خواهد گردید. در جدولهای (۳) و (۴)

دو نوع فولاد زنگ نزن فریتی کنترل شده با یکدیگر مقایسه شده اند.

جدول (۲): ترکیبات شیمیایی بعضی از فولادهای موجود در گروه II فولادهای زنگ نزن فریتی اصلاح شده

عدد استاندارد	استاندارد DIN	استاندارد AISI	کربن (درصد)	کرم (درصد)	مولیبدن (درصد)	نیکل (درصد)	سایر عناصر (درصد)
1.4002	X7CrAl13	405	0.08	11.5-14.5	-	-	0.1-0.3Al
1.4512	X5CrTi12	409	0.08	10.5-11.75	-	0.5	Ti=6xcmin-0.75max
-	-	409cb	0.02	12.5	-	0.2	0.4Nb
-	-	441	0.02	18	-	0.3	0.7Nb-0.3Ti
-	-	Al 433	0.02	19	-	0.3	0.4Nb+0.5Si+0.4Cu
-	-	Al 446	0.01	11.5	-	0.2	0.2Nb+0.1Ti
-	-	Al 468	0.01	18.2	-	0.2	0.2Nb+0.1Ti
-	-	YUS 436S	0.01	17.4	1.2	-	0.2Ti
-	-	439	0.07	17-19	-	0.5	Ti=0.2+4(C+N) min تا 1 max
-	-	12 SR	0.2	12	-	-	1.2Al+0.3Ti
-	-	18 SR	0.04	18	-	-	2Al+0.4Ti
-	-	406	0.06	12-14	-	0.5	2.75+4.25Al+0.6Ti

دسته اول که در جدول (۲) مشخص شده اند فولادهایی هستند که مقدار کربن و نیتروژن آنها

در مجموع کمتر از ۱۵۰ ppm می باشد و دسته دوم که مشخصات آنها در جدول (۴) منظور

گردیده فولادهایی هستند که مجموع مقدار کربن و نیتروژن آنها از ۱۵۰ ppm تجاوز می نماید

(اما از ۸۰۰ ppm کمتر است).

جدول (۳): ترکیبات شیمیایی بعضی از فولادهای زنگ نزن فریتی کنترل شده گروه II با خلوص فوق

العاده بالا

استاندارد AISI یا نام تجاری	کربن (درصد)	نیتروژن (درصد)	کرم (درصد)	مولیبدن (درصد)	نیکل (درصد)	نیوبیوم (درصد)	سایر عناصر
E-Brite26-1(xm-27)	۰/۰۱	۰/۰۱۵	۲۵-۲۷	۰/۷۵-۱/۵	۰/۳	۰/۰۵-۰/۲	۰/۴ Mn
Al-29-4-2	۰/۰۱	۰/۰۲	۲۸-۳۰	۳/۵-۴/۲	۲-۲/۵	-	-
Al-29-4	۰/۰۱	۰/۰۲	۲۸-۳۰	۳/۵-۴/۲	۰/۱۵	-	۰/۳ Mn
SHOMAC30-2	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۳۰	۲	۰/۲	-	۰/۳ Mn
YUS 190L	۰/۰۰۴	۰/۰۰۸۵	۱۸	۲	۰/۴	-	-

برای آن که مقاومت به خوردگی فولاد مورد نظر در حد قابل قبولی باشد، تیتانیوم یا نیوبیوم یا هر دو به

صورت مجموع کربن و نیتروژن را کاملاً جذب می نماید از طرف دیگر باقی مانده کربن و نیتروژن با

کرم موجود در فولاد کاربرد کرم و نیتريد کرم تشکیل می دهند. اگر مقدار تیتانیوم و نیوبیوم به اندازه

کافی باشد از بروز کاربردهای خطرناک کرم جلوگیری خواهند نمود، زیرا بخش زیادی از کربن و

نیترژن را جذب می کند. به هر حال کاربید و نیتريد های کرم می توانند مقدمات حملات بین دانه ای و خوردگی SCC را پدید آورند. حملات بین دانه ای معمولاً بیش از سایر نقاط فلز در منطقه HAZ اتفاق می افتد بنابراین استفاده از سیم جوش های تیتانیوم و نیویوم دار در جوشکاری این خانواده از فولادها بسیار حائز اهمیت است. به طور کلی نگه داری درصد کربن در کمتر از ۰/۰۱ درصد نیویوم در کمتر از ۰/۱ درصد و تیتانیوم نیز در کمتر از ۰/۱ درصد مفید می باشد.

جدول (۴): ترکیب شیمیایی بعضی فولادهای زنگ زن فرتی کنترل شده گروه III با خلوص متوسط

استاندارد AISI یا نام تجاری	کربن (درصد)	نیترژن (درصد)	کرم (درصد)	مولیبدن (درصد)	نیکل (درصد)	تیتانیوم (درصد)
26-ITi	۰/۰۲	۰/۰۲۵	۲۶	۱	۰/۲۵	۰/۵
444	۰/۰۲	۰/۰۲	۱۸	۲	۰/۴	۰/۵
Sea-Cure	۰/۰۲۵	۰/۰۳۵	۲۵-۲۷	۲/۵-۳/۵	۱/۵-۳/۵	$[\text{C+N}] \leq 0.08$
NuMonit	۰/۰۲۵	۰/۰۳۵	۲۶- ۲۴/۵	۳/۵-۴/۵	۳/۵-۴/۵	$[\text{C+N}] \leq 0.08$
Al29-4c	۰/۰۳	۰/۰۴۵	۲۸-۳۰	۳/۶-۴/۲	۱	$[\text{C+N}] \leq 0.06$

۲-۲- خواص متالورژیکی فولادهای زنگ زن فریتی

به طور کلی تمام فولادهای زنگ زن فریتی دارای اسختار کریستالی BCC در زیر دمای ذوب هستند. در بسیاری از فولاد های زنگ زن فریتی شاهد ایجاد یک فاز بین فلزی رسوبی بسیار نامطلوب هستیم. در فولادهای فریتی با کرم بالا و در دمای کمتر از ۸۳۰ درجه سانتیگراد یک فاز بسیار ترد و شکننده و سخت با ساختار کریستالی تتراگونال به نام فاز سیکما (σ) رسوب می کند که پایه تشکیل آن وجود کاربیدهای کرم در این فولاد ها است. دمای شکل گیری فاز سیکما (σ) همانگونه که گفته شد از حالت مذاب در حدود ۸۳۰ درجه سانتیگراد در هنگام گرم شدن از حدود ۴۴۰ درجه سانتیگراد می باشد. به عبارت دیگر فاز (σ) در محدود دمایی ۴۴۰ تا ۸۳۰ درجه سانتیگراد پایدار است.

در فولاد های با کرم بالا که دارای مقادیری مولیبدن نیز هستند یک فاز پیچیده مولیبدن دار به نام فاز مکعبی X با ترکیب شیمیایی $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ ایجاد می شود. این فاز و فاز σ به وسیله عنصر تیتانیوم پایدار می شوند. با توجه به محدوده دمایی تشکیل فازهای بین فلزی گفته شده برای جلوگیری از تشکیل آنها توصیه شده است که حتماً بعد از جوشکاری به آنیل کردن فولاد از دمای ۸۵۰ درجه سانتیگراد اقدام نموده و آن را به سرعت سرد کرد. تمامی فولاد های زنگ زن فریتی که در ترکیب خود بیش از ۱۲ درصد کرم دارند، در محدوده ۳۷۰ تا ۵۵۰ درجه سانتیگراد دچار سختی و تردی می شوند. از آنجایی که این تردی و شکنندگی معمولاً در دمای ۴۷۵ درجه سانتیگراد بروز می کند به آن اصطلاحاً تردی ۴۷۵ درجه می گویند. میزان تردی ۴۷۵ درجه اغلب با کاهش مقدار کرم و مولیبدن موجود در فولاد کاهش می یابد.

به طور معمول فولادهای زنگ زن فریتی کرم بالا دچار نوع دیگری از تردی نیز می شوند. در محدوده پر آهن دیاگرام، فاز فریتی (α) و در محدوده پر کرم دیاگرام فاز فریتی (α) در اثر جدایش ترکیبات قابل بررسی می باشند. فاز α به خودی خود قادر به ایجاد ترد شکنندگی در ساختار فولاد است که آن را اصطلاحاً تردی (α) نامیده اند. فراموش نکنید که وجود کاربیدها و نیتrideهای کرم به خصوص هنگامی که از دمای 475°C درجه سانتیگراد می گذرد تردی 475°C و تردی (α) را تشدید می کند. عملیات حرارتی پس گرمایی در 220°C تا 650°C درجه سانتیگراد و سریع سرد کردن تاثیر بسیار مثبتی بر کاهش میزان سختی و تردی 475°C و تردی (α) دارد.

تنش تسلیم فولادهای زنگ زن فریتی به مراتب بیشتر از فولادهای زنگ زن آستنیتی بوده اما انعطاف پذیری آنها کمتر است.

۳-۲- قابلیت جوش پذیری فولادهای زنگ زن فریتی

وقتی در مورد جوش پذیری فولادهای زنگ زن فریتی بحث می شود هنگامی می توان آنها را جوش پذیر دانست که فولاد جوشکاری شده در سرویس کاری قابلیت های لازم را داشته باشد. با نگاهی به خواص متالورژیکی و مکانیکی فولادهای زنگ زن فریتی به سادگی می توان به نتایج زیر دست یافت.

فولاد زنگ زن فریتی جوش پذیر است زیرا پس از جوشکاری خواص مورد انتظاری چون استحکام، انعطاف پذیری، مقاومت به ضربه (چقرمگی)، مقاومت در برابر خوردگی و مقاومت در برابر ایجاد ترک های مرز دانه ای (SCC) خود را درست مانند وقتی که جوشکاری نشده بود حفظ می کند.

اگر فرض شود که فولاد زنگ نزن فریتی دارای خواص جوش پذیری قابل قبولی است آنگاه با اصطلاح دو پارامتر مهم جوشکاری یعنی WPS و جوشکار می توان مطمئن بود اغلب خواصی که در بالا گفته شد در حد مطلوب و قابل قبول باقی خواهند ماند.

علاوه بر این دو پارامتر کنترل میزان عناصر مخربی از قبیل کربن، اکسیژن نیتروژن و هیدروژن دو عنصر تیتانیوم یا نیوبیوم یا هر دو به حد کافی نیز می تواند تاثیرات مناسبی بر کیفیت جوش بگذارد. در شکل های (۲) و (۳) مقایسه دو ساختار جوشکاری شده فولاد زنگ نزن فریتی که یکی به وسیله حضور نیوبیوم و دیگری به واسطه وجود تیتانیوم مشخص شده اند نشان داده شده است.

