مبدل حرارتی
Heat exchanger

مقدمه

دستگاهی است که انرژی حرارتی را از سیالی به سیال دیگر منتقل می کند. سیال ممکن است مایع یا گـاز باشـد. بـه این صورت کـه دو سـیال بـا دمـای مختلـف را وارد محفظـه مـی کننـد و میـان آن هـا انتقـال حـرارت صـورت مـی گیرد .کاربرد مبدل حرارتی در پالایشگاه ، نیروگاه ، موتورخانه ساختمان ، یخچال ، سیستم های تهویـه مطبـوع، هـا و... می باشد.

از بیشترین مبدل های حرارتی که در روز با آن سـرو کـار داریـم ، مـی تـوان بـه رادیـاتور ماشـین ، شـوفاژ و یخچال منزل اشاره کرد.

انواع مبدل های حرارتی

مبدل های حرارتی بر اساس کاربری ، شکل انتقال حرارت ، نوع ساخت و ... دسته بنـدیهای مختلفـی دارد . برخی از دسته های مشهور مبدل ها به شرح زیر است:

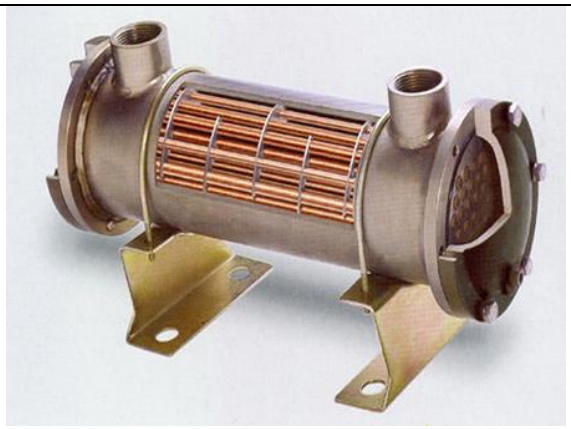
مبدل های حرارتی پوسته لوله: این مبدل ها متشکل از یک پوسته استوانه ای و کویل مسـی هسـتند کـه معمولا کویل مسیر گردش سیال ثانویه (سیال گرم شونده) و پوسته محل عبور سیال اولیه (سیال گرم کننده) است.

مبدل های حرارتی مستغرق: مبدل های حرارتی مستغرق نیز در انواع مختلف صـفحه ای، لولـه ای، لولـه ای پیوسته یا لوله U شکل طراحی و ساخته می شود. ساختار این مبدل ها به گونه ای است که در سـیال گـرم شـونده غوطه ور هستند. در این نوع مبدل ها کویل محل گردش سیال اولیه است.

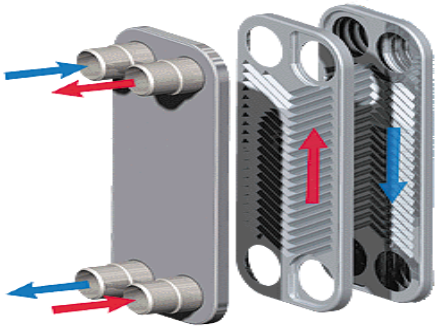
مبدل های حرارتی لوله ای: این نوع مبدل ها از دو لوله متداخل هم مرکز تشکیل مـی شـود کـه سـیالات گرم شونده و گرم کننده در یکی از لوله ها جریان پیدا می کند.

مبدل حرارتی دستگاهی است که برای انتقال حرارت از جریانی ببا دمای بالا تر به جریانی با دمـای پـایین تـر مورد استفاده قرار می گیرد.

مبدل لوله ای



مبدل پوسته لوله



مبدل صفحه ای

انتقال حرارت در هر مبدل حرارتی بنا بر درجه حرارت سیال ها به سه صورت زیر صورت می پذیرد:

انتقال حرارت هدایتی

انتقال حرارت جابجایی

انتقال حرارت تشعشعی

محاسبه مبدل حرارتی برای استخر

برای محاسبه و تعیین اندازه مبدل حرارتی استخر و جکوزی روشهای متعددی وجود دارد، مبدل حرارتی برای استخر باید بتواند در زمان راه اندازی، آب استخر را به درجه حرارت مناسب رسانده و همچنین در حین کار

استخر افت های حرارتی را جبران کند. بر این اساس برای جلوگیری از اتلاف حرارتی از سه سری مبدل استفاده می شود:

سری اول برای پیش گرمایش آب استخر

سری دوم برای جبران اتلافات حرارتی

سری سوم برای تامین آب گرم مورد نیاز جکوزی

مبدل دارای دو ورودی و دو خروجی است. آب گرم شده بویلر از یک سمت وارد کویل شده و از سمت دیگر آب استخر وارد پوسته مبدل می گردد، پس از تبادل حرارتی دمایش بالا رفته و آب بویلر کمی خنک می شود. معمولا آب بویلر با دمای 70 درجه سانتی گراد وارد و با 60 درجه سانتی گراد خارج می گردد و آب استخر نیز با حرارت 26.7 درجه سانتی گراد وارد مبدل شده. با دانستن، حجم استخر (دبی فیلتراسیون که بنابر کاربری استخر از 4 تا 8 ساعت یک بار کل استخر فیلتر می شود بدست می آید) و دمای ورودی مبدل، می توان دمای خروجی از مبدل و مدل آن را تعیین کرد.

$$\theta V lit\Delta = \theta MC\Delta = (kcal/h)Q1$$

برای جلوگیری از افزایش درجه حرارت آب خروجی از مبدل ها، از ترموستات و اکوستات استفاده می شود اما دقیق ترین روش برای کار با مبدل ها، شیر سه راه موتوری می باشد که به دلیل گران تمام شدن سیستم از این مورد کمتر در ایران استفاده می شود. درحالی که باید ذکر کرد در صورت استفاده نکردن از این نوع از شیر ها در تاسیسات استخر، امکان ورود آب با درجه حرارت بالا به استخر یا جکوزی وجود دارد که برای سوزاندن پوست شناگرانی که در کنار ورودی های آب قرار دارند خطر ساز خواهد بود.

انواع مواد مورد استفاده در ساخت مبدل حرارتی

Materials for Heat Exchanger Construction

در واقع طیف وسیعی از مواد برای تولید مبدل های حرارتی به کار گرفته می شوند. این مواد ممکن است فلز یا غیر فلز (مانند شیشه، گرافیت، سرامیک یا پلاستیک (باشند .اصول اولیه انتخاب مواد برای مبدل های حرارتی در این مطلب مورد بحث قرار گرفته است .اما انواع مواد مورد استفاده در ساخت مبدل حرارتی عبارتند از:

چدن

فولاد کربنی

فولاد کم آلیاژ

فولادهای زنگ نزن :مارتنزیتی، آستنیتی، فریتی، سوپرفریتی، دوپلکس، سوپرآستنیتی

آلومینیم و آلیاژهای آن

مس و آلیاژهای مس

نیکل و آلیاژهای نیکل

تیتانیم و آلیاژهای تیتانیم

زیرکونیم

تانتال

گرافیت

شیشه

تفلون

سرامیک

کاربید سیلیسیم

انتخاب چدن برای مبدل حرارتی

برای کاربردهای فشار پایین، از چدن برای درپوش و کاور استفاده می شود. بر اساس کد ASME قسمت هشتم، بخش اول، مخازن چدنی نباید در کاربردهای زیر مورد استفاده قرار گیرند:

- مایعات یا گازهای اشتعال پذیر و کشنده
- بویلرهای بخار غیر احتراقی
- احتراق مستقیم

محدودیت های دما و فشار در مخارن یا اجزای مخازن که از جنس چدن هستند در کد ASME قسمت هشتم، بخش اول UCI-3 ذکر شده است.

اشکال مواد خام مورد استفاده در تولید مبدل های حرارتی

Raw Material Forms Used In The Construction of Heat Exchangers

اشکال این مواد خام عبارتند از صفحه ها، ورق ها، نوارها،تیوب ها، لوله، قطعات فورج شده، قطعات ریخته گری شده، میله ها و میلگردها و غیره. بیشترین استفاده از ورق ها و نوارها در تولید مبدل های حرارتی فشرده و مبدل های صفحه ای به کار می روند. تیوب ها در مبدل های فشرده و پوسته لوله یا (PHEs) به کار می روند. سایر اشکال اشاره شده نیز به طور گسترده در تولید مبدل های حرارتی پوسته – لوله به کار می روند.

در ادامه اشکال مختلف مواد خام بر اساس مشخصات ASTM مورد بررسی قرار می گیرند.

قطعات ریختگی: ممکن است در تولید مخازن تحت فشار و اجزای مخزن مورد استفاده قرار گیرند. کلگی های ریخته گری شده برای گرمکن های آب ورودی مورد استفاده قرار می گیرند. در کدها ماکزیمم تنش مجاز برای

مواد ریخته گری شده محدود شده است. مقادیر مجاز تنش باید در فاکتور کیفیت ریخته گری مواد (به جز چدن) ضرب شود.

فورجینگ ها: مواد فورج شده ممکن است در تولید مخازن تحت فشار و مبدل های حرارتی استفاده شوند مشروط بر اینکه این مواد به اندازه مطلوب کار شده باشند تا ریز ساختار درشت شمش در آن ها از بین رفته باشد. برخی از قطعات ممکن است نیاز به ماشین کاری داشته باشند که این کار توسط سازنده انجام می شود. پیش از ماشین کاری فورجینگ ها باید با تست التراسونیک مورد بررسی قرار گیرند. بسیاری از عیوب در فورجینگ ها توسط شمش ایجاد می شوند، مانند جدایش، مک لوله ای یا ناخالصی غیر فلزی، درز مویی که در فورجینگ سرد و گرم ایجاد می شود و پوسته شدن زیاد در اثر عیوب سطحی. به این دلیل استاندارد پذیرش یک فورجینگ بر اساس تست التراسونیک قرار دارد. استاندارد SA 388/ASTM A388/A388M استاندارد بررسی اولتراسونیک فورجینگ های سنگین فولادی را بیان می کند.

فورجینگ ها از جنس فولادهای کربنی، کربن - مولیبدن، کروم مولیبدن، فریتی، زنگ نزن، آستنیتی، رسوب سختی، سایر فولادهای پر آلیاژ و فولاد های نیکل هستند .بر اساس بخش VIII و Div 1 مقدار کربن در آنالیزحرارتی فورجینگ های فولادی که با جوشکاری تولید می شوند نباید از 0.35درصد بیشتر باشد .هنگامی که جوشکاری شامل اجزای کوچک که تحت فشار نیستند باشد یا عملیات تعمیر مد نظر باشد میزان کربن نباید بیش از 0.5درصد باشد و هنگامی که مقدار کربن بیش از 0.5درصد شود، جوشکاری مجاز نیست.

برخی از استاندارد هایASTM برای فورجینگ های فولادی مخازن تحت فشار عبارتند از:

1- A336 درام بدون درز، کلی و سایر اجزا (فولادهای فریتی و فولادهای آستنیتی)

2- A372 مخزن تحت فشار جدار نازک (فولاد کربنی و آلیاژی)

3- A508 فولادهای کربنی کوئچ و تمپر شده در خلا

4- A541 فورجینگ های کوینچ و تمپر شده (فولادهای کربنی و آلیاژی)

5- A592 فولادهای پر استحکام کم آلیاژ (HSLA) کوئنچ و تمپر شده، اتصالات فورج شده و قطعات میله ها

کاربرد میله ها در مخازن تحت فشار مانند حلقه فلنج ها، حلقه های تقویتی، قاب ها برای تقویت ورودی ها، مهار و پیچ مهار و قطعات مشابه است .استانداردهایASTM مرتبط با میله ها عبارتند از A453، A479، A666 و A739 .

- اتصالات لوله ها و فلنج ها: استاندارد های ASTM، A105، A182، A234، A403، A181، A182 و غیره

- پیچ و پیچ دو سر رزوه: استاندارد های ASTM ، A105، A182، A234، A403، A181، A182 و غیره

بست های فلزی مقاوم به خوردگی از فولاد های زنگ نزن و آلیاژهای مس، نیکل، آلومینیم و تیتانیم ساخته می شود .بست ها می توانند از مواد غیر معمول مانند تانتال نیز ساخته شوند .استاندارد آلیاژهای مقاوم به خوردگی برای بست ها عبارتند از:

1-F593 پیچ ها زنگ نزن، پیچ سر تخت 6 گوش و پیچ دو سر رزوه. سرپیچ زنگ نزن سازگار 17-PH4 از نوع 302، 303، 304، 305، 309، 310، 316، 317، 321، 347، 410، 416 و .430

2- F468، پیچ های غیر آهنی، سرپیچ های خارجی و پیچ های دو سر رزوه برای استفاده عمومی:

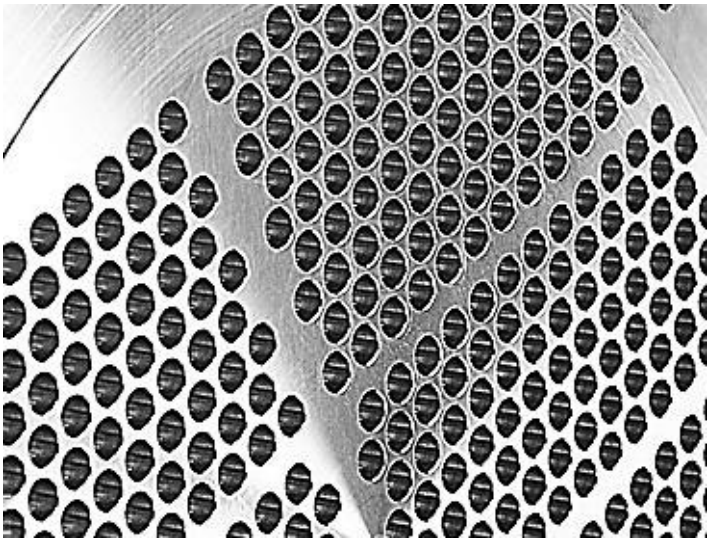
1- مس و آلیاژهای آن: مس ETP، برنج زرد، برنج سرب دار، برنج خوش تراش، برنج کشتی 63.5 درصد، یاتاقان سیلیسیومی برنز آلومینیم، برنز کم سیلیسیمB ، برنز پر سیلیسیم A،

2- نیکل: مونل 400، 405، K-500، اینکونل600

3-آلومینیم1100 :، 2024، 6061

4- تیتانیمASTM : گرید 1، 2، 3 و 4

انتخاب مواد برای اجزای مرزی تحت فشار: مواد برای اجزای مرزی تحت فشار مانند پوسته، کانال، صفحه لوله گیر و تیوب ها باید با مواد به کار رفته اجزای تحت فشار سازگار باشد. برای بافل ها، باید مواد مقاوم به خوردگی سازگار با سیال فرآیند انتخاب شود. در حالی که برای ساپورت ها استحکام و مقاومت به خوردگی محیط کار باید در نظر گرفته شود.



پوسته، کانال، کاور و سرپوش

در این موارد ماده انتخاب شده باید مقاومت به خوردگی متناسب با عمر مبدل حرارتی داشته باشد. اغلب این بدان معناست که مواد انتخاب شده باید برای 15 سال یا بیشتر عمر کنند. در شرایط خورنده باید با در نظر گرفتن صرفه اقتصادی از روکش ها (Cladding) استفاده کرد. موادی مانند فولادهای کروم مولیبدن، فولادهای کوئنچ و تمپر، مواد مناسب برای دماهای پایین، آستنیتی، دوپلکس، فولادهای6Mo ، کاپرونیکل، نیکل ها، تیتانیم و غیره باید پیش از انتخاب از از نقطه نظر ساخت به خوبی مورد بررسی قرار گیرند.

تیوب ها

باید نوع ماده و شرایط خوردگی برای تیوب و پوسته مبدل در نظر گرفته شود تیوب ها معمولا عمر کوتاه تری نسبت به پوسته یا کانال دارند و در نتیجه می توان تیوب ها را جایگزین کرد. ماده انتخاب شده برای تیوب ها باید با صفحه لوله گیر سازگار باشد. برای جلوگیری از خوردگی گالوانیک باید تیوب از صفحه لوله گیر کاتدی تر باشد.

صفحه لوله گیر

بسیاری از صفحات لوله گیر از ورق های نورد شده یا شمش های فورج شده ساخته می شوند. صفحه لوله گیر در خط تولید های کوچک با روش ریخته گری تولید می شوند. صفحه لوله گیر فولاد کربنی با ضخامتی کمتر از 5 اینچ (127 میلی متر)، از صفحات ساخته می شوند. صفحات لوله گیر با ضخامت بیشتر با ماشین کاری فورجینگ ها بدست می آیند. مواد غیر فلزی و کامپوزیت های ساخته شده از فلزات نازک که با رزین اپکسی پوشش داده شده اند در واحد های کوچک تهویه مطبوع به کار می روند .فلزاتی که برای ساخت لوله گیر در شرایط خورنده به کار می روند عبارتند از AISIشماره 304 و 316، آلومینیم، برنز، منتز متال (نوعی برنج آلفا-بتا(، مس -نیکل 10%)و (30%و تیتانیم.