با کاهش مقدار کرم یا افزایش مقدار کربن در فولادهای زنگ نزن فریتی مثل AISI ۴۰۹ با کاهش مقدار کرم یا افزایش مقدار کربن در فولادهای زنگ نزن فریتی مثل AISI ۴۰۹ , AISI ۴۴۶, AISI ۴۴۲, AISI ۴۳۴, AISI ۴۳۰ در طی جوشکاری فاز مارتنزیت شروع به تشکیل شدن می کند. شکل (۴) بروز ترک های گرم و سرد در اثر وجود مارتنزیت در فولاد زنگ نزن فریتی را که در حین سرد شدن و بعد از آن در فولاد پدید آمده است، نشان می دهد.

شکل (۲): فولاد جوشکاری شده 18CrMoTi

در چنین شرایطی اولین توصیه استفاده از عمل پیشگرمایی و پس از جوشکاری عملیات حرارتی آنیل کردن در دمای بالای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و نگهداری یک ساعت به ازای هر ۲۵ میلی متر ضخامت می باشد.

شکل (۳): فولاد جوشکاری شده 18Cr2MoNb

شکل (۴): بروز ترک های سرد و گرم در اثر وجود فاز مارتنزیت در فولاد زنگ نزن فریتی

۴-۲- انواع روش های جوشکاری فولاد های زنگ نزن فریتی:

روش های جوشکاری این دسته از فولادها به انواع زیر تقسیم می شود:

۱- جوشکاری (GTAW)TIG فولاد های زنگ نزن فریتی :

نکات مهمی که باید هنگام استفاده از روش TIG در جوشکاری فولاد های 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-2 مناسب است.

پ) هنگامی که الکتروود تنگستنی یا فلز پر کننده دچار اکسایش می شود باید جوشکاری را

متوقف کرده الکتروود را اصلاح و اکسید زدایی نمود.

ت) برای دستیابی به کیفیت جوش بهتر تا حد ممکن باید از بدنه کولت و سرامیک بزرگتر

استفاده کرد.

ث) گاز آرگون هلیم یا مخلوطی از این دو گاز می تواند به عنوان گاز محافظه نتایج مفیدی بر

جای بگذارد. البته همواره باید به خاطر داشت که درجه خلوص گاز مصرفی باید خیلی بالا

باشد.

ج) برای جوش های 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 فولاد های 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 نموده و موجبات کاهش مقاومت به خوردگی آن را فراهم می آورد.

ح) در هنگام جوشکاری TIG فولاد های زنگ نزن فریتی وقتی یک طرف دو قطعه به صورت لب به لب و تخت جوشکاری می شود هرگز نباید آن ها را برگردانده و از پشت دوباره جوشکاری نمود زیرا ترکیب شیمیایی و ساختار متالوژیکی 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 پر کننده از هر گونه آلودگی و چربی بسیار حائز اهمیت است.

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

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

ر) اگر در حین جوشکاری TIG مقدار پاشش جرقه ها به اطراف زیاد تر از حد متعارف شد یا انتقال قطره ای مذاب در حد فاصل نوک الکترود تنگستن و حوضچه به کندی صورت گرفت، باید بلا فاصله به تعویض سرامیک و نازل های سرتورچ اقدام نمود 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 الکتروود 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.

ش) با استفاده از کمترین حرارت ورودی چند پاسه کردن جوش به جای یک پاس و نگه داری دمای بین پاسی در محدوده کمتر از ۹۵ درجه سانتیگراد باید از افزایش بیش از حد حرارت و ترد شدن فولاد جلوگیری کرد.

ص) در روش TIG برای کم و زیاد کردن شدت جریان بهتر است از کنترل پایی استفاده نمود. کنترلرهای پایی به صورت پدال طوری طراحی شده اند که امکان کنترل شدت جریان را بدون دخالت دست فراهم می کند. به همین دلیل جوشکار می تواند در حین جوشکاری با یک دست تورچ و با دست دیگر مفتول پر کننده را گرفته و کار کند.

ض) برای افزایش نرخ رسوب و دستیابی به نفوذ بالا می توان از فرآیند سیم گرم استفاده کرد. در این فرآیند سیم جوش پر کننده توسط یک جریان متناوب عبوری جداگانه پیشگرم شده و با سرعت یکنواخت به طرف قوس برقرار شده هدایت می شود.

ط) جوشکاری TIG فرآیند ایده آلی برای جوشکاری لوله های با قطر کم یا برای پاس ریشه در لوله های با قطر بالا می باشد.

ظ) به دلیل بروز خلل و حفره ها و نیز کاهش برخی عناصر آلیاژی در جریان جوشکاری در فولادهای زنگ زن فریتی عملیات جوشکاری TIG برای این فولادها با افزودن مفتول پر کننده توصیه شده است.

ع) در هنگام تهیه WPS برای فولاد زنگ زن فریتی به روش TIG اطلاعات لازم را می توان از استاندارد امریکایی AWS:A 5.9-81 به دست آورد جدول (۵) ترکیب شیمیایی تعداد زیادی از مفتول های جوشکاری مناسب برای جوشکاری TIG فولاد های زنگ زن را نشان می دهد.

جدول (۵): ترکیب شیمیایی مفتول های جوشکاری زنگ زن آستنیتی مناسب برای انواع

جوشکاری MIG , SAW بر اساس AWS A 5.9-81

سیم جوش	کربن	کرم	نیکل	مولیبدن	نیوبیوم و تانتالیم	منگنز	سیلیسیم	فسفر	گوگرد	نیترژن	مس
ER209	۰/۰۵	۲۰/۵-۲۴	۹/۵-۱۲	۱/۵-۳	-	۴-۷	۰/۹	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۱	۰/۷۵
ER218	۰/۱	۱۶-۱۸	۸-۹	۰/۷۵	-	۷-۹	۳/۵-۴/۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱۸-۰/۰۸	۰/۷۵
ER219	۰/۰۵	۱۹-۲۱/۵	۵/۵-۷	۰/۷۵	-	۸-۱۰	۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱-۰/۳	۰/۷۵
ER240	۰/۰۵	۱۷-۱۹	۴-۶	۰/۷۵	-	۱۲/۵-۱۰/۵	۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱-۰/۲	۰/۷۵
ER307	۰/۱۴-۰/۰۴	۱۹/۵-۲۲	۸-۱۰/۷	۱/۵-۰/۵	-	۴-۷/۵-۳/۳	۰/۳-۰/۶۵	۰/۰۳	۰/۰۳	-	۰/۷۵
ER308	۰/۰۸	۱۹/۵-۲۲	۹-۱۱	۰/۷۵	-	۱-۲/۵	۰/۳-۰/۶۵	۰/۰۳	۰/۰۳	-	۰/۷۵

۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۰/۷۵	۹-۱۱	۱۹/۵-۲۲	-۰/۰۸ ۰/۰۴	ER308 H
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۰/۷۵	۹-۱۱	۱۹/۵-۲۲	۰/۰۳	ER308L
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۲-۳	۹-۱۲	۱۸-۲۱	۰/۰۸	ER308 Mo
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۲-۳	۹-۱۲	۱۸-۲۱	۰/۰۴	ER308 MoL
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۰/۷۵	۱۲-۱۴	۲۳-۲۵	۰/۱۲	ER309
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۰/۷۵	۱۲-۱۴	۲۳-۲۵	۰/۰۳	ER309L
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۰/۷۵	۸-۱۰/۵	۲۸-۳۲	۰/۱۵	ER312
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۲-۳	۱۱-۱۴	۱۸-۲۰	۰/۰۸	ER316
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۲-۳	۱۱-۱۴	۱۸-۲۰	-۰/۰۸ ۰/۰۴	ER316 H
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۲-۳	۱۱-۱۴	۱۸-۲۰	۰/۰۳	ER316L
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۳-۴	۱۳-۱۵	۱۸/۵-۲۰/۵	۰/۰۸	ER317
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۳-۴	۱۳-۱۵	۱۸/۵-۲۰/۵	۰/۰۳	ER317L
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	$\Delta \times C_{min}$ $\Delta \max$	۲-۳	۱۱-۱۴	۱۸-۲۰	۰/۰۸	ER318
۳-۴	—	۰/۰۲	۰/۰۱۵	۰/۱۵	۱/۵-۲	$\Delta \times C_{min}$ $\Delta \max$	۲-۳	۳۲-۳۶	۱۹-۲۱	۰/۰۲۵	ER321
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۰/۷۵	۹-۱۰/۵	۱۸/۵-۲۰/۵	۰/۰۸	ER330
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۰/۷۵	۳۴-۳۷	۱۵-۱۷	-۰/۲۵ ۰/۱۸	ER330
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	$\Delta \times C_{min}$ $\Delta \max$	۰/۷۵	۹-۱۱	۱۹-۲۱/۵	۰/۰۸	ER347
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	۱-۱/۴	-۰/۶۵ ۰/۳۵	۷/۵-۹/۵	۱۹-۲۱/۵	-۰/۱۳ ۰/۰۷	ER349
۰/۷۵	—	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۳-۰/۶۵	۱-۲/۵	—	۱-۲	۷/۵-۹/۵	۱۴/۵-۱۶/۵	۰/۱	ER16-8-2

۲- جوشکاری MIG/MAG (GMAW) فولادهای زنگ نزن فریتی

مهم ترین نکات قابل توجه در جوشکاری MIG/MAG فولادهای زنگ نزن فریتی به قرار

زیر است:

الف) با افزایش حرارت ورودی می توان سیالیت حوضچه مذاب و انتقال اسپری (spray transfer) قوس الکتریکی به قطعه کار را فراهم کرد. در نتیجه رشد دانه ها اغلب در منطقه HAZ و بخشی از فلز جوش رخ می دهد پس استفاده از تکنیک انتقال اسپری در جوشکاری فولاد های زنگ نزن فریتی توصیه نمی شود. با استفاده از روش جوشکاری پالسی MIG/MAG می توان زمینه کاهش حرارت ورودی را فراهم کرد. در انتقال اسپری باید از سیم قطور و شدت جریان بالا استفاده نمود، به همین دلیل جریان پالسی مشکل را حل کرده و از رشد دانه ها جلوگیری می نماید.

ب) انتقال کروی (Globular transfer) مذاب از نوک سیم جوش به صورت پرواز آزاد (Free Flight) و به وسیله حرارت ورودی کمتر اتفاق می افتد. اما به دلیل افزایش پاشش جرقه های جوش استفاده از این روش انتقال مذاب نیز توصیه نشده است. البته مقدار پاشش جرقه ها را می توان به وسیله استفاده از گاز محافظ با درجه خلوص بالاتر و یا به کارگیری منبع قدرت جوشکاری با کیفیت مطلوب تر که دچار نوسانات جریان و ولتاژ نشود، کاهش داد.

پ) انتقال پیوسته کوتاه (Short - Circuiting transfer) با کمترین حرارت ورودی در روش MIG/MAG همراه است. تنها عیبی که امکان بروز آن در جوش هنگام استفاده از این

تکنیک وجود خواهد داشت، عیب عدم ذوب کافی (Lack-of-fusion) است. این روش برای جوشکاری ورق های نازک در وضعیت های تخت و مسطح و حتی ورق های ضخیم در وضعیت های افقی قائم و سقفی قابل استفاده است. در این روش می توان از سیم با قطر کم و شدت جریان خیلی پایین استفاده کرد.