موادی که معمولا برای صفحات لوله گیر مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از:

تیتانیم گرید 2 (TIMTETAL®50A)

تیتانیم گرید 3 (TIMETAL®65A)

تیتانیم گرید 9 (TIMETAL3-2.5)

تیتانیم گرید 12 (TIMETAL Code12)

فولاد زنگ نزن 304 (S30400)

فولاد زنگ نزن 316 (S31600)

برنز آلومینیم (C61400)

مونتز متال (C36500)

مس نیکل 90 - 10 (C70600)

مس نیکل 70-30 (C71500)

باید ماده ای برای این کاربرد انتخاب شود از نظر خوردگی با سمت پوسته و سمت تیوب سازگار باشد. ممکن است نیاز به استفاده از روکش برای سمت پوسته، سمت لوله یا هر دو طرف لوله گیر باشد. به طور کلی اگر برای تیوب

ها از فولاد زنگ نزن یا آلیاژ تیتانیم استفاده شود، باید لوله گیری با روکش سازگار با بخش خورنده در نظر گرفته شود. برخی از ملاحضات در انتخاب صفحات لوله گیر در ادامه بیان شده اند:

- فلزی که در برابر یکی از سیالات مقاوم به خوردگی باشد و با سیال طرف دیگر خورده شود.
- جوشکاری ذوبی برای اتصال تیوب به لوله گیر مطلوب باشد اما مواد تیوب و لوله گیر با هم سازگار نباشند.
- ساختار دانه ای لوله گیر یکنواخت نباشد و در نتیجه برای جوش دادن تیوب به لوله گیر مشکل وجود داشته باشد.

بافل ها

باید ماده ای انتخاب شود تا با شرایط شیمیایی تیوب و سیال سمت پوسته سازگار باشد. اگر سمت پوسته شرایط مطلوب برای کوپل گالوانیک را داشته باشد یاسیال سمت پوسته برای بافل ها مخرب باشد، نرخ خوردگی سبب می شود تا بافل ها پیش از تیوب ها تخریب شوند.

انتخاب مواد برای مبدل های حرارتی

Material Selection of Heat Exchanger

برای انتخاب مواد برای مبدل های حراراتی و مخازن تحت فشار باید عوامل زیر را در نظر گرفت:

1- سازگاری مواد با سیالات فرآیند

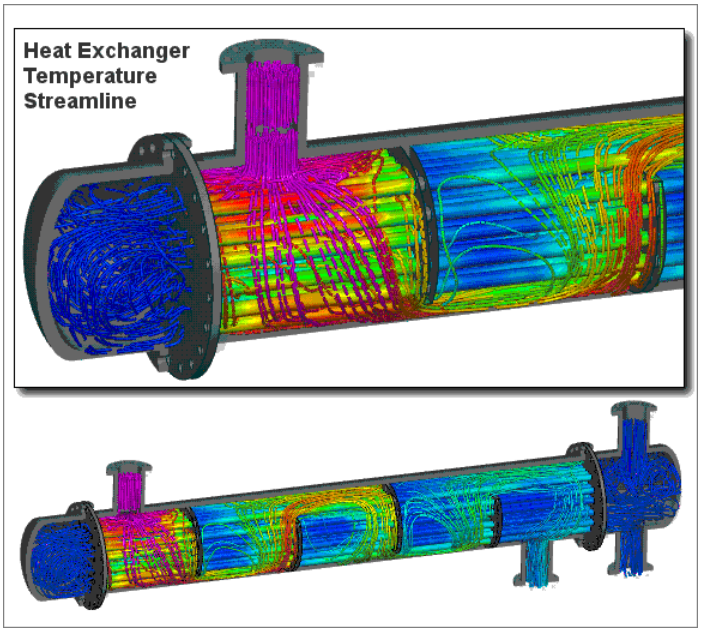
2- سازگاری مواد با سایر مواد به کار رفته در مبدل حرارتی

3- سهولت ساخت و تولید با استفاده از روش های استاندارد ماشین کاری، نورد، فورجینگ، شکل دهی و روش های اتصال مواد مانند جوشکاری، لحیم کاری و لحیم برنجی

4- استحکام ماده و توانایی تحمل فشار و دمای کار

5- هزینه

6- دردسترس بودن



هنگام انتخاب مواد برای مبدل های حرارتی باید شروط زیادی را در نظر گرفت. این شروط شامل موارد زیر می شود:

طول عمر کارخانه یا فرآیند

طول عمر کاری مواد

قابلیت اطمینان (مقدار ایمنی، خطرات و آسیب های محیط زیستی در صورت تخریب)

هزینه مواد

هزینه های تولید

هزینه های نگهداری و بازرسی

در دسترس بودن از نظر اندازه، شکل، ضخامت و زمان تحویل کالا

بازده سرمایه گذاری

مواد بر اساس تجربه، تست های خوردگی، مقالات و پیشنهادات تامین کننده انتخاب می شود. اثر مستقیم نحوه انتخاب مواد و فرآیند ساخت در نحوه عملکرد محصول در حین کار مشخص می شود. برای حصول اطمینان از اینکه محصول ساخته شده ایمن، قابل اطمینان و بی نقص است باید توجه ویژه ای به انتخاب مواد کرد. فرآیند انتخاب مواد با طراحی آغاز شده و در مراحل تولید، نصب و نگهداری ادامه می یابد. هنگامی که محصول در حال کار است باید عملکرد آن مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به منطق ذکر شده به بررسی انتخاب مواد برای مخازن تحت فشار و مبدل های حرارتی می پردازیم.

مروری بر فرآیند کاری

یکی از نخستین گام ها در انتخاب مواد بررسی محیط و شرایط کاری تجهیزات است که از جمله این موارد می توان به دما، فشار و فازهای سیال اشاره کرد. داده های زیر توسط مهندس طراح تعیین می شوند:

- محیط : طبیعت و ترکیب سیالات، شیمی آب، کیفیت بخار، ترکیبات و غلظت محلول، رسانایی، pH، هوادهی، ناخالصی ها و ...
- فشار: محدوده فشار و میانگین فشار، ثابت بودن یا متغیر بودن فشار، بارهای داخلی و خارجی
- دما: میانگین و محدوده دما، ثابت یا متغییر بودن دما، گرادیان های حرارتی و شوک حرارتی
- سرعت: سرعت حرکت جریان، سرعت خطی، سرعت اسمی و محدوده آن، درجه تلاطم، اغتشاش و ....

علاوه بر شرایط فوق عواملی مانند شروع و توقف کار، استفاده دوره ای، ضربات گذرا و تخریب آنی سیستم نیز باید در نظر گرفته شود.

مروری بر طراحی

پس از بررسی فرآیند کار باید نوع و طراحی تجهیزات، اتصالات و اتصالات جانبی، اندازه و پیچیدگی نیز در نظر گرفته شود. بررسی روش های ساخت مانند آهنگری، ماشین کاری، جوشکاری، لحیم کاری و غیره باید اندازه گیری شود.

انتخاب مواد

انتخاب ماده مناسب برای بخش های تر و خشک، بخش های تحت فشار و بدون فشار و تکیه گاه تجهیزات گام مهمی است. استانداردهای مواد مانند جامعه تست و مواد آمریکا (American Society for Testing and Materials)یاASTM ، DIN، BS، ISOو JIS اطلاعات زیادی در مود مواد آهنی و غیر آهنی ارائه می دهند. بسیاری از مواد توسط کدهای مخازن تحت فشار از کشور صادر کننده استاندارد انتخاب شده اند. اطلاعات این استانداردها توسط خواص فیزیکی مانند مدول یانگ، استحکام تسلیم، مینیمم استحکام کششی، ماکزیمم دمای مجاز کار، ازدیاد طول، ضریب انبساط و غیره تعیین شده اند. اما کدها و استانداردها به طور واضح به بیان مناسب بودن ماده برای شرایط کاری نمی پردازند. این اطلاعات باید توسط مهندس خوردگی یا سایر مراجع تعیین شود.

- بخش های تحت فشار:

تمام مواد مورد استفاده در بخش های تحت فشار باید با کد ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II مطابقت داشته باشند. تنها موادی که در کد مشخص شده اند باید برای ساخت مخزن تحت فشار یا تعمیر آن مورد استفاده قرار گیرند. تولید کننده باید هر ماده را پس از بازرسی با ترکیب شیمیایی، متالورژی و خواص قید شده تحویل دهد. تنش وارده بر هر قطعه نباید از میزان مجاز ذکر شده در کد فراتر رود.

- بخش های بدون فشار

مواد مورد استفاده برای بخش های بدون فشار باید با سیالات فرآیند و محیط اطراف سازگار بوده و قابلیت جوشکاری داشته باشند.

- الزامات کاری مواد

عملکرد یک تجهیز با عمر طولانی و بدون مشکل آن سنجیده می شود. هر ماده انتخابی شرایط کاری ویژه ای دارد که عملکرد تجهیز را تحت تاثیر قرار می دهد.

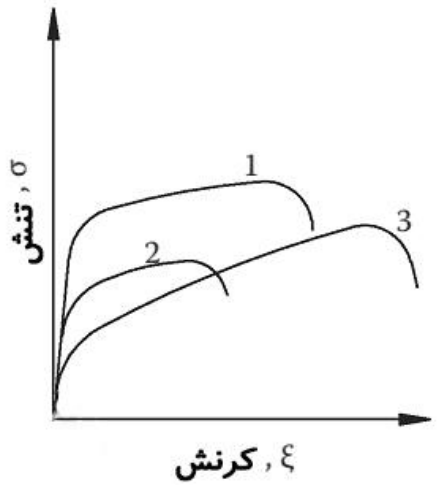
در مورد شرایط کاری ماده باید پارامترهای زیر مورد نظر قرار بگیرد:

1- استحکام
2- استحکام خستگی
3- شکست ترد
4- چقرمگی
5- خزش
6- مقاومت در حرارت
7-حرارت و خوردگی
8- مقاومت به خوردگی
9- حمله هیدروژنی
10- قابلیت ساخت

پارامترهای مهم انتخاب مواد در مبدل های حرارتی

1- استحکام

اگرچه واژه استحکام برای بسیاری از خواص مکانیکی مورد استفاده قرار می گیرد اما منظور از استحکام در واقع استحکام کششی و استحکام تسلیم است .این دو استحکام با بررسی دیاگرام تنش –کرنش به دست می آیند . منحنی تنش – کرنش برای بسیاری از مواد مورد استفاده در مبدل حرارتی در شکل زیر نمایش داده شده است . استحکام در انواع فشاری، خمشی، برشی و پیچشی هم مطرح می شود .به صورت کلی بهتر است از مواد با استحکام بالا استفاده شود تا از حداقل ضخامت مواد استفاده شود.



۱-فولاد دوپلکس(آستنیتی-فریتی)
۲-فولاد زنگ نزن فریتی
۳-فولاد زنگ نزن آستنیتی

2- استحکام خستگی

خستگی در واقع تخریب فلز تحت تاثیر تنش های متناوب است .در حالت معمولی خستگی در اثر نوسان تنش در مقادیر بسیار پایین تر از استحکام کششی رخ می دهد .هر چه تنش افزایش یابد، تعداد تناوب های مورد نیاز برای تخریب یا شکست ماده کاهش می یابد .برای بررسی رفتار خستگی از نمودارهایS-N یا تنش بر حسب تعداد سیکل استفاده می شود. در این نمودار تنش بر حسب لگاریتم تعداد سیکل نمایش داده می شود. برای تعداد مشخصی سیکل حدی از تنش وجود که در مقادیر کمتر از آن شکست رخ نمی دهد و به آن حد تحمل و حد خستگی گفته می شود. برای جلوگیری از تخریب قطعه باید مقدار تنش های نامی در مقادیر کمتر از حد خستگی نگه داشته شود. امکان به وجود آمدن خستگی تقریبا همیشه با وجود ناپیوستگی ها، شیارها، شوک ها، تنش های باقی مانده و غیره همراه است. خستگی معمولا در اتصالات جوشی رخ می دهد زیرا این اتصالات ذاتا میزان تمرکز تنش را افزایش می دهند. برخی از مواد و روش های طراحی که در برابر خستگی مقاوم هستند، عبارتند از:
افزایش استحکام کششی با آلیاژ سازی یا عملیات حرارتی، کاهش ضخامت قطعه، پولیش سطوح، کاهش تنش طراحی، کاهش اندازه دانه، کاهش ناپیوستگی های متالورژیکی و تنش باقی مانده، ایجاد تنش فشاری در سطح، کاهش نقاط مساعد به خوردگی و خستگی، اجتناب از به کار گیری پوشش فلزی مانند آبکاری کروم، نیکل یا کادمیم که می توانند استحکام خستگی را به علت وجود میکروترک ها در آبکاری کاهش دهد .برای مخازن تحت فشار، فشارهای هیدرواستاتیک بیشتر از تنش تسلیم می تواند تنش باقیمانده را آزاد کرده و استحکام خستگی را بهبود دهند.

3- شکست ترد

شکست ترد واژه ای است که برای توصیف شکست به وسیله گسترش ناگهانی ترک در تنش های زیر استحکام تسلیم رخ می دهد .شکست ترد بیش از همه در فلزاتی با ساختار کریستالیBCC دیده شده است. به خصوص فولادهای فریتی که شکست کامل در شرایط خاصی در زیر تنش تسلیم رخ می دهد. شرایطی که منجر به شکست ترد قطعه می شوند عبارتند از:

- وجود عیب.
- وجود تنش باقی مانده یا تنش اعمالی به عیب که در صورت سه بعدی بودن شرایط بدتری نیز ایجاد می کند.
- دمای پایین.
- عوامل متالورژیکی اکسیژن زدایی، ترکیب، نورد و عملیات حرارتی ثانویه

همانطور که در کدASME بخش 1 نوشته شده است اجزای مخزن تحت فشار باید از نظر شکست ترد مورد ارزیابی قرار گیرند. که از جمله این قطعات می توان به پوسته، نازلکلگی، صفحه لوله گیر، پوشش پلیت ها، فلنج ها، پد تقویتی اشاره کرد .فاکتورminimum design metal temperature یا به طور خلاصه MDMT یا حداقل دمای طراحی فلز، کمترین دمایی است که در آن قطعه مود نظر چقرمگی شکست کافی دارد. هر قطعه باید توسط تست ضربه و بسته به ضخامت ماده و MDMT مورد ارزیابی قرار گیرد. شکست ترد برای طراحان مخازن تحت فشار به دلایل زیر اهمیت دارد:

- اگر مخزن در دمای بالا کار کند به نحوی که در آن دما انتظار ایجاد شکست ترد وجود نداشته باشد، احتمال شکست مخزن در هنگام تست هیدرواستاتیک سرد پیش از کار وجود دارد و مورد دیگر که باید به آن توجه داشت تردی تمپر در فولادهای کروم مولیبدن است که در اثر دماهای بالای کار و زمان طولانی کارکرد در پالایشگاه ایجاد می شود.
- تغییر تناوبی بار و دما در هنگام کارکرد طولانی ممکن است اندازه عیوب را افزایش دهد و آن را به مقدار بحرانی برساند و منجر به شکست ترد در زمان آغاز یا اتمام کار و یا تست های دوره ای در حالت سرد شود.
- در مورد مخازن اتمی، بمباران نوترونی می تواند دمای انتقال یا TT را افزایش دهد.

در ساختارهای جوشکاری شده، شکست ترد از عیوب جوش آغاز می شود. شکست ترد اتصالات جوش به چقرمگی کل قطعه، اندازه بحرانی ترک و شیار، کرنش باقیمانده جوش، قیود مکانیکی، اندازه دانه، میزان ناخالصی و دما بستگی دارد. نباید فراموش کرد که یک ماده داکتیل می تواند در شرایط تنش سه بعدی تحت شکست ترد قرار بگیرد. برای کاهش شکست ترد می توان از مواد مقاوم به شیار استفاده کرد یا از شیارها اجتناب کرد. رعایت موارد زیر در طراحی شکست ترد را کاهش می دهد:

- محدود کردن عیوب، که عملا امکان پذیر نیست.
- تنش طراحی را به شکلی در نظر گرفت که از میزان لازم برای گسترش ترک کمتر باشد، اما از نظر اقتصادی به صرفه نیست.
- انتخاب ماده ای که دمای TT آن از دمای کار کمتر باشد.

- اگر تنش های سازه آزاد نشده باشد، تنش های باقی مانده به تنش اعمالی افزوده شده و منجر به تسلیم موضعی در نواحی اطراف عیوب شده و در نتیجه شکست ترد را ایجاد خواهد کرد.

برخی راهکارهای عملی برای کاهش احتمال شکست در شرایط غیر کاری به شرح زیر است:

- لبه های بریده شده و جوشکاری شده باید پیش از شکل دهی با سنگ یا سمباده آماده شوند.
- شکل دهی گرم باید در شرایطی انجام گیرد که دما محیط کمتر از 24 درجه سانتی گراد است.
- انتخاب مواد باید با شرایط کاری و الزامات کد سازگار باشد و باید در نظر داشت که الزامات کد تنها به مینیم استانداردها اشاره کرده است.

4- تافنس (چقرمگی)

چقرمگی یک ماده، توانایی آن در جذب انرژی و تغییر شکل پلاستیک پیش از شکست است. مقدار انرژی جذب شده در هنگام دو فرآیند تغییر شکل و شکست به عنوان چقرمگی اندازه گیری می شود. هنگامی که خواص مکانیکی در دمای پایین مطرح باشد اهمیت چقرمگی از استحکام بیشتر می شود. چقرمگی شیار تحت تاثیر ترکیب شیمیایی، ریزساختار، اندازه دانه، الگوی جریان دانه، اندازه سطح مقطع، دمای کار گرم و کار سرد، روش ساخت و شرایط سطحی مانند کربوراسیون و دکربوراسیون است.

تست های پایه: در رایج ترین تست های چقرمگی از نمونه های شیار دار استفاده می شود و چقرمگی توسط تست ضربه و چقرمگی شکست در نرخ کرنش پایین تر اندازه گیری می شود. تست های ضربه استحکام ماده در دمای پایین، کاهش داکتیلیته و تردی را مشخص می کنند. این تست ها در مورد مواد با ساختار BCC که انتقال از حالت داکتیل به ترد یا DBT را نشان می دهند، انجام می شود. دو روش رایج تست های چارپی و ایزود هستند.

تست چارپی با شیار V شکل (ASTM E23): تست چارپی با شیار V شکل یکی از مناسب ترین تست هاست، زیرا قطعه یا سازه به علت وجود شیار و یا تمرکز تنش شکسته می شود. این تست برای بدست آوردن انرژی جذب شده، انبساط عرضی و ظاهر شکست در قطعه ای به ابعاد $10\times10\times55$ میلی متر از ماده مورد نظر تحت بار ضربه ای اجرا می شود. شعاع شیار در نمونه 0.254 میلی متر یا 0.010 اینچ است. نتایج تست ظرفیت جذب انرژی بر حسب فوت پوند و در نتیجه نشان دهنده توانایی ماده در مقابل شکست در شرایط تمرکز تنش است.

تست شارپی با شیار V شکل ترک دار: این تست معمولا برای اندازه گیری چقرمگی شکست به کار می رود.

دمای انتقال داکتیلیته صفر NDTT یا Nil-ductility transition temperature بر اساس ASTM E208: این تست دمایی را مشخص می کند که ماده تحت تنش تسلیم به مقدار اندکی سیلان پیدا می کند. این تست به همراه تست شارپی با شیار V شکل میزان چقرمگی شکست مرجع در استاندارد ASME را مشخص می کند.

چقرمگی شکست: چقرمگی شیار مقیاس خوبی برای فولادهای با استحکام بالا و مواد غیر فلزی نیست زیرا این مواد به تدریج انتقال از حالت ترد به نرم را نشان می دهند. همین طور تجربه نشان داده است که نتایج تست شارپی با شیار V شکل به تنهایی مشخص نمی کند که آیا ترک با یک اندازه مشخص به آرامی رشد می کند یا مانند شرایطی که در مخازن حمل گاز مایع وجود دارد به صورت ناگهانی می شکند. در این شرایط مقدار چقرمگی شکست به عنوان چقرمگی فلز ارزیابی می شود و این روش مکانیک شکست نامیده می شود. چقرمگی شکست در حالت کرنش

صفحه ای یا مقدار KIC برای محاسبه اندازه ترک بحرانی در یک قطعه تحت تنش که می تواند به شکست ناگهانی منجر شود، به کار می رود. مقدار KIC بر خلاف مقدار چقرمگی مستقل از شکل قطعه است.

چقرمگی شکست (ASTM E399 and E813): این دو تست تنها تست هایی هستند که مقادیر چقرمگی شکست "ASTM valid" را می دهند. تست E399 برای چقرمگی شکست KIC الاستیک خطی و E813 برای محاسبه کار یا J-Integral که می تواند به KIC تبدیل شود، استفاده می شوند.

5- خزش

خزش به عنوان تغییر شکل آرام یک ماده با زمان در دماهای بالا بدون افزایش تنش تعریف می شود .در دمای اتاق خزشی در فولاد رخ نمی دهد .اما بسیاری از فولادهایی که برای مخازن تحت فشار استفاده می شوند باید در شرایط ایجاد خزش کار کنند .طراحی این مواد بر اساس نمونه های آزمایشی شامل تنشی می شود که در مقادیر کمتر از آن قطعه در طول عمر مورد انتظار نشکند .پدیده خزش به خوبی مورد بررسی قرار گرفته است و نوع طراحی برای جلوگیری از آن مشخص بوده و مسئله خاصی در این شرایط رخ نمی دهد .اما باید دو نکته را در نظر گرفت.

-اگر طراحی ضعیف باشد و یک تنش موضعی بالا و پیش بینی نشده رخ دهد ممکن است تغییر شکل ناشی از خزش از مقدار مجاز فراتر رفته و منجربه شکست پیش از موعد قطعه شود.

-اگر تنش سازه ها آزاد نشده باشد، تنش باقی مانده می تواند به تنش اعمالی افزوده شده و منجر به شکست پیش از موعد قطعه شود .این پدیده ممکن است در جوش ها و نازل ها رخ دهد .بنابراین مهم است که به خاطر داشته باشیم که مخازنی که تحت شرایط خزش کار می کنند پیش از آغاز کار تنش زدایی شوند.

تست خزش :تست های سنجش مقاومت ماده در دماهای بالا به سه دسته تقسیم بندی می شوند.

1- تست های کوتاه مدت کشش، فشار، خمش، برش، پیچش و ضربه که در دماهای بالا انجام می شوند.

2- تست های کوتاه مدت که در دمای اتاق و پس از قرار گرفتن در معرض حرارت در زمان های متفاوت انجام می شود.

3- تست های بلند مدت که در دمای اتاق انجام می شوند.

تست های بلند مدت را می توان به تست های با بار ثابت (خزش، تنش گسیختگی و بسیاری از تست های خستگی) و یا خمیدگی ثابت (رهاسازی تنش و برخی تست های خستگی) تقسیم بندی کرد.

تست استانداردی که برای تعیین میزان خزش به کار می رود ASTM E139 با عنوان " Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials" است.

پارامتر لارسن میلر برای استفاده از داده های تست هایی که در دمای بالا برای تعیین زمان گسیختگی خزش استفاده می شوند، قابل اعتماد است. پارامتر لارسن میلر یا P که برای پیش بینی داده های تنش گسیختگی برای فولادهای کم آلیاژ توسط معادله زیر بدست می آید:

$$P=T(1.8+\log t)\times 10^{-3}$$

که در این معادله:

T: دما بر حسب کلوین

t : زمان برحسب ساعت

k: ثابت که برای فولادهای کم آلیاژ 20 در نظر گرفته می شود.

6- مقاومت در برابر حرارت

مقاومت در برابر حرارت مواد ساختمانی در دماهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد زیرا رفتار مواد به شدت به دمای کارکرد آن ها بستگی دارد. به این ترتیب دمای کاری به 4 محدوده تقسیم بندی می شود:

1- دمای کارکرد زیر صفر وکاربردهای برودتی

2- دمای کاری پایین (تا 200 درجه سانتی گراد)

3- دمای کاری متوسط (200 تا 650 درجه سانتی گراد)

4- دمای کاری بالا (بیش از 650 درجه سانتی گراد)

دمای کارکرد زیر صفر وکاربردهای برودتی

یکی از مهمترین ویژگی های مواد برای کاربرد در دماهای زیر صفر چقرمگی است. فولادها و مواد غیر فلزی در کاربردهای برودتی برای نگهداری، جابجایی و حمل و نقل گازهای مایع و میعان گازها به کار می روند. برخی از فولادها در بازه دمایی کوچکی زیر دمای اتاق کاهش شدیدی در داکتیلیته یا (temprature nil-ductility) از خود نشان می دهند. به این پدیده دمای انتقال تردی به نرمی یا DBTT گفته می شود. استفاده از فلزات در زیر NDT منجر به شکست ترد می شود زیرا در این دما انرژی کمی برای گسترش ترک نیاز است.

دما کاری متوسط

دمای کاری متوسط شامل بیشتر مخازن مورد استفاده در صنایع نفت و پتروشیمی است. مهمترین پارامترهایی که در این دما باید مورد توجه قرار گیرد مقادیر تنش ها و طراحی مناسب قطعه و داکتیلیته ماده است.

کاربرد دمای بالا

در کاربردهای دمای بالا مواد در حالت نیمه پلاستیک یا پلاستیک قرار دارند و طراحی باید بر اساس تنش هایی انجام گیرد که تغییر شکل غیر الاستیک در محدوده مجاز بوده و منجر به شکست قطعه نشود. تنش های طراحی در دمای بالا بر اساس استحکام خزشی بلند مدت و مقاومت فلز در برابر پوسته شدن مشخص می شوند. برای استفاده در دمای بالا باید توجه کرد که ماده مورد نظر خواصی مشخصی را داشته باشند که در جدول زیر بیان شده است.

خواص مکانیکی مهم برای کاردردمای بالا
استحکام کششی یا استحکام تسلیم
استحکام خزشی و خزش - گسیختگی
پارامترهای خستگی حرارتی
پارامترهای شوک حرارتی
تردی تمپر
خوردگی در اثر سولفیدها، سولفیداسیون دما بالا برای فولادهای کربنی در دمای بالا 260 درجه سانتی گراد و مقدار گوگرد بالای 0.2 درصد
پایداری متالورژیکی، اندازه دانه، تبلور مجدد، تغییر فاز و غیره

مقاومت در برابر اکسیداسیون سطحی و کربوریزاسیون
رسوب فازهای بین فلزی در مرز دانه و تخریب جوش

در دماهای بالای 800 درجه فارنهایت یا 425 درجه سانتی گراد مواد باید در برابر حرارت مقاوم بوده و خواص مقاومت در برابر خوردگی، استحکام مکانیکی، پایداری متالورژیکی، مقاومت خزشی، مقاومت به اکسیداسیون، استحکام تنش گسیختگی، و پایداری سطحی خود را در مقابل گازهای احتراق و مواد شیمیایی حفظ کنند.

عناصر آلیاژی برای مواد مقاوم به حرارت:

فولادها باید برای مقاومت در برابر اکسیداسیون حاوی کروم باشد. کبالت، آلومینیم، سیلیسیم و عناصر کمیاب خاکی تشکیل، پایداری و چسبندگی لایه اکسیدی سطحی را بهبود می بخشند .نیکل، منجر به افزایش استحکام، پایداری، چقرمگی و مقاومت به کربوریزاسیون می شود .تنگستن و مولیبدن نیز استحکام دمای بالا را افزایش می دهند.

مواد و دمای کاری آن ها

برای دماهای بالای 600 درجه سانتی گراد از مواد زیر استفاده میشود:

1- فولادهای فریتی با 17تا 27درصد کروم و مولیبدن

2- فولادهای آستنیتی پر استحکام و دما بالا)فولادهای کروم -نیکل -مولیبدن با مقدار نیکل بالای (% 8 مانند فولادهای321 ، 347، 316و 310

3- فولادهای زنگ نزن ریخته گری شده و مقاوم در برابر حرارتHC :، HK، HT، HP، HX

4- آلیاژهای پایه نیکل رسوب سختی شده حاوی کروم، مانند X-718 و X-750

5- آلیاژهای پایه کبالت: N-155، 188، L605، 25

6- سرامیک های پیشرفته و سایر مواد دیرگداز (دمای بالا 1200 درجه سانتی گراد)

معمولا به مواد رده 4 تا 6 سوپر آلیاژ گفته می شود.

فولادهایی برای کاربردهای دما بالا

1- فولادهای کم آلیاژ برای کار در دمای بالا

فولادهای آلیاژی C-Mo، فولادهای آلیاژی کروم-مولیبدن و فولادهای آلیاژی منگنز - مولیبدن - (نیکل) برای کاربرهای دما بالا مورد استفاده قرار می گیرند. هنگامی که استحکام دما بالا (استحکام خزشی) مد نظر باشد، معمولا میزان مولیبدن در ترکیب فولاد افزایش می یابد اما اگر مقاومت به خوردگی در دمای بالا مد نظر باشد مقدار کروم افزایش می یابد. به عنوان مثال در مورد تجهیزات پالایش نفت خام که در معرض حمله هیدروژنی هستند، کروم و مولیبدن را برای افزایش مقاومت در برابر حمله هیدروژنی استفاده می کنند.

2- فولادهای زنگ نزن برای دمای بالا

می توان از فولادهای کربنی تا دمای 400 درجه سانتی گراد و از فولادهای کم آلیاژ تا دمای 600 - 650 درجه سانتی گراد استفاده کرد. اما نمی توان از این مواد در بالای این محدوده دمایی به علت وقوع خزش استفاده کرد. اگرچه سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت می توانند دماهای بالا را بدون افت خواص مکانیکی تحمل کنند اما به

علت قیمت بالا و در دسترس نبودن، برای کاربردهای عمومی مانند نیروگاه های فسیلی با دمای کاری 600 تا 650 درجه سانتی گراد استفاده نمی شوند. برای این محدوده دمایی فولاد زنگ نـزن آسـتنیتی تـرجیح داده مـی شـود. در حالی که فولاد زنگ نزن برای این محدوده انتخاب می شود عـلاوه بـر اسـتحکام خزشـی بایـد خـوردگی دمـا بـالا، اکسیداسیون، پوسته شدن و کربوراسیون و رسوب فاز ثانویه را نیز در نظر داشت. در ایـن مـورد اسـتفاده از Brite-E 26-1 یا (Allegheny Ludlum) بسیاری از مشکلات مرتبط با استفاده از 316 را نخواهد داشت.

3- توسعه تکنولوژی آلیاژهای آهنی برای کاربردهای دما بالا

در طی 25 سال گذشته آلیاژهای جدید با استحکام و مقاومت به خوردگی بالاتر برای اسـتفاده در صـنایع هسـته ای، فسیلی و پیتروشیمیایی توسعه پیدا کرده اند. گروه های خاصی از آلیاژها شامل فولادهای کم آلیـاژ حـاوی وانـادیم، فولاد Cr-1Mo-V9 ، فولادهای زنگ نزن با مقـادیر کـم نیوبیـوم و آلیاژهـای کـرم-نیکـل- آهـن . افـزودن عناصـر آلیاژی وانادیم، نیوبیوم، تیتانیم و نیتروژن در افزایش استحکام فولادهای فریتی و آستنیتی نقش موثری داشته اند.

مواد مقاوم در برابر حرارت بر پایه نیکل:

اینکونل) آلیاژهای نیکل-کروم (و اینکو در برابر اکسیداسیون و کربوریزاسیون و سایر تخریب های دمای بالا مقـاوم است .آلیاژهای مقاوم در برابر حرارت متداول عبارتند از:

1- آلیاژ اینکونل 600، 601، 617، 625، 718و X-750، آلیاژ اینکو HX

2-آلیاژهای نیکل-آهن- کروم و آلیاژ اینکو نیکل-آهن- کروم مانند اینکولوی 800، HT800، 825

3- سایر آلیاژهای جدید مانند MA253، 556، HR-120، HR-160، ASTM23045 و 214.جدول 13.3 گـروه های مواد و دماهای کاری آن ها را نشان می دهد.

مواد برای کاربردهای دما بالا	
محدوده دمایی (سانتی گراد)	آلیاژها
تا 650	فولادهای کربنی با کمتر از 1 درصد کروم یا دارای 1 تا 12 درصد کروم و مولیبدن تا 1 درصد
650 تا 800	فولادهای کرربنی و کم آلیاژ، فولادهای Cr-Ni-Mo که حاوی 12 تا 25 درصد کـروم و 5 تـا 25 درصد نیکل هستند. مانندAISI 310
800 تا 1000	فولادهایی با 17 تا 27 درصد کروم و مولیبدن، یا فولادهای Cr-Ni-Mo با بیش از 8 درصد نیکل
1000 تا 1200	آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت با18 تا 35 درصد کروم، افزودن آلومینیم به این آلیاژهـا مقاومـت آن ها را در برابر اکسیداسیون دمای بالا و اکسیداسیون متناوب افزایش می دهد.
بیش از 1200	سرامیک های پیشرفته و مواد دیرگداز

تست هایی برای ارزیابی فولادها در دمای بالا: انواع تست های مورد استفاده برای ارزیـابی خـواص فـولاد در دمـای بالا شامل موارد زیر می شود:

تست های دما بالا کوتاه مدت

تست های دما بالا بلند مدت

تست های کوتاه مدت و بلند مدت که پس از قرار گرفتن در معرض حرارت به مدت طولانی انجام می شود.

تست های خستگی (شامل خستگی حرارتی و آزمون های شوک حرارتی)

تست های خستگی وابسته به زمان

تست های داکتیلیته و چقرمگی

7- حرارت و خوردگی

آلیاژهایی که هر دو خواص دما بالا و مقاومت به خوردگی مناسب را دارند برای استفاده طولانی مدت در فرآیندهای دما بالا و محیط های آلوده به مواد خورنده ضروری هستند.

مکانیزم خوردگی در دمای بالا: بسیاری از خوردگی های دما بالا به دلیل تخریب پوسته سطحی رخ می دهد. ناخالصی های متداولی که شدت خوردگی دما بالا را افزایش می دهند شامل کربن، نیتروژن، هالوژن ها، گوگرد، خاکستر و نمک مذاب می شود. مکانیزم خوردگی در دمای بالا شامل مراحل زیر است:

1- کربوریزاسیون: که منجر به رسوب کاربیدهای داخلی و تردی می شود.

2- نیتریدیزاسیون: که منجر به رسوب داخلی نیتریدها و تردی می شود.

3- تشکیل هالیدهای فلزی فرار روی سطح

4- رسوب خاکستر داغ و تشکیل مناطق مذاب

5- خوردگی به دلیل حضور گوگرد در سیالات فرآیندی یا سولفیداسیون

تغییر ترکیب آلیاژ برای غلبه بر مشکلات خوردگی در دمای بالا با افزودن Cr، Ni، Si، Al و Mo به صورت جداگانه یا همزمان صورت می گیرد.