ث) با کاهش درجه حرارت بین پاسی و حرارت غوطه وری می توان عیوب مهمی مثل عدم ذوب کافی و یا عدم نفوذ کافی (Lack-of-penetration) را کنترل کرد.

ج) استفاده از سیم جوش های آستیتی در جوشکاری MIG/MAG فولادهای زنگ نزن فریتی گاهی می تواند عیوبی مثل رشد دانه را با تشکیل دانه هایی با ساختارهای دو فازی بر طرف نماید. زیرا کنترل رشد دانه ها به خصوص در منطقه HAZ از مسایلی است که هرگز نباید فراموش شود.

چ) در جوشکاری MIG/MAG فولادهای زنگ نزن فریتی باید از منبع قدرت با کیفیت بالا و بدون نوسانات آمپر و ولتاژ استفاده نمود.

ح) در جوشکاری MIG/MAG فولادهای زنگ نزن فریتی نباید از گاز محافظ آرگون خالص استفاده کردی زیرا این گاز در این شرایط نمی تواند قوس برقرار شده را پایدار نگه دارد. بنابراین امکان ورود هوای محیط به داخل حوضچه مذاب بسیار زیاد خواهد بود که در نتیجه وجود عناصری مثل نیتروژن و اکسیژن سبب بروز عیوب بسیاری در حوضچه جوش خواهند شد. پس توصیه شده است در جوشکاری MIG/MAG این قبیل فولاد ها از گاز

مخلوط شامل ۹۸ درصد آرگون، ۲ درصد اکسیژن یا ۹۸ درصد آرگون، ۲ درصد CO₂ استفاده شود.

خ) در مواردی که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد استفاده از مخلوط ۷۵ درصد آرگون، ۲ درصد هلیوم نیز در پایداری قوس بسیار موثر خواهد بود.

د) در این فرآیند از جریان DC با قطب معکوس استفاده می شود.

۳- جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی با سیم های توپودری (روش

FCAW=Flux-Cored Arc Welding)

نکات مهم در این مورد عبارتند از:

الف) پوشش سیم های توپودری اغلب از فولادهای ساده کربنی زنگ نزن و یا آلیاژهای نیکل تهیه شده و برای دستیابی به آنالیز نهایی مورد نیاز برای جوشکاری از ترکیبات شیمیایی متفاوت پودر استفاده می شود. بعضی از سیم های توپودری دارای پودرهای با خواص فعال بوده و هنگام استفاده از آنها در فرآیند نتایجی شبیه روش جوشکاری MAG (با گاز CO₂) ارایه می دهد در حالی که برخی دیگر خواص غیر فعال دارند و از اکتیویته بازی یا اسیدی نیز برخوردار نیستند.

در پاره ای موارد نیز سازندگان سیم های توپودری محصولات خود را طوری به بازار عرضه می دارند که برای جوشکاری با آنها باید از گاز محافظ استفاده کرد. در بعضی موارد محصولاتی به بازار عرضه می شود که برای جوشکاری نیازی به گاز محافظ نداشته و سوختن پودر داخل سیم خود تولید گارها محافظ می کند که روش اخیر نتایج بهتری خواهد داد.

فولادهای زنگ نزن فریتی براسا استاندارد AWS:A ۲۲.۵-۸۰

[illegible]

۴- جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی به روش الکتروود دستی (MMA) و (SMAW)

مهمترین نکات در این رابطه عبارتند از:

الف) در روش جوشکاری MMA استفاده از جریان DC مثبت توصیه شده است.

ب) جوشی که با الکتروود روکش دار داده می شود هرگز به چقرمگی جوشی که توسط روش TIG یا MIG داده شده نخواهد بود.

پ) به دلیل عدم تنظیم و خلوص لازم در جوشکاری توسط الکتروود روکش دار استفاده از روش MMA برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی گروه III توصیه نمی شود زیرا امکان کنترل و تنظیم مقدار کربن، نیتروژن و اکسیژن وجود ندارد.

ت) اگر چه الکتروودهای روپوش دار به راحتی در دسترس می باشند اما مساله انبارداری و نگه داری آنها به شکلی که دچار رطوبت نشوند بسیار حائز اهمیت است.

ث) الکتروودهای روکش دار با بیش از ۱۱ درصد کرم برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن کرم دار فریتی مناسبند همچنین انواع الکتروودهای ۴ تا ۱۰ درصد کرم با هیدروژن کم نیز، که مغزه آن ها فولاد کربنی بوده و در پوشش آنها ترکیبات و آلیاژهای کرم و مولیبدن اضافه می شود نیز بسیار مفیدند.

ج) در زمانی که برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی از الکتروودهای روکش دار استیتی استفاده می شود باید الکتروودی انتخاب کرد که به اندازه کافی کرم و نیکل داشته باشد مقدار

۲۵ درصد کرم و ۲۰ درصد نیکل مناسب است. الکترودی مثل E310 یا E310ELC که

کاملاً آستنیتی است الکترو د ENiCrFe2 و الکترو د E309 نیز توصیه شده است.

چ) اگر از الکترو د کرم - مولبدن دار برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی استفاده می شود باید از قوس الکتریکی کوتاه استفاده کرد تا از اکسیداسیون اضافی کرم و جذب نیتروژن جلوگیری شود. قوس کوتاه احتمال بروز عیوبی مثل خلل و فرج را کاهش می دهد به همین دلیل اصولاً حرکت موجی و زیگزالی برای الکترو د روکش دار در روش MMA برای فولادهای زنگ نزن فریتی توصیه نمی شود.

ح) استفاده از الکترودهای کربنی کم کربن با سیلیسیم بالا نیز به دلیل صرفه اقتصادی و خواص کیفی متوسط در پاره ای موارد قابل پیشنهاد کردن است.

خ) سیالیت مذاب جوش یک فولاد زنگ نزن فریتی به مراتب بیشتر از سیالیت مذاب آستنیتی سبب می شود تا حجم سرباره تولیدی در جوشکاری MMA این فولاد بیشتر از روش مشابه در فولاد زنگ نزن فریتی باشد. عمق نفوذ نیز در فولاد زنگ نزن فریتی جوشکاری دشه به روش MMA بیشتر است. از این رو در جوشکاری این فولادها به مهارت کمتری نیاز می باشد ولی برای کنترل حوضچه جوش به دلیل سیالیت زیاد مذاب جوشکار باید تجربه کافی داشته باشد.

د) به طور کلی نقطه ذوب فولادهای زنگ نزن فریتی کمی بیشتر از فولادهای ننگ نزن آستنیتی و آلیاژهای پایه نیکل مقاوم به خوردگی است. بنابراین هنگامی که از الکترو د روکش دار آستنیتی برای جوشکاری فولاد زنگ نزن فریتی استفاده می شود باید تدابیر لازم را برای رسیدن به نقطه ذوب فولاد پایه به کار بست. این شاید مهم ترین مساله نگران کننده در زمان به کار

گیری این الکترودها در جوشکاری فولاد زنگ‌زن فریتی استفاده می‌شود باید تدابیر لازم را برای رسیدن به نقطه ذوب فولاد پایه، به کار بست. این شاید مهم‌ترین مساله نگران‌کننده در زمان به کارگیری این قبیل الکترودها در جوشکاری فولادهای زنگ‌زن فریتی است زیرا عدم توجه لازم سبب بروز عیوبی مثل عدم ذوب کافی در جوش مذکور 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 شد.

ذ) وجود سرباره و باقی ماندن لایه‌های آن در بین دانه‌های تسبیحی جوش مشکل دیگری است که در روش جوشکاری MMA فولادهای زنگ‌زن فریتی بروز می‌کند. اگر سرباره به آسانی از جوش خارج نشود به عملیات سنگ‌زنی نیاز خواهد بود زیرا در جوشکاری فولادهای زنگ‌زن 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 مد نظر قرار داد و در پایان هر پاس و پیش از شروع پاس جدید سرباره‌های باقی مانده را با برس زدن یا سنگ‌زنی پاک کرد 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.

ر) مثل سایر روشهای جوشکاری محل اتصال باید کاملاً تمیز و عاری از هر گونه چربی گریس و یا کثیفی باشد.

ز) قوس الکتریکی باید روی لبه پخ فلز پایه برقرار شود.

س) قوس کوتاه همان طور که قبلاً گفته شد از بروز عیوبی همچون خلل و فرج و حضور اکسیدها اکسیژن و نیتروژن ممانعت به عمل می آورد.

ش) بهترین حالت دست جوشکار به شکلی است که الکتروود روکش دار با زاویه حداکثر ۲۰ درجه نسبت به محور عمودی به کار گرفته شود.

ص) عرض حرکت موجی الکتروود در جوشکاری MMA فولادهای زنگ نزن فریتی که ممکن است توسط دست جوشکار به وجود آیند نباید از سه برابر قطر مغزه الکتروود بیشتر باشد.

۵- جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی به روش جوش قوس الکتریکی پلاسما (PAW = Plasma Arc welding)

فولاد های زنگ نزن فریتی را می توان به آسانی با روش TIG جوشکاری نمود اما استفاده از روش جوشکاری پلاسما (PAW) با گاز هیدروژن برای اتصال این فولادها بسیار مشکل خواهد بود زیرا امکان بروز ترک های ناشی از افزایش تنش به دلیل نفوذ هیدروژن در فلز جوش همواره وجود دارد. سایر نکات مهم در این ارتباط به قرار زیر است:

الف) در اثر جوشکاری پلاسما احتمال بروز هیدروژن تردی حتی تا ۴۸ ساعت پس از جوشکاری نیز در فولاد فریتی وجود دارد.

ب) به دلیل قوس بسیار شدید و فوق العاده قوی که در جریان جوشکاری پلاسما برقرار می شود عمق نفوذ جوش بسیار بالا و عرض منطقه HAZ بسیار باریک خواهد بود.

پ) امکان رشد دانه ها در منطقه HAZ به مراتب کمتر از حالت جوشکاری TIG است.

۶- فولاد های زنگ نزن فریتی به روش مقاومتی (Resistance welding)

انواع روشهای جوشکاری مقاومتی اعم از نقطه جوش (Spot welding) درز جوش (Seam welding) جوش جرقه ای (Flush welding) و جوش اصطکاکی (Friction welding) برای اتصال دادن فولادهای زنگ نزن فریتی قابل استفاده هستند. جوشکاری مقاومتی بدون استفاده از مواد مصرفی و پرکننده ها انجام می شود زیرا فرآیند فشاری سبب می شود تا سطوح کاملاً روی هم منطبق شده و در اثر افزایش درجه حرارت ذوب نقطه ای یا خطی حاصل گردد. بر اساس مقاومتی که فلز پایه و الکتروود غیر مصرفی دستگاه در مقابل عبور جریان ایجاد می کند. روشهای مختلف جوشکاری مقاومتی برای اتصال فولاد های این خانواده توصیه می شود. به موارد زیر توجه کنید:

الف) مهمترین شرایط در استفاده از جوش های مقاومتی برای اتصال دادن فولادهای زنگ نزن فریتی این است که کاهش چقرمگی فولاد قابل تحمل باشد.