8- مقاومت به خوردگی

بسیاری از فلزات و آلیاژهای آن ها، غیر فلزات ماند پلاستیک، شیشه و گرافیت توسط هوا، آب یا محلول های آبی مورد حمله قرار می گیرند. تخریب فلزات و آلیاژ ها به این وسیله خوردگی نامیده می شود. از آنجایی که اکثر فرآیندهای تجاری به صورت پیوسته هستند، شکستن یا آسیب دیدن تجهیزات، مبدل های حرارتی، لوله ها و سایر اجزای سیستم به معنای تحمیل هزینه های سنگین خاموشی، تعمیرات و جایگزینی قطعات است. بنابراین ساخت قطعات برای مخازن تحت فشار مبدل های حرارتی باید به نحوی باشد که نرخ خوردگی مطلوبی در حین عمر کاری داشته باشند. نگرانی دیگر در مورد اتمسفر کاری این قطعات است.

انتخاب مواد برای مقابله با شرایط خورنده:

ترکیب های مرجح: درانتخاب آلیاژها همیشه ترکیب هایی از فلز و محیط خورنده وجود دارد که مقاومت در برابر خوردگی را با کمترین هزینه به حداکثر مقدار می رسانند. یک لیست جزئی از این ترکیبات در ادامه آورده شده است:

- فولادکربنی/ اسید سولفوریک غلیظ
- فولادهای زنگ نزن/ اسید نیتریک
- آلومینیم / اتمسفر غیر آلوده
- مس – نیکل /آب شور و آب دریا
- مونل / 400اسید هیدروفلوئوریک

-هاستلوی / اسید هیدروکلریک داغ

-تیتانیم /محلول های اکسیدکننده قوی و داغ

-تانتالم / بسیاری از مواد شیمیایی

-فولادهای سوپرفریتی / آب دریا

ترکیب های ممنوع :برخی از ترکیب های فلز و محیط خورنده وجود دارند که بسیار مخرب هستند و باید از ایجاد این ترکیب ها جلوگیری کرد:

-آمونیاک و محلول های آمونیاکی / مس و آلیاژهای مس به جز مس –نیکل ها

-هالوژن ها و هالیدها /فولادهای زنگ نزن آستنیتی

-جیوه / آلومینیم و آلیازهای آن، مس و آلیاژهای آن، مونل

-گوگرد و سولفیدها)در دماهای بالا / (نیکل و آلیاژهای نیکل

-سود سوزآور و سایر بازهای قوی / آلومینیم

مرجع داده های مواد :برای آگاهی از عملکرد یک ماده، مهندس مواد باید اطلاعاتی در مورد خوردگی مواد در محیط های مختلف داشته باشد .طیف وسیعی از اطلاعات خوردگی موجود است .موارد زیر از رایج ترین مراجع داده های خوردگی هستند:

-1اعطا کننده جواز فرآیند Process Licensors))

2- کارخانجات و نیروگاه موجود و استفاده از تجربیات آن ها.

3- داده های تست واحد پایلوت و مانیتورنیگ خوردگی در کارخانه و نیروگاه.

4- نشریات فنی.

5- اطلاعاتی که توسط شرکت های صنعتی خصوصی (معمولا تامین کننده ها) جمع آوری شده اند که با درخواست شرکتها در اختیار آن ها قرار می گیرد مانند Inco Alloys، Allegheny Ludlum، Lukens Steels، US Steels، TIMET، RMI، Company TiTanium وغیره.

6- نشریات تجاری.

سایر مراجع برای کسب اطلاعات:

نشریات انجمن های فنی مانند انجمن ملی مهندسان خوردگی (NACE)، جامعه آمریکایی فلزات (ASTM)، انجمن آلومینیم (AA)، انجمن توسعه مس (CDA)، جامعه مهندسان خودرو و غیره...

انجمن های تخصصی مانند HTRI و HTFS

نشریات دولتی

تخریب های خوردگی:

حتی زمانی که مواد به دقت انتخاب شده و از روش های ممانعت از خوردگی استفاده می شود، برخی تخریب های غیر منتظره رخ می دهد و باید راهکاری برای این شرایط در نظر گرفته شود. تخریب های غیر منتظره از یکی از موارد زیر ناشی می شود:

1- ماده معیوب

2- طراحی نامناسب

3- شرایط کاری غیرعادی

4- تولید نامناسب و عدم بازرسی کافی

5- نگهداری نامناسب

9- حمله هیدروژنی

حمله هیدروژنی یک مکانیزم تخریب است که در مورد فولادهای کربنی و کم آلیاژ که در معرض هیدروژن در دماهای 200 تا 243 درجه سانتی گراد قرار می گیرند رخ می دهد. در دمای اتاق نیز هیدروژن تحت فشار نمی تواند در سیلندرهای فولادی نگهداری شود. در دماهای بالا هیدروژن در فولاد حل شده و می تواند با اتم های کربن واکنش داده و طبق واکنش زیر تشکیل گاز متان دهد:

$$Fe+4FeC\rightarrow CH+2H_2$$

در دماها یا فشارهای بالا؛ هیدروژن می تواند با کرین که به صورت بین نشین در محلول جامد قرار دارد واکنش داده و منجر به دکربوریزاسیون شود. این کار منجر به ناپایدار شدن کاربیدها و تشکیل حباب های متان در مرزدانه ها می شود. از آنجایی که متان نمی تواند در فولاد نفوذ کرده و خارج شود، تجمع آن موجب شکافتگی و تاول شده و در نتیجه داکتیلیته را کاهش می دهد که در نهایت منجر به تخریب می شود. پایداری ترکیب کاربید، مرفولوژی و توزیع مناسب آن ها برای کاهش این مشکل مفید است.

جلوگیری از حمله هیدروژنی

تنها راه عملی برای جلوگیری از حمله هیدروژنی استفاده از فولادها بر اساس تجربیات کارخانه ها است . قوانین زیر بر حمله هیدروژنی حاکم هستند:

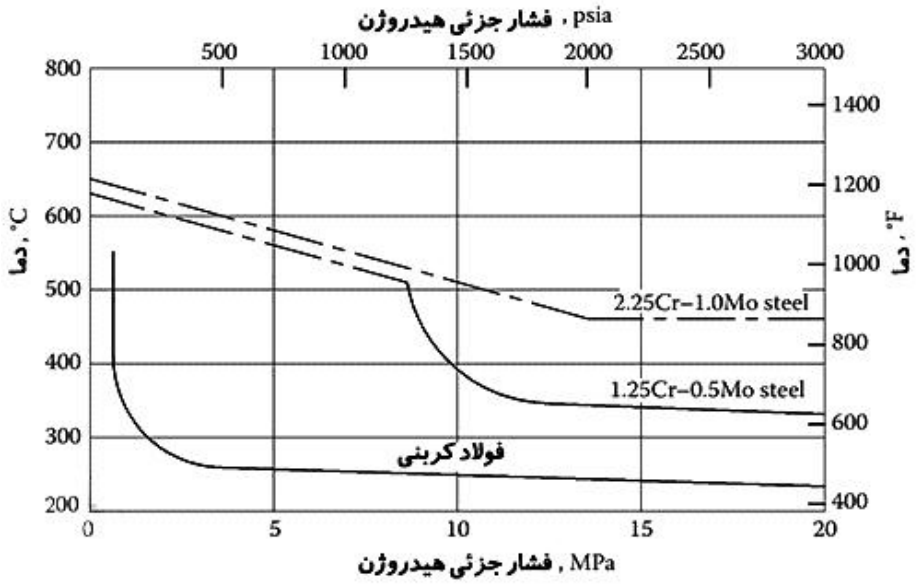
عناصر آلیاژی تشکیل دهنده کاربید مانندکروم و مولیبدن، یا عناصر آلیاژی پایدار کننده کاربید مانند کروم، تیتانیم و وانادیم، مقاومت فولاد را در برابر حمله هیدروزنی افزایش می دهند. مولیبدن در این زمینه چهار برابر موثر تر از کروم است. وانادیم به عنوان یک استحکام دهنده قوی در فولادهای کم آلیاژ برای رسوب CV استفاده می شود که در برابر حمله هیدروژنی مقاوم است.

تمام فولادهای زنگ نزن آستنیتی در برابر حمله هیدروژنی در دمای بالا مقاومت می کنند زیرا مقدار کروم درترکیب آن ها بالاست. در نتیجه برای جلوگیری از خوردگی داخل مخازن فولاد کم آلیاژ را با فولاد زنگ نزن می پوشانند.

مناطق HAZ یکی از مناطق مستعد در برابر حمله هیدروژنی هستند.

جلوگیری از حمله هیدروژنی با نمودارهای نلسون: حمله هیدروژنی معمولا در انتخاب فولادها برای تجهیزات پالایشگاهی نقش مهمی را بازی می کند. از حمله هیدروژنی به فولاد می توان با محدود کردن دما، فشار جزئی و ترکیب آلیاژها که در نمودارهای نلسون مطرح شده، جلوگیری کرد. نمودارهای نلسون در سراسر جهان برای انتخاب مواد پالایشگاهی مورد استفاده قرار می گیرند. این نمودار ها بر اساس تجارب طولانی مدت در پالایشگاه ها بدست آمده است. این نمودار ها به طور متاوب توسط زیر مجموعه API که تخصص مهندسی مواد و بازرسی را دارد، مورد بازبینی قرار می گیرد و در این مورد باید به API 941 رجوع کرد.

بخشی از نمودارهای نلسون به صورت شماتیک در شکل نمایش داده شده است. کاربیدهای کروم، مولیبدن نسبت به کاربیدهای آهن تمایل کمتری به واکنش دارند، بنابراین فولادهای کروم-مولیبدن نسبت به فولادهای کربنی مقاومت بیشتری در برابر حمله هیدروژنی دارند .فولادهای زنگ نزن آستنیتی در تمامی دماها و فشارهای هیدروژن در برابر حمله هیدروژنی مقاومند.



10-قابلیت ساخت

قابلیت ساخت شامل سهولت شکل دهی، ماشین کاری، جوشکاری و سایر فرآیندهای اتصال فلزات و عملیات حرارتی ثانویه می شود .تمامی کارگاه ها از نظر فنی توانایی استفاده از مواد مورد نظر را ندارند .بنابراین مصرف کننده باید از ظرفیت های سازنده خود مطلع باشد .به علاوه روش های ساخت پیشرفته به روش های پیشرفته تری برای بازرسی و اطمینان از کیفیت ساخت نیاز دارند.

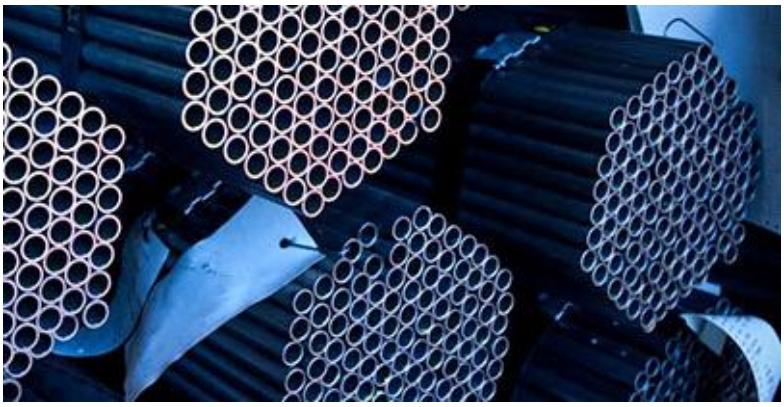
مشخصات لوله و تیوب برای ساخت مبدل حرارتی

Pipe and Tube for Heat Exchanger

این مشخصات در کد ASME به شکل زیر است:

1- لوله و تیوب بدون درز یا جوشکاری شده باید که برای پوسته یا سایر بخش های مخزن تحت فشار به کار می روند باید با مشخصاتی که در کد ASME بخش II نوشته شده مطابقت داشته باشند. مقادیر مجاز تنش برای موادی که در لوله ها و تیوب ها مورد استفاده قرار می گیرنددر جداول UG-23 آمده است.

2- تیوب های تماما تیغه دار ممکن است از تیوب هایی که مشخصات آن ها در بخش II کد ASME ذکر شده است، ساخته شوند.



تیوب ها ممکن است با جوشکاری الکتریکی مقاومتی (ERW)، جوشکاری ذوبی یا بی درز تهیه شوند. هنگامی که کاربرد در فشار بالا مد نظر باشد لوله های بی درز به ERW ترجیح داده می شود. در استاندارد BS 3606 روش های تولید تیوب های فولادی برای مبدل های حرارتی به این شرح است:

1- بدون درز با پرداخت سرد

2- ERW و جوش القایی

3- ERW و جوش القایی با پرداخت سرد

4- جوشکاری طولی و عملیات حرارتی فولاد زنگ نزن آستنیتی

5- جوشکاری طولی، پرداخت سرد و عملیات حرارتی فولاد زنگ نزن آستنیتی

6- جوشکاری طولی با گرده جوش و عملیات حرارتی فولاد زنگ نزن آستنیتی

انتخاب تیوب برای مبدل حرارتی

در انتخاب تیوب برای مبدل های حرارتی علاوه بر انتخاب ماده تیوب باید به موارد زیر نیز توجه کرد:

1- ماده صفحه لوله گیر

2- روش اتصال تیوب ها به صفحه لوله گیر، انبساط غلطتکی (roller expansion)، انبساط انفجاری (explosive expansion) یا جوشکاری ذوبی

3- ماده مورد استفاده برای بستن انتهای لوله ها

4- در مورد واحد هایی که با آب خنک می شوند نیاز به بررسی روش های محافظت در برابر خوردگی مانند پوشش ها و حفاظت کاتدی برای واترباکس، لوله گیر و انتهای لوله ها وجود دارد دارد .علاوه بر این موارد ممکن است نیاز به تصفیه آب برای جلوگیری از پوسته شدن، تخریب و خوردگی باشد.

5- علاوه بر نگرانی های موجود برای سازگاری با محیط باید تیوب ها با یکدیگر هم سازگار باشند تا از ایجاد زوج گالوانیکی جلوگیری شود.

مشخصات تیوب

باید در مشخصات تیوب حداقل یک روش برای بررسی نشتی، تست شکل پذیری و تعیین تلرانس ابعادی مشخص شده باشد. برای تیوب هایی که در محیط های خورنده مورد استفاده قرار می گیرند، کارایی آن ها باید با تست های خوردگی مربوطه سنجیده شود. بازرسی و تست باید پس از فرآیند های عملیات حرارتی و اسید شویی انجام گیرد. تیوب های U شکل را معمولا نمی توان با روش های تست الکتریکی مورد بررسی قرار داد. بازرسی چشمی و تست های زیر آب باید برای تمام تیوب های U شکل پس از خمکاری انجام گیرد.

بازرسی برای تشخیص و حذف کردن تیوب های معیوب یکی از مهم ترین کار هاست. تمامی روش های بررسی عیوب پس از نورد انجام می گیرند. روش های مختلف بررسی عیوب در تیوب ها در ادامه مورد بررسی قرار می گرد. این روش ها عیوب مکانیکی را تشخیص می دهنده که می تواند صرف نظر از محیط خورنده نشتی ایجاد کنند. عیوب مکانیکی شامل عیوب سراسری دیواره، عیوب جزئی دیواره، لایه لایه شدن، عیوب شکل پذیری و عیوب تلرانس ابعادی می شوند. حتی خوردگی ملایم و یکنواخت هم می تواند منجر به باز شدن عیوب و نشتی پیش از موعد می شود.

تست استاندارد برای محصولات لوله ای شکل

تست های استاندارد برای محصولات لوله ای شکل عبارتند از : بازرسی چشمی، تست ادی کارنت-ASTM E) (426، تست های فشار هیدرواستاتیک شامل تست پنوماتیک هوا –زیر آب pneumatic air–underwater) (testing ASTM B-338/ASME SB-338، تست ذرات مغناطیسی، تست التراسونیک(ASTM E-213) ، تست های خوردگی، تست های مکانیکی، تست های متالورژیکی و تست تلرانس ابعادی .تست های هیدرواستاتیک شامل تست های پنوماتیک هوا -زیر آب، تست های خوردگی و تلرانس ابعادی می شود.

- تست فشار هیدرواستاتیک :

تست های هیدرواستاتیک یکی از رایج ترین تست هایی است که روی تیوب ها بر اساس کدهای ASME انجام می گیرد. فشار تست معمولا 6.9 مگا پاسکال است اما این رقم ممکن است برای تیوب های جدار نازک یا با قطر بالا کاهش یابد. در مشخصات ASTM اجازه تست در فشار های بالاتر داده شده است به شرطی که تنش هوپ از حد مشخصی فراتر نرود، گرچه معمولا محدودیت های تجهیزات اجازه انجام تست در فشارهای بالاتر از 38 مگاپاسکال را نمی دهد.

بر اساس استانداردهای ASTM، هر تیوب باید فشار هیدرواستاتیک کافی برای ماده را تا تنش رشته ای 48 مگاپاسکال تحمل کند که توسط معادله زیر برای سیلندرهای جدار نازک تحت فشار داخلی محاسبه می شود:

$$p = \frac{2St}{D - 0.8t}$$

یا

$$P = \frac{2Set}{D - 0.8t}$$

در این معادله :

P فشار هیدرواستاتیک (بر حسب مگا پاسکال یا psi)

S: تنش مجاز در کد برای جنس تیوب (مگا پاسکال یا psi)

e: راندمان اتصال جوش است که برای تیوب جوش شده 0.58 و برای لوله بی درز 1.00 است.

D: قطر خارجی تیوب (بر حسب میلی متر یا اینچ)

t: ضخامت جداره تیوب (بر حسب میلی متر یا اینچ)

تیوب نباید نشانی از نشت داشته باشد. نیازی نیست که تیوب با فشار هیدرواستاتیک بیش از 6.9 مگاپاسکال تست شود مگر این که اشاره شده باشد.