ب) اگر در روش درز جوش از گاز محافظ آرگون استفاده شود امکان بروز ترک ها و نفوذ اکسیژن و نیتروژن به حداقل می رسد.

پ) جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی تیتانیوم دار به روش مقاومتی بهتر از سایر انواع این فولادها نتیجه می دهد زیرا فولاد های تیتانیوم دار مقاومت بیشتری در برابر اثرات مخرب نیتروژن از خود نشان می دهد به این دلیل که هنگام جوشکاری در دماهای بالا یک لایه نازک (فیلم) نترید تیتانیوم (TiN) در سطح فلز تشکیل می شود که بقیه فلز جوش را از اثرات تخریبی نیتروژن محافظت می کند.

۵-۲- انتخاب فلز پر کننده برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی:

برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی چهار حالت می توان در نظر گرفت:

1- بدون استفاده از فلز پر کننده.

2- با استفاده از فلز پر کننده ای که از نظر ترکیب شیمیایی شبیه فلز پایه باشد.

3- با استفاده از فلز پر کننده فولاد زنگ نزن آستیتی

4- استفاده از آلیاژهای پرنیکل به عنوان فلز پر کننده.

جدول (۷): بعضی از فلزات پر کننده برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی

ردیف	استاندارد فلز پایه بر اساس DIN یا AISI	فلز پر کننده بر اساس استاندارد AWS	عملیات حرارت بعدی (پسگرم)
۱	۴۰۵ (X ^۷ CrAl ^{۱۷}) (۱.۴۰۰۲)	۴۰۵ Nb, ۴۰۵ cd ۴۳۰ ۳۰۸(L), ۳۰۹(L), ۳۱۰(L)	AS-WELDED Annealed AS-welded
۲	۴۰۹ (X ^۵ CrTi ^{۱۲}) (۱.۴۵۱۲)	۴۳۰ ۳۰۸(L), ۴۰۹, ۴۰۹Nb, ۳۰۹Lsi	Annealed AS-welded
۳	۴۲۹	۲۰۸(L), ۳۰۹(L), ۳۱۰(ELC)	AS-welded
۴	۴۳۰ (X ^{۱۰} CrAl ^{۱۸}) (۱.۴۷۴۲)	۴۳۰ ۳۰۸(L), ۳۰۹(L), ۳۱۰(ELC)	Annealed Annealed or AS-welded
۵	۴۳۹	۴۳۰, ۴۳۰Ti	Annealed or AS-welded
۶	۴۴۲	۴۴۲ ۳۰۸(L), ۳۰۹(L), ۳۱۰(ELC)	Annealed AS-welded
۷	۴۴۶	۴۴۶ ۳۰۸(L), ۳۰۹(L), ۳۱۰(ELC)	Annealed AS-welded
۸	E-Brite ۲۶-۱	ER ۲۶-۱ Inconel ۱۱۲, Hasteloy C-۲۷۶ Hasteloy C-۲۲	AS-welded

قبل از انتخاب فلز پاک کننده باید علاوه بر خواص مکانیکی انعطاف پذیری و چقرمگی به ویژه در محدوده HAZ مقاومت به خوردگی فولاد نیز در نظر گرفته شود در این خصوص باید به موارد زیر توجه کرد:

۱- برای جوشکاری فولادهای فریتی گروه I و II استفاده از فلزات پر کننده خانواده ۴۰۹ و ۴۳۰ در شکل های مختلف توصیه شده است زیرا وجود تیتانیوم و آلومینیوم در انتقال عناصر از فلز پر کننده به فلز جوش به کمک قوس الکتریکی بسیار موثرند.

۲- در جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی گروه III که باید از درجه خلوص زیادی برخوردار باشند لازم است ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فلز پر کننده شبیه خود فولاد پایه باشد زیرا فولادهای زنگ نزن فریتی گروه III اغلب به صورت AS-Welded استفاده می شوند. برای دستیابی به بهترین انعطاف پذیری چقرمگی و مقاومت به خوردگی لازم است مجموع میزان حجم سه عنصر مخرب کربن نیتروژن و اکسیژن کمتر از ۱۲۰ ppm باشد. هر اندازه این عدد کوچکتر باشد چقرمگی بالاتری به دست خواهد آمد.

۳- نکته دیگر در مورد فولادهای زنگ نزن فریتی گروه III استفاده از تیتانیوم یا تیتانیوم نیوبوم در فلز پر کننده برای جوشکاری آنها است که حاصل از آن چقرمگی و انعطاف پذیری بالا به خصوص در زمان جوشکاری ورقه های نازک می باشد.

۴- برای بر طرف کردن مشکلات انعطاف پذیری و چقرمگی فولادهای زنگ نزن فریتی می توان از فلزات پر کننده آستنیتی استفاده کرد. اگر چه این امر سبب رشد دانه ها می شود اما به دلیل

تشکیل ساختار دو فاز فریتی - آستنیتی مخلوط می توان از رشد دانه ها در منطقه HAZ صرف نظر کرد.

۵- گاهی اوقات استفاده از یک فلز پر کننده فولاد زنگ نزن آستنیتی برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی ایجاد اشکال می کند زیرا اختلاف هدایت حرارتی و انبساط حرارتی این دو فاز سبب بروز عیوبی مثل ترک های ناشی از تنش های حرارتی و یا کاهش خواص مقاومت به خوردگی و حتی بروز خوردگی الکترولیتی ناشی از ایجاد جریان گالوانیکی و بالاخره تنش های باقی مانده که از بین بردن آنها غیر ممکن است، خواهد شد.

۶- فلزات پر کننده آلیاژی نیکل بالا نیز برای اتصال جوشی فولادهای زنگ نزن فریتی بسیار مناسبند به ویژه برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن گروه ۳۰۰ به فولادهای زنگ نزن دو فاز به فولادهای کربنی به فولادهای زنگ نزن گروه ۳۰۰ به فولادهای زنگ نزن دو فاز به فولادهای زنگ نزن پر آستنیت و به آلیاژهای پایه نیکل به طور مثال الکترودهای ENiCrFe-2, ENiCrMo-1, ERNiCrMo-3, در مجموع نتیج مطلوبی به دست داده اند. وجود مولیدن در حدود ۳ تا ۴ درصد در کلیه آلیاژهایی که در بالا گفته شد به بهبود خواص مکانیکی و دستیابی به یک جوش خوب کمک می کند زیرا از رسوب فاز ترد و شکننده بین فلزی کاربید کرم در مرزدانه ها تا حد امکان جلوگیری می کند.

۷- یکی از مزایای استفاده از فلز پر کننده با جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی برای جوشکاری فولاد زنگ نزن فریتی کاهش احتمال بروز ترک های سرد است زیرا اولاً تنش حرارتی حاصل از انقباض کمتر است. حداکثر تنش کششی در مرکز جوش بوده و هر چه به طرف جوش نزدیک می شود

مقدار آن کاهش می یابد و تنش فشاری ظاهر می شود که مقدار آن در حدود نصف تنش تسلیم است. ثانیاً تنش تغییر فازی در اثر تغییر فاز γ به α هم وجود ندارد. علاوه بر این ها اگر از عملیات پیشگرم هم استفاده شود مقدار نفوذ هیدروژن را نیز به حداقل رسانده و حتی موجبات خروج هیدروژن های جذب شده را نیز فراهم می کند که این خود سبب کاهش احتمال بروز ترک های سرد می شود.

۸- فلز پر کننده از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی برای جوشکاری هر نوع فولاد زنگ نزن فریتی به فولاد زنگ نزن آستنیتی استفاده می شود.

۹- برای جوشکاری فولاد زنگ نزن فریتی سختی پذیر به فولاد دیگر با مقدار کرم بیشتر باید از فلز پرکننده محتوی کرم (معادل هر یک از دو فولاد پایه) استفاده شود. حتی اگر مقدار کرم در فلز پر کننده بین میزان کرم دو فلز پایه باشد مناسب خواهد بود و به عملیات حرارتی نیاز مبرم می باشد.

۱۰- برای جوشکاری فولاد زنگ نزن فریتی به فولادهای آلیاژی کم آلیاژ استفاده از فلز پر کننده ای که ترکیب شیمیایی آن نزدیک به آنالیز فولاد آلیاژی کم الیاژ باشد توصیه شده است.

۱۱- برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی کرم دار به فولادهای ساده کربنی فلز پر کننده فولاد کربنی قابل استفاده است هر چند فلز پر کننده از جنس فولاد زنگ نزن فریتی کرم دار نیز قابل استفاده است.

۶-۲- نکات مهم متالورژیکی در جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی

علاوه بر نکاتی که در صفحات قبل راجع به جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی بیان شد، احاطه بر چند نکته مهم زیر می تواند مهندسین طراح جوش و جوشکاران را در افزایش کیفی جوش مورد نظر یاری بخشد.

۱- تاثیر میزان خلوص گاز محافظ در جوشکاری های MAG , MIG , TIG بر چقرمگی جوش

مهمترین دلیل استفاده از گازهای محافظ یا پشت بند محافظت کردن از حوضچه مذاب و سیم جوش ذوب شده در برابر اتمسفر است. استفاده از گاز محافظ نیز تاثیر به سزایی در مهار ترک ها، اکسیدهای مختلف که در درجه حرارت های گوناگون تشکیل می شوند، ناپایداری های قوس الکتریکی و کاهش خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی خواهد داشت.

مواردی که سبب می شود تا یک گاز محافظ از کیفیت مناسب برای جوشکاری برخوردار نباشد به قرار زیر است:

- آلوده یا کثیف بودن سیلندر های گاز و یا مرطوب بودن آنها.
- آلوده کثیف و یا سوراخ بودن (نشتی) سیستم خروجی و لوله ها.
- هرز بودن رزوه ها، معیوب بودن و یا خرابی لوله ها و شیر آلات انتقال گاز به محل جوش و پشت جوش.
- ورود ناخالصی ها و آلودگی در زمان استفاده از گاز مخلوط.
- طولانی بودن بیش از حد لوله ها و شیلنگ های انتقال گاز.
- وجود اکسیژن، نیتروژن و رطوبت در گاز CO_2 .