تست پنوماتیک:

تست پنوماتیک هوا - زیر آب نسبت به تست هیدرواستاتیک برای تشخیص عیوب جداره تیوب است که در حین تولید ایجاد شده اند، مناسب تر است. هوا با فشار ماکزیمم 1 مگا پاسکال درون لوله ای که در آب غوطه ور است فرستاده می شود و به مدت 5 ثانیه تحت نظر قرار می گیرد تا از عدم وجود نشتی اطمینان حاصل شود. این تست تنها به مشاهده بصری نشت اکتفا می کند و بر میزان افت فشار که در تست هیدرواستاتیک مورد توجه قرار می گیرد، تمرکز ندارد. ممکن است عیوب بسیار کوچک توسط عبور هوا شناسایی نشوند.

تست های خوردگی:

تست های خوردگی برای ارزیابی مقاومت به خوردگی جنس تیوب انجام می شوند. معمولا بخش کوچکی از تیوب در تست خوردگی مورد استفاده قرار می گیرد. برخی از انواع رایج تست خوردگی عبارتند از: خوردگی یکنواخت، خوردگی مرز دانه ای، تست SCC ، تست خوردگی حفره دار شدن بحرانی، تست خوردگی شیاری، تست خوردگی پوسته شدن.

تست های تلرانس ابعادی:

تست های تلرانس ابعادی عبارتند از: اندازه گیری قطر خارجی، قطر داخلی، ضخامت گوشت جوش، دوپهن شدگی، طول، پهنا و قائمه بودن محل برش.

پوسته نورد:

بسیاری از فولاد های کربنی توسط عملیات گرم شکل داده می شوند که منجر به تشکیل لایه نازک اما خشن از اکسید آهن مغناطیسی ($4O3Fe$) روی سطح فولاد می شود. به این لایه نازک معمولا پوسته نورد می گویند. پوسته نوردنسبت به فلز پایه آندی است و هر گونه انقطاع در این لایه می تواند منجر به حفره دار شدن لوله در محیط خورنده شود. به همین دلیل این لایه پیش از نصب لوله در مبدل حرارتی برداشته می شود.

مشخصات ASTM برای تیوب های آلیاژ آهنی

مشخصات ASTM برای تیوب های آهنی در جدول زیر نمایش داده شده است در استاندارد A498 مشخصات تیوب های پلیسه دار از جنس فولادهای فریتی، آستنیتی و کربنی مطرح شده است .تیوب های پره دار باید از تیوب های ساده که مشخصات آن ها در یکی از استاندارد هایA179 ، A199، A213، A214، A249و A334 ذکر شده، تهیه شوند.

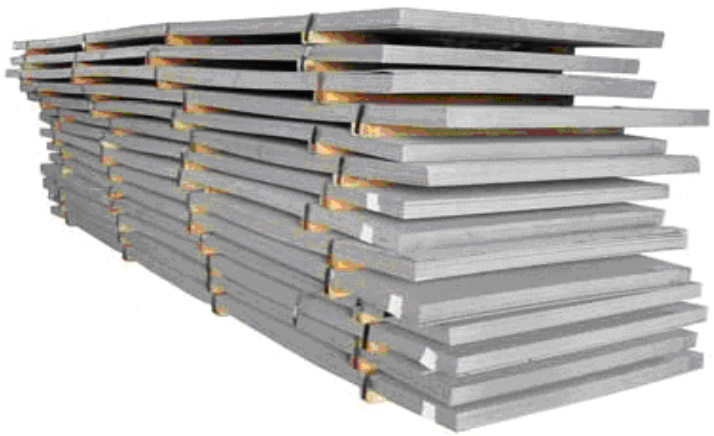
	مشخصات ASTM برای برخی از تیوب های مورد استفاده در مبدل های حرارتی
A179	لوله های بدون درز فولاد کم کربن با کشش سرد برای مبدل های حرارتی و کندانسورها
A199	لوله های بدون درز فولاد آلیاژ متوسط) کروم - مولیبدن و کروم مولیبدن - سیلیسیم (با کشش سرد برای مبدل های حرارتی و کندانسورها

A213	لوله های بدون درز آلیاژی فریتی و آستنیتی برای سوپرهیتر و مبدل حرارتی
A214	تیوب های ERW فولاد کربنی مبدل های حرارتی و تیوب های کندانسور
A249	فولاد آستنیتی جوشکاری شده برای بویلر، سوپرهیتر، مبدل حرارتی و تیوب های کندانسور.
A498	تیوب با جداره خارجی پلیسه دار، بی درز یا جوشکاری شده از فولاد کربنی یا فولاد آلیاژی آستنیتی و فریتی
A556	لوله های فولاد کربنی بدون درز تولید شده با کشش سرد برای آب ورودی و لوله هایU شکل
A557	تیوب های فولاد کربنی (مستقیم و U شکل) برای آب ورودی
A688	تیوب هیتر فولاد زنگ نزن آستنیتی جوشکاری شده و لوله هایU شکل
A803	تیوب هیتر آب ورودی جوشکاری شده فولاد زنگ نزن فریتی و لوله هایU شکل
A851	تیوب های جوشکاری شده با روش القایی فرکانس بالا فولاد آستنیتی، آنیل نشده، برای سطح بخار کندانسور
A1012	تیوب های جوشکاری شده یا بدون درز فولاد آلیاژی فریتی، آستنیتی یا دوپلکس برای کندانسور و مبدل حرارتی با پلیسه های داخلی

ورق های فولادی برای ساخت مبدل حرارتی

Steel Plates for Heat Exchanger

این ورق ها در دسته ورق هایی که برای ساخت اجزای تحت فشار مخازن مورد استفاده قرار می گیرند، هستند و باید ویژگی های ذکر شده در کد ASME بخش II را داشته باشند.



دسته بندی و نامگذاری ورق های فولادی

دسته بندی و نامگذاری ورق های فولادی اعم از کربنی و آلیاژی به این شرح است:

کیفیت معمولی (Regular quality): نام دسته ای از ورق های فولادی است که با درصد کربن 0.33 درصد به فروش می رسند. این نوع ورق ها با ترکیب شیمیایی متفاوت عرضه می شوند.

کیفیت سازه ای (Structural quality): موادی با این کیفیت در سازه هایی مانند پل ها، ساختمان ها، تانک ها، تجهیزات راه آهن، تجهیزات سیار و کاربردهای دیگر مورد استفاده قرار می گیرند. مشخصات کلی برای ورق های با کیفیت سازه ای در استاندارد ASTM A6 مطرح شده است.

کیفیت مخازن تحت فشار (Pressure vessel quality): ورق هایی با این کیفیت برای کاربرد در مخازن تحت فشار، مبدل های حرارتی و کاربردهای مشابه عرضه می شوند .تجربه تولید مخازن تحت فشار نشان دهنده این مسئله است که در این حوزه باید از ورق هایی با کیفیت بهبود یافته استفاده شود .در این حالت باید از تست های اضافی مانند تست های مکانیکی و بررسی های غیر مخرب NDT)) مانند تست ضربه نمونه شیار دار، بازرسی اولتراسونیک و رادیوگرافی نیز استفاده کرد .مشخصلات کلی برای ورق های با کیفیت مخازن تحت فشار در استاندارد ASTM 20 مطرح شده است.

کیفیت آهنگری (Forging quality): این کیفیت ورق برای آهنگری، عملیات حرارتی، کاربردهای مشابه یا زمانی که یکنواختی ترکیب و عدم وجود عیوب مخرب مد نظر باشد، مورد استفاده قرار می گیرند.

خواص ورق های فولادی

نخستین وظیفه عناصر آلیاژی در فولاد بهبود خواص مکانیکی و پایداری در دماهای نسبتا بالا و افزایش مقاومت به یک محیط خورنده خاص است. ورق های فولادی استحکام و شکل پذیری خود را از عناصر آلیاژی زیر دریافت می کنند.

1- کربن، منگنز، نیکل، کروم، بور و مولیبدن که سختی پذیری و استحکام را افزایش می دهند.

2- سیلیسیم و آلومینیم اکسیژن را حذف می کنند و ساختارهای بدون تخلخل ایجاد می کنند.

3- آلومینیم، تیتانیم، نیوبیم، وانادیم و زیرکونیم نقش پاکسازی دانه ها را به عهده دارند.

4- مس مقاومت به خوردگی اتمسفری را افزایش می دهد.

یکی از نقش های اساسی عناصر آلیاژی افزایش سختی پذیری است که عمق سخت شدن فولاد را در طی عملیات حرارتی نشان می دهد .علاوه بر عناصر آلیاژی نوع عملیات حرارتی نیز در ایجاد ساختار مورد نظر نقش مهمی بازی می کند.

عملیات حرارتی ورق های فولادی در بین سازنده های مختلف متفاوت است .برای دستیابی به خواص مطلوب برای سازنده، تولید کننده ورق یک نمونه ورق تحت عملیات حرارتی مورد نیاز سازنده ارائه می کند تا مورد بررسی قرار گیرد .این کار سبب می شود که سازنده نسبت به خواص مد نظر ورق اطمینان حاصل کند.

خواص ASTM ورق های فولادی برای سازنده های مخازن تحت فشار و مبدل های حرارتی

لیست ویژگی های مواد، به ترتیب موضوع عبارتند از:

محدوده خصوصیات، مستندات مرجع، واژگان فنی، اطلاعات سفارش، مواد و تولید کنندگان، مسئولیت تضمین کیفیت، عملیات حرارتی، ترکیب شیمیایی، ساختار متالورژیکی، خواص مکانیکی، گواهی، شناسایی، نوع محصول، بسته بندی، گزارش تست و تجهیزات اضافی. هر مشخصه برای ماده یکتا است. مشخصات کلی ASTM برای کیفیت مخازن تحت فشار در جدول زیر آمده است.

مشخصات کلی ASTM برای ورق های فولادی با کیفیت مخزن تحت فشار	
محتوا	شماره
نیازمندی های کلی برای ورق های فولادی با کیفیت مخازن تحت فشار: توصیف اصطلاحات، دستورالعمل سفارش، ساخت و کنترل کیفیت، مشخصات ماده، بسته بندی و حمل و نقل.	A20/A20M
روش تست و مشخصات تست های مکانیکی :کشش، خمش، سختی و ضربه	A370/A370M
بررسی ورق فولادی با پرتو اولتراسونیک برای تشخیص عیوب داخلی مانند مک های لوله ای، گسیختگی ها و قسمت های لایه لایه شده.	A435/A435M
بررسی اولتراسونیک با زاویه ورق های فولادی برای تشخیص محل و اندازه عیوب داخلی	A577/A577M
تست های مکانیکی: دستوالعمل نمونه برداری برای تست ضربه شارپی از محصولات فولادی	A673/A673M
اصولا جابجایی محصولات فولادی: بسته بندی، بارگیری و ارسال.	A700/A700M
تست کشش تمام ضخامت از ورق های فولادی برای بررسی تمایل به لایه لایه شدن.	A770/A770M
بررسی ورق های فولادی نورد شده برای کاربردهای خاص با تست اولتراسونیک مستقیم	A578/A578M
واژگان فنی مرتبط با فولاد، فولاد زنگ نزن و آلیاژهای مرتبط	A941/A941M
روش تست رها کردن وزنه برای تعیین دمای داکتیلیته صفر برای فولادهای فریتی	E208
راهنمای تست ذرات مغناطیسی	E709

فولادهای کربنی: مشخصات ASTM برای فولادهای کربنی شامل A285، A299، A442، A455، A515، A516، A537، A526، A612، A662، A724، A738 و A841. فولادهای کربنی فاقد عناصر آلیاژی برای مقاومت در

برابر گرما و خوردگی هستند. فولادهای کربنی برای کاربرد در دماهای متوسط استفاده می شوند. مشخصات ASTM برای برخی از فولادهای کربنی در جدول زیر آمده است.

مشخصات ASTM برای ورق های فولاد کربنی با کیفیت مخازن تحت فشار	
شماره استاندارد ASTM	عنوان
A285	ورق های فولاد کربنی با استحکام کششی کم یا متوسط
A299	ورق های فولا کربنی منگنز- سیلیسیم
A442	بهبود خواص انتقال ورق های فولاد کربنی
A445	ورق های فولادی کربنی منگنز دار با استحکام بالا
A515	ورق های فولاد کربنی با دمای کاری متوسط و بالا
A516	ورق های فولاد کربنی با دمای کاری متوسط و پایین
A537	ورق های فولادی کربن-منگنز- سیلیسیم عملیات حرارتی شده
A562	ورق های فولاد کربنی منگنز - تیتانیم برای پوشش های شیشه ای یا فلزی نفوذی
A612	ورق های فولادی کربنی با استحکام بالا برای کار در دمای متوسط و پایین
A662	ورق های فولادی کربن-منگنز برای دمای کاری متوسط و پایین
A724	فولاد کربنی کوئنچ و تمپر شده برای مخازن تحت فشار چند لایه و جوشکاری شده
A735	ورق های فولادی کربن - منگنز - سیلیسیم عملیات حرارتی شده
A841	ورق های فولاد کربنی تولید شده با فرآیند ترمومکانیکال

گرید HSLA: مشخصات ASTM با شماره A734 و A737 مرتبط با فولادهای HSLA است. استاندارد A734 به دو فولاد اختصاص دارد که هر دو کوئنچ و تمپر شده اند، نوع A که فولاد نیکل - کروم - مولیبدن است و خواص خود را تا 62- درجه سانتی گراد حفظ می کند. نوع B که در دماهای 29- درجه سانتی گراد و بالاتر مورد استفاده قرار می گیرد. دو فولاد با نامگذاری گرید B و C نیز در استاندارد A737 بررسی شده اند.

فولاد آلیاژی: فولادهای آلیاژی برای مخازن تحت فشار سه عنصر آلیاژی عمده دارند: کروم، نیکل و مولیبدن و سایر عناصر آلیاژی عبارتند از کربن، منگنز و سیلیسیم که در فولادهای کشته دیده می شود. فولادهای آلیاژی به علت وجود کروم، نیکل و مولیبدن خواص مکانیکی بهتری نسبت به فولادهای کربنی دارند. برخی از فولادهای آلیاژی در جدول زیر نمایش داده شده اند.

مشخصات ASTM برای ورق های فولاد آلیاژی با کیفیت مخازن تحت فشار	
شماره استاندارد ASTM	عنوان
A202	ورق های فولاد آلیاژی کروم-منگنز- سیلیسیم
A203	ورق های فولاد آلیاژی نیکل دار
A204	ورق های فولاد آلیاژی مولیبدن دار
A225	ورق های فولاد آلیاژی منگنز – وانادیم – نیکل
A240	ورق های فولاد زنگ نزن مقاوم در برابر حرارت کروم و کروم – نیکل
A263	ورق فولادی روکش با آلیاژ کروم مقاوم به خوردگی
A264	ورق فولادی روکش با آلیاژ زنگ نزن (Cr-Ni) مقاوم به خوردگی
A265	ورق فولادی روکش با آلیاژ پایه نیکل مقاوم به خوردگی
A302	ورق های فولاد آلیاژی منگنز- مولیبدن و منگنز – مولیبدن – نیکل
A353	ورق های فولاد آلیاژی 9 درصد نیکل دوبار نرماله و تمپر شده
A387	ورق های فولاد آلیاژی کروم مولیبدن برای کار در دمای بالا
A517	ورق های فولاد آلیاژی کوئنچ و تمپر شده با استحکام کششی بالا
A533	ورق های آلیاژی کوئنچ و تمپر شده منگنز – مولیبدن و منگنز – مولیبدن – نیکل
A542	ورق های فولاد آلیاژی کروم – مولیبدن کوئنچ و تمپر شده
A543	ورق های فولاد آلیاژی نیکل- کروم – مولیبدن کوئنچ و تمپر شده
A553	ورق های فولاد آلیاژی 8درصد و 9 درصد نیکل کوئنچ و تمپر شده
A605	ورق های فولاد آلیاژی نیکل - کبالت - مولیبدن – کروم کوئنچ و تمپر شده
A645	ورق های آلیاژی 5 درصد نیکل با عملیات حرارتی خاص
A658	ورق 36 درصد نیکل برای انبساط حرارتی کم
A734	ورق فولاد آلیاژی استحکام بالا و کم آلیاژ، کوئنچ و تمپر شده برای کاربردهای برودتی

A735	فولاد آلیاژی کم کربن منگنز – مولیبدن – نیوبیم برای کاربرد در دمای متوسط و پایین
A736	ورق های آلیاژی کم کربن پیرسختی شده نیکل – مس – کروم – مولیبدن – نیوبیم
A737	ورق های فولادی HSLA
A782	ورق های فولاد آلیاژی منگنز –کرم – مولیبدن – سیلیسیم – زیرکونیم کوئنچ و تمپر شده
A832	ورق های فولاد آلیاژی کروم – مولیبدن – وانادیم – تیتانیم – بور
A844	ورق فولاد آلیاژی 9 درصد نیکل تولید شده با فرآیند کوئنچ مستقیم

کاربردهای زیر صفر و برودتی: فولادهای مناسب برای کاربردهای زیر صفر و برودتی عبارتند از: A203، A353، A442، A517، A537، A542، A543، A553، A612، A645، A662، A724، A735، A736، A782 و A844.

ویژگی های فولادهای زنگ نزن: بسیاری از تیپ های AISI – آستنیتی (انواع 302 ،304، L304، 316، L316،317، L317، 321، 347)، دوپلکس، فریتی و مارتنزیتی به علاوه برخی از انواع خاص زنگ نزن ها، مانند فولادهای سوپرفریتی و سوپر آستنیتی -در استاندارد A240 بررسی شده اند.