۲- تردی هیدروژنی (Hydrogen Embitterment)

فولادهای زنگ زن فریتی نیز مانند فولاد های فریتی دیگر در برابر تردی هیدروژنی حساسند. به همین دلیل در طول جوشکاری این فولادها باید از ورود هیدروژن به حوضچه مذاب جلوگیری کرد. منابعی که امکان ایجاد هیدروژن در حوضچه جوش را پدید می آورند عبارتند از:

- هیدروژن ناخالصی که همراه گاز محافظ وجود دارد و در روش های MIG , TIG یا

MAG وارد جوش می شود.

- بخار آب.

- روغن، گریس و چربی.

هیدروژن موجود در جوش قادر است در مدت کوتاهی پس از اتمام جوشکاری موجبات بروز ترک های سرد را در جوش فراهم آورد، زیرا هیدروژن انعطاف پذیری فولاد ره به شدت کاهش می دهد. هیدروژن معمولاً در دمای محیط به شکل گاز و به صورت خود به خود از آلیاژ خارج می شود و در دماهای بین ۹۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد نیز به سولت کاهش پیدا می کند. خروج هیدروژن در دماهای محیط یا کمی بالاتر از آن به گذشت روزها و یا هفته ها نیاز خواهد داشت. وجود لایه های نازک فیلم مانند اکسیدی یا نیتریدی به صورت یک مانع در سطح فلز از خروج خود به خود هیدروژن جلوگیری می کند، بنابراین برای بازگرداندن و تامین انعطاف پذیری از دست رفته باید لایه اکسیدی یا نیتریدی برداشته شود تا امکان خروج هیدروژن از ساختار فولاد فراهم گردد. حساسیت فولاد زنگ نزن فریتی به هیدروژن تابعی است از آنالیز ساختار کریستالی و خواص مکانیکی فولاد. به طور کلی هر چه درصد کرم - مولیدن فولاد بیشتر باشد، حساسیت آن نسبت به تردی هیدروژنی بیشتر خواهد بود.

۳- پیشگرمایی (Preheating)

یکی از مهم ترین دلایل پیشگرم کردن قبل از آغاز جوشکاری کاهش گرادیان حرارتی بین فلز جوش و مناطق تحت تاثیر حرارت در کناره های محدوده های جوشکاری در فلز پایه است.

وجود مقدار ناچیزی آستنیت در فولاد زنگ نزن فریتی هنگام سرد شدن در هوا نیز امکان تولید فاز سخت مارتنزیت (حتی در قطعات ضخیم تا بیش از ۳۰۰ میلی متر) فراهم می کند. پیشگرمایی قبل از شروع جوشکاری از تشکیل مارتنزیت در جریان سرد شدن جلوگیری می کند و حتی نیاز به عملیات پسگرمایی تمپر کردن را نیز کاهش می دهد. برای تصمیم گیری در مورد انجام یا عدم انجام پیشگرمایی باید مواردی مثل ترکیب شیمیایی فلز پایه، آنالیز فلز پر کننده، طرح اتصال، فرآیند جوشکاری و امکانات موجود برای پیشگرمایی را در نظر گرفت.

پیشگرمایی همچنین سبب کاهش تنش های انقباضی (Shrinkage Stress) و تقلیل استحکام نقطه تسلیم می شود.

اگر دما و زمان پیشگرم درست انتخاب شود امکان خروج هیدروژن به صورت خود به خودی از فلز پایه وجود خواهد داشت. این مساله به خصوص در مورد فولادهای زنگ نزن فریتی گروه I مثل AISI ۴۳۰, ۴۳۴, ۴۴۲, ۴۴۶ بسیار سودمند خواهد بود.

پیشگرم کردن برای این فولادها که اغلب غیر سختی پذیرند، در دمای ۱۵۰ تا ۲۳۰ درجه سانتیگراد توصیه شده است. البته اگر ضخامت فلز پایه کمتر از ۶ میلی متر باشد اصولاً نیازی به پیشگرمی نخواهد بود.

برای جوشکاری فولاد های زنگ نزن فریتی گروه III نیازی به پیشگرمایی نبوده و این گروه به طور کلی نباید پیشگرم شوند زیرا در هنگام جوشکاری وازد ساختار مارتنزیتی نمی شوند و در صورت پیشگرم کردن آن ها پدیده رشد دانه در آنها به شدت اتفاق می افتد که مقدار آن از نظر شدت قابل مقایسه با فولادهای گروه I و II نخواهد بود.

۴- عملیات حرارتی پسگرمایی آنیل کردن (Postweld Annealing)

عملیات حرارتی پسگرمایی به دلایل زیر انجام می گیرد:

- کاهش سختی افزایش چقرمگی و انعطاف پذیری و بهبود خواص ماشینکاری یا شکل دادن.
- سخت و تمپر کردت جوش برای رسیدن به حداکثر خواص مکانیکی مورد نظر.
- بازگرداندن مقاومت به خوردگی برای محل جوش و مناطق اطراف آن.
- کاهش تنش های پسماند.
- ایجاد امکان مجدد برای خروج هیدروژن و کاهش احتمال هیدروژن تردی.

آنیل کردن اصولاً برای نرم کردن و افزایش چقرمگی و انعطاف پذیری انجام شده و به طور کلی به هر نوع عملیات حرارتی که به تشکیل ساختار غیر مارتنزیتی با سختی کم و انعطاف پذیری بالا منجر شود اطلاق می گردد. به طور کلی آنیل کردن به سه روش زیر انجام می شود:

الف) آنیل جزیی (Sub critical Annealing)

ب) آنیل کامل (full Annealing)

پ) آنیل ایزوثرم (Isothermal Annealing)

در آنیل جزیی فولاد را برای چند ساعت در دمای ۷۶۰ درجه سانتیگراد حرارت داده و سپس در کوره سرد می کنند. در آنیل کامل حرارت دادن فولاد از ۷۲۳ تا ۷۸۳ درجه سانتیگراد و سرد کردن (معمولاً در کوره) تا تجزیه کامل آستنیت انجام می پذیرد که نتیجه آن ایجاد ساختار پرلیتی دانه درشت است. در آنیل ایزوثرم فولاد را تا ۷۸۰ درجه سانتیگراد حرارت می دهند.

سپس آن را تا حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد در کوره سرد می کنند. سپس آن را در این دما نگه داری کرده و در نهایت از این دما در هوا به سرعت سرد می کنند که نتیجه آن تشکیل پرلیت دانه متوسط است. همان طور که قبلاً گفته شد، تشکیل فاز سیکما (σ) به همراه رشد دانه ها عوامل اصلی بروز تردی و شکنندگی هستند که ناشی از حرارت دادن طولانی و فلاد زنگ زن فریتی کرم دار در دمای حدود ۴۰۰ تا ۵۷۰ درجه سانتیگراد می باشد. آنیل کامل یا ایزوترم بهترین روش برای از بین بردن خواص این فاز ترد و شکننده می باشد که به خصوص برای فولادهای زنگ زن فریتی گروه I توصیه شده است. به این ترتیب می توان عیب تردی ۴۷۵ درجه را (که قبلاً با آن آشنا شدید) از بین برد. در این راستا پارامترهایی مثل ضخامت فلز پایه فشار هوای دمنده خنک کننده یا آب اسپری شونده باید همواره کنترل شده و مد نظر قرار گیرد.

فولادهای زنگ زن فریتی گره III با مقادیر بالای کرم و مولیبدن را نباید پس از جوشکاری آنیل کرد زیرا خطر تشکیل و توسعه ساختارهای سیکما (α) و (X) در دمای ۵۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد در این فولادها وجود دارد.

۵- مقاومت به خوردگی (Corrosion Resistance)

آزمایشات مکرر نشان داده است که مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ زن فریتی پس از جوشکاری به شدت کاهش می یابد زیرا ساختار فولاد پس از سرد شدن از دمای ۹۲۵ درجه سانتیگراد به پایین از کرم خالی شده و اغلب به صورت کربید کرم یا اکسید کرم رسوب می کند. حرارت دادن و نگهداری فولاد در ۴۲۵ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد و سرد کردن آن اغلب سبب بروز پدیده فوق

می گردد. در دمای ۷۰۰ تا ۹۲ درجه سانتیگراد مجدداً نفوذ کرم در فاز فریت اتفاق می افتد و ساختار کرم از کرم اشباع شده به همین دلیل فولادهای زنگ نزن فریتی که در دمای ۷۹۰ تا ۸۵۰ درجه سانتیگراد آنیل شده باشند، مقاومت به خوردگی بسیار خوبی از خود نشان می دهند در حالی که در کمتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد به دلیل کم بودن مقدار کرم بازیافت شده مقاومت به خوردگی به طور کامل اصلاح نخواهد شد.

به طور کلی فولادهای زنگ نزن گروه I سری ۴۰۰ مانند AISI ۴۳۰, ۴۴۳, ۴۴۶, ... در برابر خوردگی مرز دانه ای و تردی بسیار حساسند. به خصوص در حالت (AS-Welded) در نواحی مختلف فلز جوش و منطقه HAZ به همین دلیل و برای جلوگیری از مشکلاتی اینچنین مبحث استفاده از فلزات پر کننده از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی مطرح می گردد.

برای برطرف کردن مشکلات اخیر و بهبود خواص جوشپذیری استانداردهای گوناگونی از فولادهای زنگ نزن فریتی تهیه و اصلاح شد. به طور مثال نوع AISI ۴۰۵ شامل ۱۲ درصد کرم که محتوی مجموعاً کمتر از ۰/۲ درصد کربن و آلومینیوم است در درجه حرارت های بالا وارد محدوده آستنیتی می شود که در طول جوشکاری سختی آن به شدت کاهش پیدا می کند. بنابراین برای دستیابی به حداکثر انعطاف پذیری و مقاومت به خوردگی به عملیات حرارتی آنیل کردن نیاز می باشد. برای جوشکاری این خانواده استفاده از فلزات پر کننده سری ۴۳۰ یا ۳۰۹ توصیه شده است که نوع ۳۰۹ بیشتر در حالتی که باید به انعطاف پذیری بیشتری در ناحیه جوش دست پیدا کرد، کاربرد دارد.

به طور کلی کاهش مجموع عناصر آلیاژی در فولاد زنگ نزن فریتی جوش پذیری آن را افزایش داده و مقاومت به خوردگی را نیز بهبود می بخشد. نمودار شکل (۴) مقایسه بین مجموع درصد

کربن نیتروژن و مقدار کرم را نشان می دهد. این نمودار تاثیر مجموع کربن نیتروژن و مقدار کرم فولاد رد حالت AS-Weld روی انعطاف پذیری و مقاومت به خوردگی مرز دانه ای را نمایش می دهد.

همانگونه که از نمودار مشخص است، با افزایش مقدار کرم و کاهش میزان کربن و نیتروژن مقاومت به خوردگی مرز دانه ای فولاد افزایش و انعطاف پذیری آن کاهش می یابد. این موضوع در جدول شماره (۷) نیز با چند عدد مقایسه و مشخص شده است.

جدول (۷): حدود اندازه مجموع عناصر کربن، نیتروژن و کرم برای مقاومت خوردگی بین دانه ای و

انعطاف پذیری فولاد زنگ نزن فریتی در حالت AS-Weld

درصد وزنی کرم	اندازه مقاومت به خوردگی بین دانه ای ppm(C+N)	انعطاف پذیری ppm(C+N)
۱۹	۶۰-۸۰	> 700
۲۶	۱۰۰-۱۳۰	۲۰۰-۵۰۰
۳۰	۱۳۰-۲۰۰	۸۰-۱۰۰
۳۵	> 250	> 20

بر این اساس برای بهبود خواص مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن فریتی دو روش توصیه

می شود:

اول: کاهش تراز عناصر نفوذی مثل کربن و نیتروژن (بین نشین)

با مشاهده جدول (۴) که ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن فریتی گروه III را نشان می دهد

مشخص است که حتی ناچیز بودن مقدار عناصر بین نشین کربن و نیتروژن نیز سبب رسوب کاربید و

نیتريد های خطرناك كرم می گردد. نتیجه آن کاهش انعطاف پذیری و مقاومت به خوردگی فولاد مذکور در حالت AS-Weld است.

دوم: ثابت نگهداشتن کربن و نیتروژن

تثیت کربن و نیتروژن یکی از راه هایی است که از جذب کرم توسط آنها جلوگیری می کند. به این منظور استفاده از عناصر پایدار کننده کربن و نیتروژن بسیار مفید است. تیتانیوم، نیوبیوم و یا هر دوی این عناصر با هم پایدار کننده های اصلی کربن و نیتروژن به حساب آمده و از تشکیل کاربید و نیتريد های کرم به شدت جلوگیری می کند به این ترتیب می توان از رسوب کرم و کاهش آن در ساختار جلوگیری کرده مقاومت به خوردگی جوش را تامین نمود. این امر به یاری استفاده از فلزات پر کننده از جنس فولاد زنگ نزن محتوی مقادیر قابل توجه تیتانیوم، نیوبیوم و یا هر دو عنصر اخیر امکان پذیر است.

۳- جوشکاری فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی

فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی اساساً آلیاژی است از آهن و کربن و کرم با ساختار چهاروجهی مرکز پر (B.C.T=Body Center Tetragonal) که در اثر استحاله فازی تشکیل شده است. فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی به طور کلی بر اساس اندازه سختی و استحکام ناشی از عملیات حرارتی کوئینچ - تمپر کردن طبقه بندی و فرموله شده اند. حساسیت فولاد های زنگ نزن مارتنزیتی در برابر مساله عملیات حرارتی مانند فولادهای کربنی و کم آلیاژ به حد زیادی به مقدار کربن آنها بستگی دارد. اگر چه مقدار کرم در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی (در حدود ۱ تا ۱/۸ درصد) تقریباً معادل درصد این عنصر در فولادهای زنگ نزن فریتی است، اما مقدار کربن در فولادهای مارتنزیتی به مراتب بیشتر

است. در نتیجه در دمای تقریبی ۵۳۰ تا ۹۸۰ درجه سانتیگراد استحاله فازي دلتا فریت (δ) به آستنیت (γ) با تغییر سرعت سرد کردن سختی های مختلفی به فولاد می بخشد.

تغییرات درجه حرارت و نرخ سرد شدن جوش در منطقه HAZ و فلز جوش که در محدوده HAZ اتفاق می افتد، معادل تاثیراتی است که در اثر کوئینچ کردن پدید می آید.

ساختارهای مارتزیتی پر کربن که در اثر جوشکاری تولید می شوند بی نهایت ترد و شکننده هستند به خصوص اگر عملیات حرارتی پسگرمایی تمپر کردن روی آن انجام نگیرد. این تردی سبب بروز ترک ها در اطراف ناحیه HAZ می شود. به همین دلیل در جوشکاری این خانواده از فولادها عملیات پسگرمایی و کنترل سرعت سرد شدن بسیار مهم است تا بتوان از تنش های انقباضی و بروز ترک ها جلوگیری نمود. همواره به خاطر داشته باشید که جوشکاری فولادهای زنگ زن مارتزیتی از جوشکاری سایر انواع فولاد های زنگ زن بسیار مشکل تر است. وسعت ناحیه HAZ همانگونه که قبلاً شرح داده شد به عوامل مختلفی از جمله مقدار کربن فلز پایه بستگی دارد. اگر درصد کربن فولاد از ۱۵.۰ درصد بیشتر باشد، میزان سختی نیز به همان نسبت افزایش می یابد. در مجموع می توان بعضی مشکلات جوشکاری این خانواده از فولادها را که از وجود تنش ها و تردی بیش از حد نتیجه می شود به وسیله کنترل مقدار هیدروژن ورودی به جوش کاهش داد. بنابراین استفاده از الکترودهای کم هیدروژن برای جوشکاری این فولادها توصیه می شود.

۲-۳- مطالعه جوش پذیری فولاد زنگ نزن مارتنزیتی

فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی را می توان در هر سه حالت زیر جوشکاری کرد:

- در حالت آنیل شده

- در حالت سختکاری شده و

- در حالت سختکاری شده و تمپر شده.

محصولات جوشکاری در حالت سختکاری دسه اغلب دارای ساختار مارتنزیتی هستند. نمودار

ایزوترم شکل (۶-۳) تغییرات سختی در فلز جوش و منطقه HAZ را در اثر جوشکاری فولاد های

زنگ نزن مارتنزیتی نشان می دهد.

افزایش سختی در نهایت به افزایش مقدار ترک ها منتج می گردد بنابراین پیشگرمایی ،

پسگرمایی و تهیه دستورالعمل جوشکاری در این خصوص بسیار حائز اهمیت است.

۳-۳- ترک های سرد هیدروژنی

بیشتر ترک های موجود در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی جوشکاری شده، ناشی از وجود

هیدروژن در آنهاست. ترکهای هیدروژنی از دمای زیر ۱۵۰ درجه سانتیگراد تا دمای محیط شروع به

تشکیل و بروز می کنند و ممکن است حتی ساعت ها پس از سرد شدن جوش نمایان شوند. تاثیر مستقیم

آنها کاهش استحکام کششی خواهد بود. با کنترل عواملی مثل مقدار هیدروژن ساختار کریستالی حساس

به ترک و تنش های موجود می توان حساسیت به بروز ترک های سرد هیدروژنی را کاهش داد. تنش

ممکن است در اثر پسماند شدن به دلیل نوع ترکیبات فولاد به وجود آید و یا در اثر تنش های حرارتی

در جوشکاری هر یک از حالات تخت ریشه و یا گوشه.

حساسیت ساختارهای کریستالی به قابلیت حل شدن هیدروژن در آن ساختار بستگی دارد ساختارهای آستنیتی که بیشترین قابلیت را برای حل شدن هیدروژن در خود دارند کمترین حساسیت را نسبت به وقوع ترک های سرد هیدروژنی از خود نشان می دهند و مارتنزیت که کمترین قابلیت انحلال هیدروژنی را دارد بیش از سایر ساختارها نسبت به بروز ترک های سرد هیدروژنی حساسیت نشان می دهد زیرا تکرار سرد شدن در اثر استحاله فازی آستنیت به مارتنزیت هیدروژن را در داخل فاز مارتنزیت محبوس می کند (چون حلالیت هیدروژن در ساختار (BCT) مارتنزیت کم و نفوذ آن در این ساختار بالاست) به همین دلیل توصیه شده است که برای جوشکاری فولادهای زنگ زن مارتنزیتی از فلزات پر کننده آستنیتی استفاده شود.

رطوبت موجود در پوشش الکترودهای روکش دار، گازهای محافظ و یا پودرهای جوشکاری نیز یکی دیگر از عوامل موثر در بروز ترک های سرد هیدروژنی است.

هیدروژن موجود در رطوبت در اثر برقراری قوس از سایر عناصر جدا و در حوضچه مذاب و ناحیه کنار منطقه HAZ حل شده در سرویس کاری به نواحی با تنش های بالا تر نفوذ می کند. در این جاست که میتواند یک ترک سرد هیدروژنی را پایه گذاری کند و با تجمع و افزایش تنش نفوذ هیدروژن نیز افزایش یابد. این بدان معنی است که ترک های سرد هیدروژنی میتوانند حتی مدت ها پس از اتمام جوشکاری و در سرویس کاری اتفاق بیفتند.

در جوشکاری اغلب فولادهای زنگ زن برای کنترل ترک های هیدروژنی اقتصادی ترین روش مهار مقدار هیدروژن با استفاده از کنترل عوامل هیدروژن زا مثل آب، روغن، گریس و انواع هیدراست هاست. همچنین با استفاده از روشهای جوشکاری مثل TIG و MIG/MAG و یا استفاده از

مواد پر کننده کم هیدروژن به ویژه سیم های توپودری نیز می توان به کنترل ترک های سرد هیدروژنی اقدام نمود. انتخاب درجه حرارت دقیق پیشگرمایی نرخ سرد شدن و پسگرمایی مناسب نیز از دیگر پارامترهایی هستند که در کنترل میزان و اندازه ترک های سرد هیدروژنی تاثیر بسزایی دارند. دمای پیشگرمایی که معمولاً برای جوشکاری فولادهای زنگ زن مارتنزیتی توصیه می شود در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد است. در جوش های چند پاسی کنترل درجه بین پاسی نیز حائز اهمیت بوده و باید همواره از حداقل درجه حرارت بین پاسی استفاده شود تا امکان نفوذ هیدروژن در حین جوشکاری به حداقل برسد.

عملیات حرارتی پسگرمایی نیز باید با دقت و به موقع انجام شود. در فولادهایی که درصد کربن آنها از ۲.۰ درصد بیشتر است باید عملیات حرارت پسگرمایی بلافاصله پس از جوشکاری اعمال شود تا از بروز ترک های هیدروژنی و افزایش آن در اثر بروز فعل و انفعالات خوردگی جلوگیری شود. علاوه بر آنچه گفته شد دیگر فاکتوری که در انتخاب دمای پیشگرم کردن موثر است ضخامت فلز جوشکاری است. فلزات ضخیم اغلب با مشکل تنش های باقی مانده مواجه هستند و برای فلزات نازک نیاز به پیشگرم کردن به حداقل می رسد. به طور مثال برای ورق های به ضخامت تا ۳ میلی متر با درصد کربن کمتر از ۱.۰ درصد نیاز به پیشگرمایی احساس نمی شود.

۶-۳- ارتباط عملیات حرارتی و مقدار کربن موجود در ساختار فولادهای زنگ زن آستنیتی

۱- وقتی درصد کربن کمتر از ۰/۱ درصد باشد: پیشگرمایی و پسگرمایی مورد نیاز نیست.

۲- وقتی مقدار کربن بین ۰/۱ تا ۰/۲ درصد باشد: پیشگرمایی در ۲۶۰ درجه سانتیگراد و آرام

سرد کردن تا زیر دمای ۶۵ درجه سانتیگراد و سپس تمپر شدن لازم است.