فولادهای روکش و سایر گریدها: فولادهای روکش در استاندارد A263، A264 و A265 به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته اند. مشخصات فولادهای روکش A263 و A264 به ترتیب به روکش های کروم و کروم – نیکل اختصاص دارد که باید با استاندرد ASTM A240 تطابق داشته باشد. فولادهای روکش در A 265 آلیاژهای نیکل و پایه نیکل هستند که عبارتند از

1- نیکل 200، مونل 400، اینکونل 625

2- اینکولوی 800 و 800H ، اینکولوی 825 که توسط شرکت ایتکو الوی اینترنشنال تولید می شود.

3- کارپنتر 3-20CB که توسط کارپنتر تکنولوژی تولید می شود.

مشخصات این فولادهای روکش در جدول زیر آورده شده است.

مشخصات ASTM برای ورق های فولاد روکش	
شماره ASTM	توصیف
A263	ورق و نوار روکش فولاد کروم
A264	ورق و نوار روکش فولاد زنگ نزن نیکل – کروم
A265	ورق فولاد آلیاژی روکش نیکل و پایه نیکل

تولید کنندگان ورق فولادی

تولید کننده های ورق های فولادی در آمریکا:

تولید کنندگان انبوه ورق های فولادی در امریکا عبارتند از:

Bethlehem Steel Corporation
Gulf States Steel Company
Inland Steel Industries
Oregon Steel Mills
Lukens Steel Company
USS Div., USX Corporation

بزرگترین تولیدکنندگان فولاد زنگ نزن عبارتند از:

Allegheny Ludlum Steel Corporation
Eastern SS Division
Cyclops Corporation
Jessop Steel Company

روش های تولید ورق های فولادی

روش ها مختلف ساخت ورق های فولادی و مشکلات مربوط به آن ها در ادامه بررسی شده است:

1- کوئچ و تمپر – ترک کوئنچ

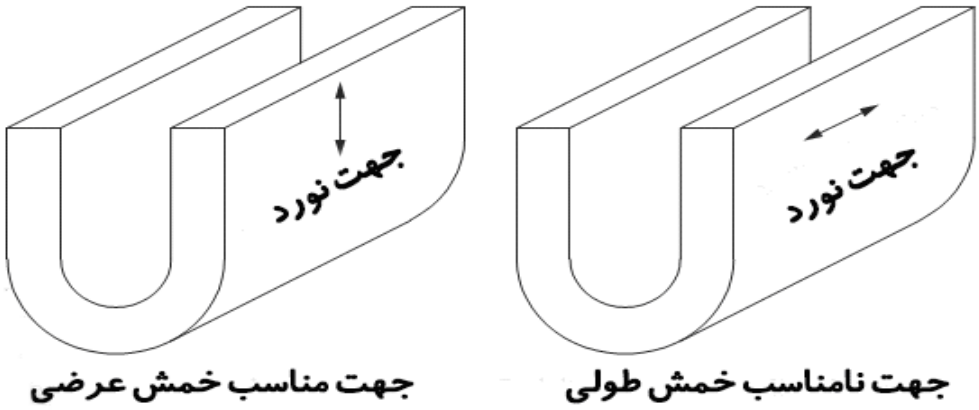
2- شکل دهی – ترک در هنگام شکل دهی سرد، گرم و داغ

3- برش حرارتی – ترک

4- جوشکاری – ترک سرد و گرم همراه با هیدروژن

5- جهت گیری – نورد گرم ورق های فولادی سبب می شود تا خواص جهت دار در ورق ایجاد شود. ناخالصی های غیر فلزی در فولادهای معمولی در جهت نورد کشیده می شوند. محل این ناخالصی ها به مکان هایی برای تغییر شکل موضعی و ترک تبدیل می شود. بنابراین هنگامی که نیاز به خم کردن شدید یک ورق باشد جهت بهینه

ای برای انجام این کار وجود دارد (شکل زیر). برای جزئیات بیشتر در این زمینه به "Guidline for fabricating and processing plate steels" چاپ شرکت Mittal Steel آمریکا مراجعه شود.



فولادهای کربنی مورد استفاده در ساخت مبدل حرارتی

Carbon Steel for Heat Exchanger Construction

برای بررسی این فولادها ابتدا باید به معرفی انواع آن پرداخت. ترکیب شیمیایی گریدهای مختلف فولاد بسیار متفاوت است و از آهن خالص تا ترکیب پیچیده ای از چندین عنصر تغییر می کند. خواص و کیفیت متفاوت از ترکیب های شیمیایی هر گرید ناشی می شود. برای مناسب ترین انتخاب در هر گرید باید به کاربرد نهایی و روش ساخت نیز توجه داشت. در تمامی مراحل ساخت یک فولاد از ترفند های مختلفی استفاده می شود که بر نوع و کیفیت محصول نهایی موثرند.

در مورد فولاد کربنی هیچ مینیممی برای عناصر آلیاژی مانند کروم، کبالت، نیوبیوم، مولیبدن، نیکل، تیتانیم، تنگستن، وانادیم، زیرکونیم ذکر نشده است .هنگامی که مینیمم در صد مس در فولاد از 0.4درصد تجاوز نکند و یا ماکزیمم مقدار عناصر آلیاژی آن به شرح زیر باشد :منگنز1.65 ، سیلیسیم0.60 ، مس 0.60به آن فولاد کربنی می گویند .فولاد کربنی به حضور همزمان کربن و منگنز برای فرآیند تولید مناسب و بهبود خواص مکانیکی نیاز دارد.

فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا HSLA)) گروهی هستند که ترکیب آن ها انحصارا برای بهبود خواص مکانیکی بهینه شده است. در برخی از فولادهای این گروه مقاومت به خوردگی اتمسفری نسبت به فولادهای کربنی ساختمانی بیشتر است. به این دسته فولاد آلیاژی گفته نمی شود، اگرچه به عمد از عناصر آلیاژی برای بهبود خواص آن ها استفاده شده است. مینیمم نقطه تسلیم برای این آلیاژها 290 تا 550 مگا پاسکال و مینیمم نقطه تسلیم آن ها 415 تا 620 مگا پاسکال است. این فولادها استحکام و چقرمگی بالا و شکل پذیری و جوش پذیری خوبی دارند.

فولادهای کم آلیاژ: این فولادها بر اساس ترکیب شیمیایی به چند دسته تقسیم بندی می شوند: فولاد آلیاژی مولیبدن دار، فولاد آلیاژی منگنز – مولیبدن – نیکل و فولاد آلیاژی کروم – مولیبدن. هر کدام از این دسته بندی ها بر اساس میزان استحکام به چند دسته تقسیم می شوند. فولادها از نظر تجاری زمانی در دسته بندی کم آلیاژ قرار می گیرند که شرایط زیر را داشته باشند:

1- میزان منگنز آن ها بیش تر از 1.65 درصد باشد.

2- مقدار سیلیسیم آن ها بیش تر از 0.6 درصد باشد.

3- میزان مس آن ها بیش از 0.6 درصد باشد.

4- محدوده یا حداقل مقداری از عناصر آلیاژی مانند نیکل، مولیبدن، وانادیم، کروم و غیره برای ایجاد اثر عنصر آلیاژی به آن ها اضافه شده باشد.

فولادهای آلیاژی می توانند از مجموعه متنوعی از عناصر آلیاژی و عملیات حرارتی برای بدست آوردن مطلوب ترین ترکیب از خواص، استفاده برند.

بهبود فرآیند های ساخت فولاد

فولاد سازی در طی 25 سال گذشته دستخوش تغییرات زیادی شده است و فولادهای متنوعی با تغییر در خواص محصول نهایی ایجاد شده است. بهبود تکنیک های تصفیه، ذوب القایی در خلا (VIM)، روش های فولاد سازی با گوگرد کم، فرآیند های پالایش مانند دی کربوریزاسیون آرگون - اکسیژن (AOD فرآیندی است که ابتدا در تولید فولاد زنگ نزن و سایر آلیاژهای با گرید بالا حاوی عناصر اکسید شوند مانند کرم و آلومینیم استفاده می شد (و دی کربوریزاسیون با اکسیژن در خلا VOD))، ذوب مجدد الکترواسلگ، گاززدایی در خلا، ریخته گری تحت

فشار، ریخته گری مداوم، نورد کنترل شده و غیره منجر به تولید فولادهای تمیز با کربن معادل کم شده است که استحکام بالا، چوشپذیری مناسب، مقاومت به خوردگی بهبود یافته و چقرمگی بالایی دارند.

انواع فولاد

در فولادسازی واکنش اصلی، ترکیب شدن کربن و اکسیژن و تشکیل گاز است. اگر اکسیژن از مذاب حذف نشود، این گاز در حین تبدیل فولاد از حالت به مایع به جامد هم چنان تشکیل می شود. از اضافه کردن سیلیسیم و یا آلومینیم برای حذف اکسیژن استفاده می شود. کنترل میزان گازی که در هنگام انجماد تولید می شود نوع فولاد را مشخص می کند. اگر در این مرحله گاز تولید نشود، فولاد کاملا اکسیژن زدایی شده و به آن کشته می گویند زیرا بدون ایجاد صدا در قالب قرار می گیرد. افزایش میزان گاز به ترتیب منجر به ایجاد فولادهای درپوشیده، نیمه کشته و ناآرام می شود.

فولادهای کشته به طور کامل اکسیژن زدایی شده اند و ترکیب شیمایی و خواص مکانیکی یکنواختی نسبت به سایر انواع فولاد دارند. به طور کلی فولاد کشته زمانی مورد استفاده قرار می گیرد که ساختار یکنواخت و بدون عیب مورد نیاز باشد. ممکن است دانه های این فولاد ریز یا درشت باشد. به طور کلی زمانی که ضخامت ورق بیش از 1.5 اینچ (38 میلی متر) باشد باید از فولاد کشته ساخته شده باشد.

فولادهای نیمه کشته بر اساس درجه یکنواختی ترکیب که حد وسط فولادهای کشته و ناآرام است، شناسایی می شوند.

فولادهای در بسته و ناآرام بر اساس تغییر ترکیب شیمیایی در طول سطح مقطع از ایتدا تا انتهای شمش، شناسایی می شوند. آن ها در ابتدا برای تولید محصولاتی که به سطح خیلی خوب نیاز داشتند به کار می رفتند .

فولادهای کربنی

فولادهای کربنی آلیاژهایی از آهن و کربن هستند که معمولا منگنز آن ها از 1 تا 1.6 درصد بوده و مقدار مس و اکسیژن آن ها از 0.6 درصد فراتر نمی رود. معمولا این فولاد ها حاوی عناصر آلیاژی بیشتری نیستند. خواص و جوشپذیری فولادهای کربنی به درصد کربن آن ها وابسته است. فولاد کربنی می تواند بر حسب روش اکسیژن زدایی به ناآرام، درپوشیده(capped) ،نیمه کشته و کشته تقسیم بندی می شود. تغییر در میزان کربن بر خواص مکانیکی اثر می گذارد. فولادهای کربنی معمولا به شکل نورد شده مورد استفاده قرار می گیرند، اما ممکن است گاهی اوقات به صورت آنیل یا نرماله نیز استفاده شوند.

اشکال فولادهای کربنی

فولاد به شکل ورق، تیوب، لوله و فورجینگ و شکل های دیگر تهیه می شود.

فولادهای کربنی برای مخازن تحت فشار:

این فولادها عبارتند از A285، گرید A، B و C؛ A229؛ A442 گرید 55، 60، 65، 70؛ A516، گرید 55، 60، 65، 70؛ A537، گرید 1 و گرید 2 تحت شرایط نرماله و تمپر شده.

استفاده از فولادهای کربنی

فولادهای کربنی به دلیل قیمت پایین، با وجود مقاومت کم در برابر خوردگی به شکل گسترده ای در مبدل های حرارتی، صنایع شیمیایی، نیروگاه های سوخت فسیلی، پالایشگاه های نفت و بسیاری صنایع دیگر، مورد استفاده قرار می گیرند. علاوه بر قیمت خواص دیگر فولاد کربنی منجر به استفاده از آن می شود:

1- به راحتی در دسترس است.

2- استفاده از آن در فرآیند ساخت با روش های معمول آسان است.

تیوب های فولاد کربنی برای آب ورودی

در سال های اخیر تولید کنندگان مجبور شده اند تا از تیوب های مس آلیاژی برای گرمکن آب ورودی پر فشار استفاده نکنند. در چرخه های جدید نیروگاهی که دمای آب ورودی بالاست، خوردگی تیوب مسی با آب ورودی اگر چه اندک است اما احتمال انتقال مس به مولد بخار را افزایش داده و ممکن است منجر به انسداد در قسمت توربین شود . گاهی اوقات از فولاد آلیاژی با درصد مولیبدن کم نیز استفاده می شود. عواملی که سبب می شود تا فولاد کربنی بر فولاد آلیاژی با مولیبدن کم ترجیح داده شود عبارتند از: جوشپذیری بهتر، استحکام بالاتر و هزینه کمتر. هدایت حرارتی فولاد کربنی نسبت به آلیاژ مس –نیکل اندکی کمتر است اما این اختلاف در تیوب های جدا نازک با قطر کم که برای آب ورودی پرفشار استفاده می شود عملا ناچیز است. مهمترین ضعف استفاده از تیوب های فولاد کربنی مقاومت اندک آن در برابر خوردگی است. می توان مشکلات ناشی از خوردگی و حفره دار شدن را در این تیوب ها با کنترل فرآیند ساخت، شرایط آب و خاموشی های مناسب به حداقل رساند. این قطعات هنگامی که نیروگاه برای مدت قابل توجهی خاموش است، نیاز به حفاظت در برابر خوردگی دارند.

فولاد کربنی در پالایشگاه

در کاربردهای پالایشگاهی، فولاد کربنی یک ماده قابل قبول برای محصولات خام تا دمای 260 درجه سانتی گراد از نظر مقاومت در برابر حمله هیدروژنی و خوردگی سولفیدی است. در دماهای بالا، نرخ خوردگی افزایش یافته و فولادهای آلیاژی، فریتی یا زنگ نزن ممکن است استفاده شوند.

مقاومت در برابر خوردگی فولاد کربنی

مقاومت در برابر خوردگی فولادهای کربنی تا حدی محدود بوده و به تشکیل لایه اکسیدی روی سطح بستگی دارد. فولاد کربنی نباید در معرض تماس با اسیدهای رقیق قرار گیرد.

فولادهای کربنی در تماس با محلول های آبی، محلول های آمینی، کربنات ها، سیانیدهای اسیدی، هیدروکسیدها، نیترات آمونیوم، آمونیاک و مایعات حاوی گاز زغال سنگ، مستعد خوردگی SCC و ترک های سولفیدی ناشی از استفاده در حوزه های نفتی آلوده به سولفید هیدروژن هستند. محدودیت های دما و غلظت برای استفاده از فولاد کربنی در سود سوزآور در جداول مورد بررسی قرار گرفته اند. در میان تمام مواد فلزی، فولاد کربنی اقتصادی ترین ماده برای حمل و نقل محلوله هایی با ماکزیمم غلظت 50 درصد و ماکزمیمم دمای 88 درجه سانتی گراد است. اگر آلودگی به آهن قابل قبول باشد، می توان از فولاد به عنوان مخزن سود سوزآور تا غلظت 75 درصد و تا دمای 100 درجه سانتی گراد استفاده کرد. تنش زدایی برای کاهش پدیده تردی ناشی از سود باید انجام گیرد.

آب شور و آب دریا به آهستگی منجر به خوردگی فولاد می شود. فولاد معمولا توسط آب با pH خنثی و بسیاری از مواد آلی خورده نمی شود. به طور کلی حضور اکسیژن و یا شرایط اسیدی خوردگی فولاد کربنی را افزایش می دهد در حالی که شرایط قلیایی از خوردگی فولاد کربنی جلوگیری می کند.

خوردگی عمومی در محیط آبی:

فاکتورهای اساسی کنترل خوردگی عمومی در فولادهای کربنی شامل pH محلول، اکسیژن حل شده در محلول، دما، نمک های محلول و محلول است.

اثر pH : محلول های اسیدی (pH های کمتر از 5 (، برای فولاد کربنی خورنده هستند. لایه اکسیدی محافظ در مقادیر pH کمتر از 5 و بالاتر از 13 حل می شود. اما خوردگی در محدوده وسیعی از pH کم است.

تاثیر اکسیژن محلول:

در دمای محیط برای یک محلول با pH تقریبا خنثی، نرخ عمومی خوردگی با غلظت اکسیژن رابطه مستقیم دارد.

اثر دما: دمای بالا با افزایش دادن میزان نفوذ اکسیژن در لایه های کاتدی از اکسید آهن هیدراته منجر به شتاب گرفتن فرآیند خوردگی می شود.

تاثیر نمک های محلول: حضور اسید یا نمک های خنثی ممکن است نرخ خوردگی را افزایش دهد در صورتی که حضور نمک های قلیایی نرخ خوردگی را کاهش می دهد.

اثر سرعت: به طور کلی افزایش سرعت محلول سرعت خوردگی را افزایش می دهد، به خصوص اگر NaCl حضور داشته باشد. برای جلوگیری از برخورد آب با بدنه تجهیزات ماکزیمم سرعت نباید از 2.5 متر در ثانیه یا 8 فوت بر ثانیه تجاوز کند.

فولاد کربنی در محیط های قلیایی رفتار پسیو از خود نشان می دهد و نرخ خوردگی کمی دارد. از این ویژگی در فسفاته کردن استفاده می شود. در زمینه جلوگیری از خوردگی در فولادهای کربنی باید به این موارد توجه داشت: پوشش های فلزی، رنگ زدن، حفاظت کاتدی، افزودن ممانعت کننده ها، افزودن عناصر آلیاژی، حذف اکسیژن از محیط، ممانعت از تشکیل زوج گالوانیک و پوشش های آلی.

فرآیند ساخت با فولاد کربنی

برش ورق ها

ورق های فولاد کربنی با استفاده از جوش بری یا ماشین کاری به ابعاد دلخواه بریده می شود. تمامی لبه ها پس از برش باید برای لایه لایه شدن مورد بررسی قرار گیرد تا اطمینان حاصل شود که لبه های بریده شده ترک نخورده اند. تست نفوذ رنگ و التراسونیک برای لبه هایی که درز جوش را تشکیل می دهند، به خصوص برای ورق های با ضخامت بالا و کاربرد در دمای پایین و در معرض هیدروژن توصیه می شود.

درجه جوش پذیری:

قابلیت جوش پذیری یک فولاد برای بررسی استعداد به ترک با استفاده از CE (کربن معادل) تخمین زده می شود.

ملاحظات جوش پذیری:

در هنگام جوش دادن فولاد کربنی باید عوامل زیر را در نظر داشت:

1- ترک سرد ناشی از هیدروژن

2- ترک ناشی از انجماد

3- لایه لایه شدن

4- محدودیت های سختی در کاربردهای پالایشگاهی و گاز ترش

محدودیت سختی در کاربردهای پالایشگاهی

جلوگیری از ایجاد ترک جوش در حین کار در پالایشگاه از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا فولاد کربنی به طور گسترده در مخازن تحت فشار پالایشگاه مانند مبدل ها، تانک ها و لوله ها مورد استفاده قرار می گیرد. گمان می رود که سه عامل در ایجاد ترک جوش در حین کار دخیل باشند: محیط خورنده، تنش کل و سختی، استاندارد NACE به شماره RP-04-72 یک محدوده سختی برابر با 200 برینل را روی جوش های تمام شده P-I اعلام کرده است.

فرآیند جوشکاری

بسیاری از فولادهای کربنی را می توان با استفاده از الکترود روکش دار و فرآیند مطلوب جوشکاری مانند پیش گرمایش جوش داد .فرآیندهای جوشکاری که برای فولادهای کربنی مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از جوشکاری قوس فلز(GMAW) جوشکاری با سیم مغزه پودری(FCAW) ، جوشکاری قوس زیرپودری (SAW) ، جوشکاری الکترواسلگ و الکتروگاز و جوشکاری اکسی استیلن(OAW)

جوشکاری قوسی فولاد های کربنی

انتخاب الکترود جوشکاری بر اساس سازگاری بین فلزات پایه و شرایط کاری قطعات جوش تعیین می شود. عامل اصلی در انتخاب الکترود برای فولادهای کربنی عبارت است از

1- خواص مکانیکی

2- ترکیب مواد

3- جریان جوشکاری

4- موقعیت جوش

5- هزینه

باید توجه شود که الکترودها در محیط خشک نگه داری شود.

مینیمم ضخامت فولادهای کم کربن که می تواند با روش قوس تحت گاز محافظ جوش داده شود به مهارت جوشکار، موقعیت جوش، ویژگی های جریان، نوع اتصال، فیت کاری، کلاس و اندازه الکترودها، آمپراژ، طول قوس و سرعت جوشکاری بستگی دارد. فولادی به ضخامت 0.036 اینچ می تواند با موفقیت با الکترودهای تو پودری جوش داده شود.

در ضخامت های بالا، می توان تمام ضخامت های تجاری را با روش SMAW جوش داد.

عیوب جوش

از آنجایی که فو لادهای کربنی به شکل گسترده مورد استفاده قرار می گیرند، عیوبی که در روش های مختلف جوشکاری قوس ایجاد می شوند در جدول زیر آمده است.

عیوب جوش فولادهای کربنی با روش های مختلف جوشکاری قوس			
GTAW,GMAW	SAW	FCAW	SMAW
GMAW ترک خوردگی: ترک فلز جوش تخلخل ناخالصی ذوب ناقص	تخلخل جوش آلودگی فلاکس پوشش ناکافی فلاکس فلاکس های به شدت	به دلیل ولتاژ بالای قوس: تخلخل قطره جوش زیاد سوختگی کناره جوش	ناخالصی سرباره ای تخلخل کرم خوردگی سوختگی کناره جوش ترک گرم
		به دلیل جریان زیاد:	

عدم نفوذ سوختگی کناره جوش مذاب میانی بیش از حد توقف سیم تغذیه عدم حفاظت کامل	ویسکوز وزش قوس	گرده جوش محدب قطره های بزرگ	ترک سرد ترک مرکزی ترک زیرپوستی ترک فلز پایه ریز ترک ها حفره جوش قوس اتفاقی اکسیداسیون فاصله ناشی از ذوب ناکافی تورفتگی یا تقعر سررفتگی قطره جوش زیاد
GTAW آلودگی الکترود تنگستن ناخالصی تنگستن	ترک خوردگی: ترک انجماد ترک هیدروژنی ترک سهمی ترک زیرپوستی	به دلیل سرعت حرکت بالا: مخلوط شدن سرباره گرده جوش محدب	

فولادهای کم آلیاژ مورد استفاده در ساخت مبدل حرارتی

Low Alloy Steel for Heat Exchanger Construction

برای بررسی این فولادها، ابتدا باید به چرایی استفاده از این ماده پرداخت. مهم ترین فاکتور در انتخاب فولاد برای مخازن تحت فشار و مبدل های حرارتی، استحکام کششی، استحکام خزشی، چقرمگی شیار، جوش پذیری و عملیات حرارتی است .به طور کلی ورق های نازک تر ترجیح داده می شوند زیرا:

-وزن کمتری دارند

-ساخت آن ها آسان تر است

-هزینه فونداسیون کمتری دارند

-به راحتی جوش داده شده، عملیات حرارتی، تنش زدایی و NDT می شوند.

- نصب آن ها آسان تر است

- استحکام خستگی بیشتری دارند.

-مقاومت در برابر شکست ترد دارند.

ورق های ضخیم تر ذاتا ضعیف تر هستند .افزایش ضخامت منجر به افزایش عیوب و در نتیجه رشد عیب و شکست ترد می شود .بنابراین استفاده از ورق های نازک فولادهای با استحکام بالا به استفاده از ورق های ضخیم تر فولادی ترجیح داده می شود.

فولادهای کم آلیاژ برای مخازن تحت فشار

فولادهای کم آلیاژ که در مخازن تحت فشار و مبدل های حرارتی مورد استفاده قرار می گیرند، عبارتند از:

1- فولادهای کربن – مولیبدن

2- فولادهای کربن –منگنز

3- فولادهای کربن –منگنز –مولیبدن

4- فولادهای آلیاژی منگنز –مولیبدن –نیکل

5- فولادهای کروم – مولیبدن یا فولادهای مقاوم به خزش مانند Cr-Mo، Cr-Mo-V و فولادهای Cr-Mo اصلاح شده.

کاربرد ورق های فولاد کم آلیاژ

کاربردهای اصلی برای ورق های فولادی کم آلیاژ به شرح زیر است:

1- درام بویلر برای نیروگاه ها

2- مخازن تحت فشار راکتور، مولدهای بخار و فشرده کننده ها برای نیروگاه های هسته ای

3- انواع مختلف راکتورها، کنورتورها، درام بخار، جدا کننده ها، فشرده کننده ها، مبدل های حرارتی، هیدروکراکرها در کارخانجات شیمیایی

از میان تمام این تجهیزات، راکتورهای بزرگ هسته ای و تجهیزات گوگرد زدایی روغن سنگین به ورق های ضخیم فولادی با ضخامت 150تا 300میلی متر و وزن واحد 30تا 50تن نیاز دارند.

فولادهای کربن – مولیبدن

فولادهای کربن – مولیبدن مشابه فولادهای کربنی هستند با این تفاوت که در ترکیب شیمیایی آن ها 0.5 درصد مولیبدن وجود دارد. اضافه کردن 0.5 درصد مولیبدن و مقدار کمی بور به فولادهای کربنی، اثر قبل توجهی بر استحاله به بینیت پایینی در سرعت سرد کردن پایین دارد. این ساختار استحکام نسبتا بالایی دارد که تا دماهای نسبتا بالا حفظ می شود.

این فولادها شامل فولادهای زیر در استاندارد ASTM می شود:

- A204 گریدهای A ، B و C

- A302 گرید های A و B

- A182 گرید F1 فورجینگ

فولادهایی با 0.5 درصد مولیبدن در صنعت نفت کاربردهای زیادی دارند. این فولادها به دلیل مقاومت در برابر هیدروژن در دماهای بالا جایگزین فولادهای کربنی شده اند .امکان گرافیت زایی در دمای بالای کاربرد آن ها به

470درجه سانتی گراد محدود کرده است .این فولادها به شکل نورد شده یا نرماله شده مورد استفاده قرار می گیرند.

فولادهای کربن – منگنز

این فولادها در مخازن تحت فشار، کشتی ها و سایر سازه های بزرگ مورد استفاده قرار می گیرند. منگنز به چندین دلیل به فولاد اضافه می شود:

1- منگنز با گوگرد ترکیب شده و ناخالصی های غنی از گوگرد ایجاد می کند که نقطه ذوب بالایی دارند و حین عملیات گرم فولاد ذوب نشده و در نتیجه اثر کمی بر چقرمگی محصول نهایی دارند. از طرفی به شکل یکنواخت تری در ساختار فولاد پخش می شوند.

2- منگنز استحکام فولاد را با تشکیل محلول جامد با آهن افزایش می دهد.

3- منگنز استحاله آستینت به فریت و پرلیت را کند می کند .قابلیت منگنز به این معناست که در ضخامت های بالای ورق که سطح بسیار سریعتر از مرز سرد می شود، ساختار بسیار یکنواخت تری حاصل می شود.

خواص فولادهای کربن –منگنز را می توان به طرق زیر بهبود داد:

1- تصفیه دانه ها :افزودن آلومینیم به فولاد کشته، اندازه دانه ها بهبود داده و چقرمگی بیشتری ایجاد می کند.

2- نرماله کردن

3- نورد کنترل شده :منجر به افزایش استحکام و چقرمگی می شود.

4- کوئنج و تمپر کردن :اگر فولاد کربن –منگنز کوئنچ شده باشد، محصول نهایی ترکیب خوبی از استحکام و چقرمگی را خواهد داشت.

سازنده ها نمی توانند این ورق ها را با بسیاری از روش های معمول مانند جوشکاری الکترواسلگ و SAWجوش دهند چون این فولاد تحمل درجه حرارت های بالای این فرآیندها را ندارد .هر چه حرارت افزایش یابد، دانه های آستنیت فلز پایه در منطقه HAZ رشد کرده و بزرگتر می شوند و نرخ سرمایش آهسته منجر به تشکیل ساختار فریت درشت دانه و کاهش چقرمگی می شود. برای فولادهای ریخته گری پیوسته با ضخامت 2اینچ و کمتر، افزودن نیترید تیتانیم ناخالصی را به عنوان مناطق جوانه زا ایجاد می کند، هنگامی که ضخامت بیش از 2اینچ یا 50.4میلی متر باشد، شمش ریخته گری فولاد با سرعت آهسته ای سرد می شود و عملیات ریزدانه کردن پاسخگو نیست.

برای جلوگیری از تشکیل اجزای سخت در فلز جوش که در معرض کرکینگ هیدروژن قرار دارند، باید نرخ سرمایش را با گرم کردن جوش، کاهش داد؛ در جوشکاری های چند پاس توالی مناسب پاس ها می تواند، لایه های قبلی را مجددا به آستنیت کند تا اجزای نرم تری ایجاد کند.

کاربرد فولادهای کربن –منگنز:

فولادهای کربن – منگنز ارزان تر بوده و به راحتی به تولید انبوه می رسند .این دسته شامل فولادهای کربن متوسط با کیفیت مناسب برای ساخت بویلر هستند که استحکام آن ها 230نیوتن بر میلی متر مربع است و استحکام نهایی

آن ها 385نیوتن بر میلی متر است .این فولادها به طور گسترده در بویلر ها و نیروگاه ها تا دمای 350 درجه سانتی گراد کار می کنند .در دمای بالاتر به سرعت استحکام خود را از دست می دهند و به علاوه مقاومت به خوردگی و پوسته شدن درآن ها کافی نیست .استحکام در دمای محیط را می توان با فرآیند نرماله کردن، نورد کنترل شده و کوئنچ و تمپر کردن بهبود داد .فولادهای تولید شده به روش نورد کنترل شده با مینیمم استحکام 385نیوتن بر میلی متر مربع و فولادهای کوئنچ و تمپر شده با استحکام بالاتر در بازار وجود دارند.

فولادها کربن – منگنز – مولیبدن

افزودن مولیبدن به فولاد کربن – منگنز استحکام در دمای محیط را افزایش می دهد، اما اثر ویژه ای بر استحکام در دمای بالا می گذارد. فولادهای کربن – منگنز با 0.5 درصد مولیبدن به طور گسترده در ساخت مخازن تحت فشار به کار گرفته می شوند. اگر چه شکل پذیری خزشی آن ها محدود بوده و مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون آن ها موجب می شود که در برخی موارد فولادهای کروم – مولیبدن ترجیح داده شوند.

فولادهای کوئنچ و تمپر مورد استفاده در ساخت مبدل حرارتی

(Quenched & Tempered Steels for Heat Exchanger Construction)

یکی از مهم ترین انواع فولاد هستند که سختی پذیری آن ها با افزودن عناصر آلیاژی، برای تولید مارتنزیت در هنگام کوئنچ یا سرد کردن در هوا از دمای منطقه آستنیت در ضخامت ورق، افزایش یافته است. سپس فولاد سرد شده تمپر می شود تا خواص مورد نظر را بدست آورد. معمولا مقدار عناصر آلیاژی این فولادها زیاد است و ترکیب مطلوبی از استحکام و چقرمگی دارند. به این فولادها، فولاد کوئنچ و تمپر می گویند. معمولا جوشکاری این فولادها آسان است زیرا درصد کربن لازم برای دستیابی به استحکام مشخص پایین است. نامگذاری این فولادها به نام "کوئنچ و تمپر" مقداری گمراه کننده است و این اصطلاح همواره به فولادهای مارتنزیتی تعلق نمی گیرد. برخی از فولادهای "نرماله و تمپر شده" نیز باید کوئنچ و تمپر شوند تا نرخ سرد شدن مورد نظر در طول ضخامت زیاد ورق در آن ها ایجاد شود. می توان با کوئنچ و تمپر کردن فولادهای کربن –منگنز نیز خواصی خوبی، مشابه فولادهای پرآلیاژ بدست آورد.

ترکیب و خواص فولادهای کوئنچ و تمپر

کربن این فولادها بیش از 0.25 درصد نیست و مجموع مقادیر عناصر آلیاژی (بدون در نظر گرفتن منگنز و سیلیسیم (در محدوده 0.85 تا 16 درصد قرار می گیرد. استحکام فولادهای کوئنچ و تمپر در حالت عملیات حرارتی شده، بسته به ضخامت، ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی از 50 تا 150 Ksi متغیر است. این فولادها استحکام بالا و داکتیلیته را به طور همزمان دارا هستند. در این فولادها می توان ترکیب های مختلفی از میزان چقرمگی، استحکام خستگی و مقاومت در برابر خوردگی را بدست آورد تا خواص مورد نیاز برای مخزن تحت فشار مورد استفاده در شرایط اتمسفری، دما بالا یا دماهای پایین را ایجاد کند. برخی از فولادهای کوئنچ و تمپر در

دسته بندی فولادهای کربنی ASTM و برخی در دسته فولادهای آلیاژی قرار می گیرند. ورق های فـولادی معمـول کوئنچ و تمپر در جدول زیر نشان داده شده اند.

فولادهای کوئنچ و تمپر (مشخصات ASTM)		
A203 Grade F	A542 Type A Cl. 1 A542 Type A Cl. 2	A553 Type 1 (8% and 9% Ni steel)
A517 (15 Grades)	A542 Type A Cl. 3 A542 Type A Cl. 4	A645 5% Ni steel
A533 Type A Cl. 1 A533 Type A Cl. 2 A533 Type A Cl. 3 A533 Type B Cl. 1 A533 Type B Cl. 2 A533 Type B Cl. 3 A533 Type C Cl. 1 A533 Type C Cl. 2 A533 Type C Cl. 3 A533 Type D Cl. 1 A533 Type D Cl. 2 A533 Type D Cl. 3	A542 Type A Cl. 4a A542 Type B Cl. 1 A542 Type B Cl. 2 A542 Type B Cl. 3 A542 Type B Cl. 4 A542 Type B Cl. 4a A542 Type C Cl. 1 A542 Type C Cl. 2 A542 Type C Cl. 3 A542 Type C Cl. 4 a4 Cl A542 Type C	A724 Grade A A724 Grade B A724 Grade C A734 HSLA Type A A734 HSLA Type B A738 Grade A A738 Grade B A782 Class 1
A537 Cl. 2	A543 Type B Cl. 1 A543 Type B Cl. 2 A543 Type B Cl. 3 A543 Type C Cl. 1 A543 Type C Cl. 2 A543 Type C Cl. 3	A782 Class 2 A782 Class 3

توضیحات مختصری در مورد هر کدام از این فولادها در ادامه مطرح خواهد شد:

1- فولاد آلیاژی A517: پانزده گرید کوئنچ و تمپر شده با مینیمم استحکام 90 ksi (برای ضخامت های بیشتر از 2-6 اینچ) و استحکام 100ksi تا 125 (برای ضخامت های کمتر از 2.5 اینچ). در گریـدهای مختلـف مقـدار کـربن، منگنز، سیلیسیم و سایر عناصر آلیاژی مانند نیکل، کروم، مولیبدن، بور، وانـادیم، تیتـانیم، زیرکـونیم و مـس متفـاوت است.