3- وقتی مقدار کربن بین ۰/۲ تا ۰/۵ درصد باشد: پیشگرمایی در ۲۶۰ درجه سانتیگراد و آرام

سرد کردن تا زیر دمای ۶۵ درجه سانتیگراد و سپس تمپر و آستنیت‌ه کردن مناسب است.

4- وقتی مقدار کربن بیش از ۰/۵ درصد باشد: پیشگرم کردن در ۲۶۰ درجه سانتیگراد و استفاده

از حرارت ورودی بالا و سپس آستنیت‌ه و تمپر کردن مورد نیاز است.

- جوش پذیری فولادهای زنگ زن آستنیتی (Austentic stainless steels weld ability)

فولاد زنگ زن آستنیتی فولادی است که علاوه بر کرم محتوی مقداری نیکل و سایر عناصر

پایدار کننده فاز آستنیت در ساختار خود بوده و در هر دمایی زمینه آن آستنیت پایدار است. فولادهای

زنگ زن آستنیتی به دو صورت زیر کاربرد دارند:

1- فولادهای زنگ زن کار شده - کار سختی شده

2- فولادهای زنگ زن ریختگی - محلول جامد.

فولادهای زنگ زن آستنیتی به هر دو شکل دارای چقرمگی مقاومت در برابر دماهای بالا

(حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد) و مقاومت در برابر خوردگی، به خصوص اکسیداسیون هستند. فولادهای

زنگ زن آستنیتی، دارای خاصیت غیر مغناطیسی می باشند، به همین دلیل در کاربردهای روزمره به

عنوان فولادهای نگیر (non magnetic) مصطلح می باشند.

پر مصرف ترین فولادهای زنگ زن آستنیتی خانواده های سری ۲۰۰ AISI و ۳۰۰ AISI

هستند. سری ۳۰۰ AISI دارای ۸ تا ۲۰ درصد نیکل ۱۶ تا ۲۵ درصد کرم ۱ درصد سیلیسیم ۰/۰۲

تا ۰/۰۸ درصد کربن و در حدود ۱/۵ درصد منگنز می باشد که عنصر اخیر علاوه بر پایداری فاز

آستنیت تاثیر بسزایی در خنثی سازی خطر ناشی از وجود گوگرد (سرخ شدگی) دارد. افزودن نیکل، منگنز و سایر عناصر گاماژن (آستنیت زا) ساختار آستنیت را پایدار کرده و نتیجه ان ایجاد محلول جامد نیکل - کرم - کربن در آهن کاملاً گاما (γ) می باشد. نیکل علاوه بر پایدار کردن ساختار آستنیت مقاومت به خوردگی و مقاوت فولاد در درجه حرارت های بالا را نیز افزایش می دهد. همانگونه که قبلاً گفته شد، فولاد زنگ زن آستینی استحکام خود را حتی تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد حفظ می نماید. به هر حال عناصر پایدار کننده آستنیت (نیکل، منگنز و کربن) و عناصر پایدار کننده فریت (کرم، مولیبدن، نیوبوم و تیتانیوم) به حدی به این فولاد اضافه می شوند که حالت تعادلی در ان حفظ شود و بنا به کاربرد هر فولاد در صنعت و دستیابی به خواص مورد نیاز به کار برده شود به طور مثال در فولادهای زنگ زن جوش پذیر و یا الکترودها و سیم جوش های زنگ زن آستینی وجود مقادیر قابل توجهی سیلیسیم برای دستیابی به سیالیت مذاب و انعطاف پذیری فولاد ضروری است.

علاوه بر فولادهای زنگ زن آستینی که در حالت ریختگی (محلول جامد تولید و استفاده می شوند، فولادهای زنگ زن آستینی سختی پذیر نیز کاربرد فراوان دارند.

۱- فولادهای زنگ زن آستینی - مارتنزیتی:

فولادهایی هستند که در اثر استحاله آستنیت به مارتنیت و در طی عملیات سختکاری به سختی قابل ملاحظه ای دست پیدا کرده اند. این عمل با حل و آستنیته کردن در دمای ۹۳۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد و سرد کردن تا زیر صفر یا به وسیله کار سرد در حالت آنیل شده انجام می پذیرد.

در حین جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی اگر فاز فریت باقی مانده وجود داشته یا ایجاد شود ترکهای گوناگونی در جوش پدید خواهد آمد که بیشتر آنها در اثر ترک های انجمادی بروز می کنند. از جمله ترک های داخلی یا مرکزی جوش (centerline cracks) ترکهای عرضی (Transvers cracks) و ترک های انجمادی کناره جوش یا منطقه HAZ اشاره کرد. اغلب این ترک ها، در اثر تنش های انقباضی و عدم یکسان بودن ضرایب انبساط و انقباض و انتقال حرارتی دو فاز آستنیت و فریت در جریان سرد شدن پس از جوشکاری پدید می آیند.

سایر نکات ضروری و مهم متالورژیکی برای جوشکاری این قبیل فولادها عبارتند از:

- رسوب کاربید کرم غنی از کرم Cr_{23}C_6 در مرز دانه ها به ویژه در ناحیه HAZ که می تواند حساسیت این ناحیه را به خوردگی افزایش دهد.

- انتقال و استحاله فازی فاز فریت (α) به ساختار سیکما (σ) در درجه حرارت های کاری بسیار بالا که سبب کاهش چشمگیر انعطاف پذیری و چقرمگی فولاد می گردد.

البته موارد گفته شده را می توان تا حدودی کنترل نمود. استفاده از روش های صحیح و بهینه جوشکاری و عملیات پسگرمایی مناسب راه حل های عملی برای افزایش کیفیت جوش های زنگ نزن آستنیتی است.

۲-۴- خواص و پارامترهای عمومی در جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی

به طور کلی فولادهای زنگ نزن آستنیتی جزء خانواده فولادهای جوش پذیر به حساب می آیند زیرا خواص مکانیکی و فیزیکی آنها اصولاً با فولادهای زنگ نزن فریتی مارتنزیتی یا چند فازی تفاوت دارد. به طور مثال ضریب انتقال حرارت آن تقریباً نصف ضریب انتقال حرارت فولاد زنگ نزن فریتی

است. در نتیجه حرارت ورودی که برای جوشکاری نیاز است به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. ضریب انبساط حرارتی (CTE) فولاد زنگ زن آستنیتی نیز ۳۰ تا ۴۰ درصد بزرگتر از فولاد زنگ زن فریتی است در نتیجه سبب کاهش اعوجاج و تابیدگی (Distortion) و تنش های پسماند ناشی از جوشکاری خواهد شد.

حوضچه مذاب جوش در فولادهای زنگ زن آستنیتی اغلب غلیظ و غیر سیال است. این امر سبب بروز عیب هایی مثل عدم نفوذ کافی در جوش می شود. بزرگترین مشکل در هنگام جوشکاری فولادهای زنگ زن آستنیتی مساله ترکهای انجمادی است که نیازمند کنترل و مراقبت در حین جوشکاری و دقت در انتخاب و به کارگیری پارامترهای صحیح جوشکاری است و هنگامی که انتظار می رود جوشی غیر مغناطیسی (کاملاً آستنیتی) و مقاوم در برابر خوردگی های محیط فراهم آید باید از حمله فاز فریت به جوش به شدت جلوگیری کرد. این امر مستلزم آن است که شرایطی فراهم آید تا انجماد در فاز استنیت اتفاق بیفتد. البته همواره استفاده از حرارت ورودی کمتر کمک بزرگی به کاهش ترک های احتمالی می کند.

جوش هایی که با سرعت دست و حجم حوضچه مذاب کمتر و زوایای غیر تیز و شیب کمتر در پخ های لبه کار انجام می شوند. معمولاً حساسیت کمتری نیز در برابر ترک ها دارند. این مساله بیشتر در جوشکاری ورق های نازک قابل دسترسی است و برای قطعات ضخیم باید مقدمات دیگری به کار گرفته شود از جمله کنترل مقدار عناصر مخرب و مضر است که با رسوب در جوش و یا بین نشین شدن حساسیت فولاد زنگ زن آستنیتی را نسبت به ترک ها افزایش می دهند. عناصری از قبیل فسفر، گوگرد، بر، سیلیسیم، نیوبوم، تیتانیوم از این دسته اند. اما مقدار ناچیزی از دو عنصر اکسیژن و

نیترژن تا اندازه ای بسیار اندک بر خواص این فولاد تاثیر مفید دارند و از این ها مهمتر وجود منگنز است که همواره با کنترل آثار مخرب گوگرد و سیلیسیم مقدار ترک ها را کاهش می دهد.

۵-۴- حرارت جوشکاری در فولادهای زنگ نزن آستنیتی

حرارت ورودی (Heat input) بیش از حد ، سبب بروز ترک ها، کاهش خواص مقاومت به خوردگی ، تاب برداشتن (Warping) و کاهش محسوس خواص مکانیکی فولاد می شود. به طور کلی در هنگام جوشکاری فولادهای زنگ نزن حرارت ورودی باید ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر از حرارت ورودی در هنگام جوشکاری فولادهای کربنی باشد، زیرا انتقال حرارت فولادهای زنگ نزن از فولادهای کربنی کمتر و مقاومت الکتریکی آنها از فولادهای کربنی بیشتر است. کم بودن ضریب انتقال حرارت در فولادهای زنگ نزن سبب می شود تا درجه حرارت در نواحی جوش و کناره های آن به شکل غیر قابل کنترلی بالا رفته و در پاره ای موارد علاوه بر مشکلات گفته شده در بالا سبب تجمع تنش های حرارتی و پیچیدگی قطعه نیز بشود.

تنها حسنی که افزایش حرارت ورودی در جوشکاری این خانواده از فولادها بر جای می گذارد افزایش نفوذ جوش است. مقاومت الکتریکی فولادهای زنگ نزن آستنیتی معمولاً ۴ تا ۵ برابر فولادهای کربنی است. برای کاهش حرارت ورودی کافی است مقدار جریان و ولتاژ را کاهش و سرعت جوشکاری را افزایش داد. در روشهای جوشکاری TIG و MIG/MAG مقدار حرارت ورودی را علاوه بر عوامل گفته شده با نوع گاز یا گازهای محافظ نیز می توان کنترل کرد. گاز آرگون یک قوس الکتریکی اصطلاحاً سرد و پایدار و گاز هلیوم یک قوس الکتریکی داغ و ناپایدار تولید می کند. بنابراین برای جوشکاری های غیر اتوماتیک استفاده از گاز آرگون با درجه خلوص بالا بهترین و سالم ترین

روش است. استفاده از روش های جوشکاری پالسی نیز در کنترل و کاهش حرارت ورودی به جوش بسیار مفید و موثر است.

۶-۴- آلودگی های جوش در فولادهای زنگ زن آستیتی

آلودگی های جوش نه تنها ظاهر جوش را از حالت استاندارد خارج می کنند بلکه در عمق جوش نیز مشکلاتی ایجاد خواهد کرد. کاهش مقاومت به خوردگی استحکام و انعطاف پذیری جوش که ممکن است به شکست زود هنگام آن منجر شود، از این قبیل مشکلات هستند، منشاء آلودگی ممکن است خود فولاد زنگ زن باشد. فولادهای زنگ زن آستیتی خوش تراش که دارای مقادیری گوگرد یا سلنیم و درصد بالایی کربن هستند، قابلیت جوش پذیری پایینی دارند. عاوه بر کربن و نیتروژن، اکسیژن و آب نیز سبب آلودگی جوش می باشند. چربی، گریس و روغن های مختلف عوامل اصلی ایجاد کربن و نیتروژن هستند، به همین دلیل تمیز نگه داشتن محل اتصال بسیار حائز اهمیت است. وجود کربن نیز موجب تغییر خواص مکانیکی کاهش مقاومت به خوردگی و بروز ترک در جوش و نواحی اطراف آن خواهد شد. یکی دیگر از انواع آلودگی ها زمانی است که سطح فلز با عناصری مثل مس، برنز، قلع، سرب یا روی آلوده شود. این عناصر اغلب از سطح چکش (هنگام چکش زدن کنار جوش) فیکسچرهای نگه دارنده مبردهای حرارتی و غیره وارد جوش می شوند. وجود حتی مقادیر بسیار کم از مواد نامبرده باعث بروز ترک های خطرناکی در محدوده HAZ خواهد شد که معمولاً در مرزدانه ها اتفاق می افتد.

۱۲-۴- مطالعه ترک های کاهش دهنده انعطاف پذیری در فولاد زنگ زن آستنیتی

(Ductility Dip Cracking)

این ترک ها در حالت جامد و در فلز جوش یا منطقه HAZ برای جوش هایی که تحت فشارهای بسیار بالا قرار دارند یا بیش از حد ضخیم هستند، اتفاق می افتد. رسوب کاربیدها به ویژه کاربیدهای نیوبیوم و تیتانیوم در فولادهای زنگ زن آستنیتی عامل اصلی بروز این ترک هاست.

۱۴-۴- انتخاب فلز پرکننده برای جوشکاری فولادهای زنگ زن آستنیتی

همان طور که قبلاً گفته شد، تقریباً همه فولادهای زنگ زن آستنیتی با کلیه روش های جوشکاری قابل اتصال هستند. از آنجایی که اغلب فولادهای زنگ زن آستنیتی به صورت AS-Weld در سرویس کاری قرار می گیرند بنابراین ضروری است که در انتخاب فلز پرکننده هنگام جوشکاری دقت بسیاری به عمل آمده و نزدیک ترین فلز پرکننده به فلز پایه انتخاب شود. جدول (۴) تعدادی از الکترود و سیم جوش های مصرفی برای جوشکاری فولادی زنگ زن آستنیتی را که با دقت و تجربه بسیار انتخاب شده نشان می دهد.

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 ترک های گرم باید در انتخاب مواد پرکننده دقت زیادی اعمال گردد.

تعداد زیادی از فلزات پرکننده در ترکیبات و تنوع های گوناگون برای جوشکاری فولادهای زنگ زن آستنیتی وجود دارد.

جدول (۴): انتخاب فلز پر کننده برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی

استاندارد فلزات پر کننده جوشکاری (AWS)			استاندارد فولاد زنگ نزن آستنیتی				
A5.22	A5.9	A5.4	WNO.	DIN	UNS NO.	ASTM	AISI
	ER316 ER240 ER309	E316LXX E240XX E309LXX			S20100	A204	201-1
	ER316 ER240 ER309	E316LXX E240XX E309LXX			S20100	A666	201-2
	ER316 ER240 ER309	E316LXX E240LXX ER309XX			S20200	A240	202
	ER316 ER240 ER309	E316LXX E240XX ER309LXX			S20200	A666	202
	ER240	E240XX			S20500	A666	205
E308TX	ER308	E308XX E308LXX	1.43100	X12CrNi17 7	S30100	A666	301
E308TX	ER308	E308XX E308LXX			S30200	A240	302
E308TX	ER308	E308XX E308LXX			S30200	A666	302
E309TX	ER309	E309XX E308LXX			S30215	A167	302B
E312TX	ER312	E312XX E308LXX	1.4305	X12CrNiS1 8.8	S30300	A473	303
E312TX	ER312	E312XX E308LXX			S30323	A473	303Se
E308TX	ER308	E308XX	1.4301	X5CrNi18.9	S30400	A240-666	304
E308TX	ER308	E308XX			-	A376	TP304
E308LTX	ER308L	E308LXX	1.4306	X2CrNi18.9	S30403	A240-666	304L
E308TX	ER308H	E308HXX	1.4301	X5CrNi18.9	S30409	A240	304H
E308X	ER308H	E308HXX			-	A376	TP304H

۱۵-۴- بررسی انواع روشهای جوشکاری در فولادهای زنگ نزن آستنی

روش های جوشکاری این فولادها به فرا زیر است:

الف) جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود روکش دار (MMA) فولاد های زنگ نزن

آستنی:

مهمترین نکات در این رابطه عبارتند از:

1- در صورت استفاده از این روش امکان بکار گیری و استفاده از الکتروودهای بسیار زیادی وجود

دارد.

2- امکانات مربوط به این روش جوشکاری همواره در دسترس بوده و بسیار ارزان تر از سایر

روشهای جوشکاری است.

3- به آموزش و تخصص ویژه و پیچیده ای نیاز ندارد.

4- توانایی جوشکاری به ویژه جوش های تعمیری در انواع حالات و وضعیت های قرار گرفتن قطعه

کار را داراست.

5- نیازی به گازهای محافظ ندارد.

6- سرباره ای که در این روش تولید می شود محل مناسبی برای ورود ناخالصی ها به داخل جوش

است.

7- در جوش چندپاسی اگر سرباره پاس قبل به طور کامل پاک نشود بین پاس ها اتصال لازم برقرار

نشده و عیب محسوب می شود.

8- الکترودها باید همیشه خشک و تمیز نگه داری شوند زیرا در غیر این صورت عیبهای متعددی را در جوش ایجاد می کنند.

9- استفاده از این روش با توجه به مقدار نفوذ و رسوب وزنی جوش نسبت به وزن الکتروود و با توجه به بازدهی الکترودها در بعضی موارد مقرون به صرفه نیست.

10- از روش MMA بیشتر در کارهای ساختمانی تعمیراتی و تولید محصولات کوچک و کم تعداد استفاده می شود.

11- برای جوشکاری فولادهای زنگ نزن به روش MMA از منبع تغذیه جوشکاری با جریان ثابت (ولتاژ متغیر) با جریان AC یا DC مثبت استفاده می کنند و منبع تغذیه جریان می تواند ژنراتور، دینام ترانسفورمر و یا رکتیفر جوشکاری باشد.

12- مقدار شدت جریان مصرفی برای الکتروود های زنگ نزن آستنیتی نسبت به قطر و وضعیت تعیین می شود اما به طور کلی این مقدار کمتر از الکتروود های غیر زنگ نزن می باشد.

13- در حالت قائم (عمودی) مقدار شدت جریان پایین تر از وضعیت افقی و تخت انتخاب می شود.

14- باید سعی نمود که جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی را با قوس کوتاه انجام داد. طول قوس نباید از ۵.۰ mm تجاوز کند.

15- الکترودهایی که با جریان AC جوشکاری می شوند رسوب بالایی ارائه نمی کنند و به شدت جریان نسبتاً بالاتری نیاز دارند.

16- اگر ضخامت ورق فولادی زنگ زن قطعه کار کمتر از ۶ میلی متر باشد برای جوشکاری آن نباید از روش MMA استفاده کرد زیرا دچار پیچیدگی و اعوجاج می شود. این فولادها دارای ضریب انبساط حرارتی زیاد و ضرایب هدایت حرارتی کم هستند.

17- برای پاک کردن سرباره از سطح جوش به ویژه جوش های چند پاسی حتماً باید از برس فلزی با سیم هایی از جنس فولاد زنگ زن آستنیتی استفاده کرد.

18- سیالیت مذاب جوش در فولاد زنگ زن آستنیتی به مراتب کمتر از سیالیت مذاب جوش در یک فولاد زنگ زن فریتی است اما وجود نیکل بیشتر در فولاد زنگ زن آستنیت سبب می شود تا حجم سرباره تولیدی افزایش یابد.

19- عرض حرکت موجی الکتروود که توسط دست جوش کار به وجود می آید در جوشکاری MMA فولادهای زنگ زن آستنیت هرگز نباید از چهار برابر قطر مغزه الکتروود یا ۱۵ mm بیشتر باشد.

20- برای کاستن از مشکل پیچیدگی و تاب برداشتن قطعه کار در هنگام جوشکاری به ویژه ورق های زنگ زن نازک استفاده از نگه دارنده ها، گیره ها، پشت بند و مبرد توصیه شده است.

21- بعد جوش در پاس ریشه نباید از ۰.۱۲ میلیمتر تجاوز کند.

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

23- فولادهای زنگ زن آستنیتی را باید در حالت آنیل شده جوشکاری نیز توصیه شده است زیرا فولادهای زنگ زن آستنیتی پیشگرم نمی شوند و فقط منطقه HAZ آنها در اثر کار سختی اندکی چقرمه می شود.

24- در جوشکاری فولادی زنگ نزن آستنیتی به حالت تخت پاس اول (ریشه) باید به صورت دانه تسبیحی باریک و پیوسته موج عرضی بسیار کمی نیز در جوش اعمال کرد در پاس های بعدی نیز باید همین رویه را ادامه داد.

25- در جوشکاری فولادی زنگ نزن آستنیتی به حالت عمودی - سرازیر (vertical-down) روش توپیچ 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 حوشچه هدایت نموده و در برقراری اتصال قوی تر و با نفوذ بالاتر به قوس الکتریکی کمک شود.

26- جوشکاری فولادی زنگ نزن استینیتی به حالت عمودی - سربالا (vertical-up) استفاده از یک حرکت موجی سه جانبه را ایجاب می کند که عرض موج ان نباید از ۱۰ mm کمتر باشد برای این کار باید از الکتروودهایی با قطر کوچکتر ایجاد می شود و بقیه پاس ها را باید به وسیله حرکات موجی بسیار کوتاه و کم عرض رو به بالا روی پاس اول ایجاد نمود.

27- در جوشکاری فولادهای زنگ نزن آستنیتی به حالت سقفی (Overhead) با حرکات دایره وار الکتروود، حوضچه مذاب کاملاً هم زده می شود که از حرکات موجی باید اکیداً خودداری کرد. طول قوس نیز باید بسیار کوتاه (کمتر از ۵/۰ mm) و سرعت دست جوشکار تا جای ممکن بالا باشد.