2- فولاد آلیاژیA533 : 4 تیپ کوئنچ و تمپرشده با محدوده استحکام ksi 100-80 ، ksi 115-90 و ksi 125-100 و ترکیب:

Mo0.5 برای تیپ A

Mo+0.55Ni0.5 برای تیپ B

Ni0.85 برای تیپ C

Ni0.3 برای تیپ D.

این فولاد با درصد کربن بالاتر ، حساسیت کمتری به ترک گرم دارد زیرا نسبت منگنز به گوگرد آن معمولا 50 به 1 است. از ASTM A533 گرید B در مقاطع ضخیم برای مخازن تحت فشار هسته ای و در بالاترین حالت استحکام آن (کلاس 3) برای مخازن تحت فشار جدار نازک یا چند لایه استفاده می شود.

3- ASTM A537 (کلاس 2) فولاد کربنی که در مخازن تحت فشار مورد استفاده قرار می گیرد و زمانی کاربرد دارد که چقرمگی بالای شیار مد نظر باشد.

4- فولاد آلیاژی A542 : پنج کلاس کوئنچ و تمپر شده با مینیمم استحکام های 85، 95، 105 و ksi 115. شامل دو تیپ Cr-1Mo2.25 و یک تیپ Cr-1Mo-0.25V-Ti-B3.

5- فولاد آلیاژی A543: سه کلاس کوئنچ و تمپر شده با مینیمم استحکام کششی 90، 105 و ksi 115 . دو تیپ از فولادهای Ni-Cr-Mo .

6- فولاد آلیاژی A553: دو تیپ کوئنچ و تمپر شده با مینیمم استحکام ksi85.

7- ASTM A592 که به عنوان فورجینگ در جایی که چقرمگی خوب شیار با استحکام تسلیم ksi 100 مد نظر باشد، به کار می رود.

جوشکاری فولادهای کوئنچ و تمپر

-جوش پذیری

مقدار کربن فولادهای کوئنچ و تمپر شده معمولا از 0.22 درصد برای چوش پذیری خوب تجاوز نمی کند. عناصر آلیاژی برای اطمینان از اقتصادی بودن فولاد عملیات حرارتی شده، با خواص مورد نظر و جوش پذیری مناسب به دقت انتخاب می شوند. ایجاد چقرمگی شیار خوب در ناحیه HAZ در فولادهای کوئنچ و تمپر شده به پراکنده شدن حرارت جوشکاری بستگی دارد که به مارتنزیت و بینیت اجازه تشکیل می دهد.

طراحی اتصال:

طراحی مناسب اتصال، مهارت جوشکار و بازرسی مناسب برای استفاده از مزایای فولادهای کوئنچ و تمپر شده مورد نیاز هستند. در طراحی اتصال جوش باید برای کاهش تنش باقیمانده باید از تغییرات ناگهانی در مقطع اجتناب شود، جوش ها باید در مکان هایی انجام شوند که فضای کافی برای بازرسی دارند و جوش های گلویی به جوش

های سر به سر ترجیح داده می شوند. آماده سازی اتصال معمولا با جوش گازی یا قوسی بدون پیش گرمایش انجام می شود. از تقویت بیش از اندازه جوش نیز باید پرهیز کرد.

پیش گرمایش:

پیش گرمایش برای فولادهای کوئنچ و تمپر شده باید با دقت انجام شود چون نرخ سرمایش منطقه HAZ را کاهش می دهد. اگر نرخ سرمایش خیلی آهسته باشد منطقه مجددا آستنیته شده در کنار فلز جوش می تواند به فریت استحاله کند و مناطقی از مارتنزیت با کربن بالا و بینیت درشت هم تشکیل می شود که این به معنی کاهش استحکام و چقرمگی است.

فرآیند جوشکاری :

فرآیند جوشکاری مانند SMAW، SAW، GMAW، FCAW و GTAW می توانند برای اتصال فولادهای کوئنچ و تمپر شده با مینیمم استحکام 150 ksi و درصد کربن تا 0.25 درصد مورد استفاده قرار گیرند. فلز پرکننده (فیلر) را باید با دقت انتخاب کرد. باید از روش های جوشکاری با هیدروژن پایین استفاده کرد: الکترودهای هیدروژنی خشک با هیدروژن کم، گداز آور تمیز و خشک، گاز محافظ بدون رطوبت، سیم الکترود تمیز و کم هیدروژن و.....

عملیات حرارتی پس از جوشکاری:

عملیات حرارتی برای بسیاری از فولادها شامل آستنیته کردن، کوئنچ کردن و تمپر کردن می شود. تعداد معدودی تحت عملیات رسوب سختی (پیرسازی) و سپس عملیات نورد یا سخت کاری قرار می گیرند. ساختارهای جوشکاری شده از این فولادها معمولا نیازی به عملیات حرارتی بعدی ندارند به جز در شرایطی که نیاز به تنش زدایی باشد. تنش زدایی در حالت های زیر ضروری است:

1- اگر فولاد پس از شکل دهی سرد یا جوشکاری چقرمگی شیار پایین داشته باشد.

2- برای حفظ پایداری ابعادی پس از ساخت.

3- جوش هایی با تنش پسماند بالا نسبت به خوردگی تنشی حساس می شوند.

ترک ها تنش زدایی

اتصالات جوش در بسیاری از فولادهای کم آلیاژ و کوئنچ شده در معرض SRC یا ترک های تنش زدایی هستند که گاهی به اختصار RC نامیده می شود. کروم، مولیبدن و وانادیم با این نوع ترک در ارتباط هستند اما عناصر آلیاژی کاربید ساز هم با این پدیده در ارتباطند.

فولادهای کروم مولیبدن مورد استفاده در ساخت مبدل حرارتی

(Cr-Mo Steels for Heat Exchanger Construction)

این فولادها که به فولادهای کم آلیاژ مقاوم در برابر خزش نیز مشهورند برای تولید مخازن تحت فشار که شرایط کاری آن ها در دما و فشار های بالاست، استفاده می شوند. ترکیب این فولاد شامل مقادیر مختلف کروم با ماکزیمم مقدار 9 درصد و 0.1 تا 0.5 درصد مولیبدن تشکیل شده است. درصد کربن معمولا کمتر از 0.2 درصد است تا این فولادها جوشپذیری خوبی داشته باشند، اما این آلیاژ ها سختی پذیری بالایی دارند. حضور کروم مقاومت خوب در برابر اکسیداسیون و خوردگی ایجاد می کند و مولیبدن استحکام در دمای بالا را افزایش می دهد. این فولادها معمولا به صورت آنیل شده، نرماله شده یا کوئنچ تمپر عرضه می شوند. پرکاربردترین گریدهای فولادهای کروم-مولیبدن عبارتند از:

0.5Cr–0.5Mo–0.25V
1Cr–0.5Mo
1.25Cr–0.5Mo
وانادیم با یا بدون 2.25Cr–1Mo

فولاد 1Cr–0.5Mo یا گرید 11 و 2.25 Cr–1Moیا گرید 22 کلاس 2 برای مدت زمان طولانی در تولید بخش هایی از مخازن تحت فشار و لوله کشی برای نیروگاه های فسیلی، صنعت نفت و پتروشیمی به کار گرفته می شدند. فولاد 2.25Cr–1Mo معمولا برای مقاومت در برابر دمای بالا بسیار خوب استفاده می شود. مشخصات ورق هایی از این جنس در SA-387 گرید 22 کلاس 2 و مشخصات فورجینگ ها درSA-336 ، گرید F22 مطرح شده است. فولادهای 5Cr–1Mo و 9Cr–lMo به طور گسترده در صنایع پتروشیمی برای مقاومت عالی در برابر خوردگی و اکسیداسیون به کار گرفته می شوند.

ترکیب و خواص فولادهای کروم مولیبدن

مشخصات ASTM با شماره های A387 گریدهای 2، 5، 7، 9، 11، 12، 21، 22 و 91 به ورق ها و شماره A182با گریدهایF2 ، F5، F7، F9، F11، F12، F21و F22 به فورجینگ ها اختصاص دارد. ترکیب شیمیایی برخی از گریدهای فولادهای Cr-Mo در جداول زیر آورده شده است. برخی آلیاژها ممکن است دارای مقادیر کمی از نیوبیوم، تیتانیم، وانادیم یا مقادیر بالاتر کربن و سیلیسیم برای کاربردهای خاص باشند. ساختار فولادهای کروم-مولیبدن معمولا فریتی – بینیتی است.

ترکیب نامی ورق های فولاد کروم مولیبدنA387/A387M Cr-Mo						
گرید	نام	ترکیب				
		کربن	منگنز	سیلیسیم	کروم	مولیبدن
12	Cr1.00	0.۱۷-0.05	0.65-0.4	0.4-0.15	1.15-0.8	0.6-0.45
11	Cr1.25	0.17-0.05	0.65-0.4	0.8-0.5	1.5-1.00	0.65-0.45
22	Cr2.25	0.15-0.05	0.6-0.3	0.5 max	2.5-2.00	1.10-0.90

5	Cr5.00	0.15 max	0.3-0.6	0.5 max	6.00–4.00	0.65–0.45
91	Cr9.00	0.15–0.06	0.6–0.3	1.00–0.5	10.00–8.00	1.10–0.90

مشخصات ASTM برای فولاد کروم - مولیبدن

نوع فولاد	ورق	لوله	ماکزیمم دمای کاری
Cr-0.5Mo0.5	1,2A387-Gr2, Cl.	A213-T2	
Cr-0.5Mo1	A387-Gr12, Cl. 1,2	A213-T11, T12	C–475°C°450
Cr-0.5Mo1.25	A387-Gr11, Cl. 1,2	A199-T11, A200-T11, A213-T11	C–500°C°450
Cr-1Mo2.25	A542 ,1,2A387-Gr22, Cl.	A199-T22, A200-T22 A213-T22	C–550°C°500
Cr-1Mo3	A387-Gr2l	A199-T21, A200-T21 A213-T21	C–550°C°500
Cr-0.5Mo5	A387-Gr5, Cl. 1,2	A199-T5, A200-T5 A213-T5	C°550
Cr-0.5Mo7	A387-Gr7	A199-T7, A200-T7 A213-T7	C°550
Cr-1Mo9	A387-Gr9, Cl. 1,2	A199-T9, A200-T9 A213-T9	C–600°C°550

این فولادها به صورت ورق، تیوب، لوله، فورجینگ و قطعه ریختگی در مخازن تحت فشار به کار گرفته می شوند.

کاربرد فولادهای کروم مولیبدن

فولادهای کروم – مولیبدن در ابتدا برای کاربرد در دمای بالا تا 1300 درجه فارنهایت یا 704 درجه سانتی گراد در نیروگاه های برق، پالایشگاه ها و صنایع شیمیایی برای استفاده در مخازن تحت فشار و لوله کشی به کار گرفته می شدند. اگرچه دمای کاربرد معمول آن ها 400 تا 550 درجه سانتی گراد بوده است. این آلیاژها مقاومت ویژه ای در برابر مواد خورنده پالایشگاهی مانند گوگرد در دمای بالا و حمله هیدروژنی نشان می دهند. برای بهبود مقاومت به خوردگی معمولا این آلیاژها با لایه ای از فولاد زنگ نزن پوشانده می شوند.

استحکام خزشی فولادهای کروم مولیبدن

استحکام خزشی بهینه در فولادهای کروم - مولیبدن با انجام تمپرینگ پس از نرماله کردن و کوئنچینگ بدست می آید. در فولادهای پرآلیاژتر عملیات تمپرینگ منجر به رسوب ذرات ریز از کاربیدهای آلیاژی می شود که در ایجاد

مقاومت به خزش بسیار موثرند. اگرچه باید به این نکته اشاره کرد که معمولا کاهش در چقرمگی شکست هم رخ می دهد. افزایش بیشتر استحکام خزشی با افزودن وانادیم به ترکیب معمولی فولاد مانند 1Cr–0.5Mo–0.25V و 0.5Cr–0.5Mo–0.25Vانجام می شود. حضور ذرات ریز کاربید وانادیم که در ساختار پخش شده اند بیش از کاربیدهای کروم و مولیبدن به پایداری فولاد کمک می کند.

متالورژی جوشکاری فولادهای کروم مولیبدن

فولادهای Cr-Mo جوش پذیر هستند اما به طراحی دقیق تر و کنترل بیشتری نسبت به فولادهای کم کربن نیاز دارند. تفاوت اولیه آن ها در سختی پذیری فولادهای آلیاژی در هوا است. این فولادها به علت داکتیلیته کم در معرض ترک قرار دارند. این ترک ها شامل ورقه ورقه شدن، ترک داغ و گرمایش مجدد یا SRC می شوند. برای جوش دادن این فولادها باید از روش های جوشکاری با هیدروژن کم استفاده کرد تا از ایجاد ترک های هیدروژنی در فلز جوش و در ناحیه HAZ جلوگیری کرد. این فولادها در شرایط عملیات حرارتی مختلفی جوش داده می شوند: آنیل شده، نرماله و تمپر شده یا کوئنچ و تمپر شده. اتصالات جوشی معمولا پیش از مورد استفاده قرار گرفتن، عملیات حرارتی می شوند تا داکتیلیته و چقرمگی آن ها افزایش و تنش جوش آن ها کاهش یابد.

طراحی اتصالات جوشکاری:

طراحی اتصالات جوش باید به گونه ای باشد که فضای کافی برای حرکت الکترودها وجود داشته باشد و از نفوذ جوش به ریشه اطمینان حاصل شود، هم چنین حذف سرباره آسان باشد. هندسه جوش باید به گونه ای باشد که از ایجاد شکاف که منجر به تمرکز تنش می شود، جلوگیری کند. باید از گوشه های تیز و تغییرات ناگهانی در سطح مقطع خودداری کرد.

آماده سازی اتصال:

لبه های اتصال باید با برشکاری، ماشینکاری، تراشکاری، برش با گاز یا قوس الکتریکی آماده شوند. پیش از جوش، ناهمواری های سطح که به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل می کنند باید با سمباده حذف شوند. آلودگی های سطحی و سایر مواد خارجی باید حذف شوند. اکسیدهای کروم که در حین برش های حرارتی ایجاد می شود و در دمایی بالاتر از فلز پایه ذوب شده و درنهایت پوسته می شوند باید با روش های مناسب حذف شوند.

پیش گرمایش:

پیش گرمایش در جوشکاری فولادهای کرم – مولیبدن هوا سخت بسیار مهم است. پیش گرمایش برای جلوگیری از سخت شدن و ترک خوردن انجام می گیرد. پیش گرمایش از تنش ها می کاهد مناطق مارتنزیتی را محدود یا تمپر می کند و میزان هیدروژن باقی مانده در جوش را کاهش می دهد. نگهداشتن جوش در دمای پس از گرمایش (برابر با دمای پیش گرمایش) پس از اتمام جوشکاری به هیدروژن اجازه نفوذ به خارج جوش را می دهد.

فرآیند جوشکاری:

بیشتر فرآیندهای جوشکاری ذوبی می توانند برای به اتصال فولادهای کروم – مولیبدن به کار گرفته شود. فرآیندهای معمول جوشکاری شامل SMAW، GTAW، SAW، GMAW، FCAW جوشکاری قوس پلاسما و جوشکاری الکترواسلگ هستند.

فلز پر کننده:

ترکیب فلز پرکننده باید به جز درصد کربن نزدیک فلز پایه باشد تا استحکام و مقاومت در برابر حرارت و خوردگی یکنواخت بدست آید. درصد کربن فلز پر کننده معمولا کمتر از فلز پایه است. هنگامی که عملیات بعدی کوئنچ و تمپر یا نرماله و تمپر مد نظر باشد باید درصد کربن فلز پر کننده و پایه یکسان باشد.

تردی تمپر فولادهای کروم مولیبدن

فولادهای Cr–Mo به خصوص فولادهای 2.25Cr–1Mo نسبت به تردی تمپر حساس هستند. تردی تمپر شرایطی است که با قرار گرفتن طولانی مدت در معرض دمای بالا در محدوده 370 تا 560 درجه سانتی گراد ایجاد می شود و در حضور ناخالصی هایی مانند فسفر، قلع، آنتیموان و آرسنیک رخ می دهد. این پدیده منجر به کاهش ناگهانی چقرمگی شیار ماده می شود. به عبارت دیگر، فولادهایی که در دمای اتاق چکش خوارند در حین کار تمایل به تردی پیدا می کنند. تمایل به تردی تمپر در فولادها 2.25Cr–1Mo نسبت به سایر فولادهای Cr–Mo بسیار بالاتر و تقریبا به اندازه فولاد 3Cr–1Mo است. مقادیر بالای سیلیسیم و منگنز اثر بیشتری بر از بین رفتن چقرمگی دارند. الزامات مقاومت در برابر تردی تمپر و چقرمگی در دمای پایین اخیرا برای فولاد Cr-Mo که در ساخت مخازن تحت فشار در صنعت نفت به کار می روند، سختگیرانه تر شده است. زیرا مشخص شده که پتانسیل شکست ترد با دمای کارکرد در محدوده بحرانی افزایش می یابد. در نتیجه ممکن است برخی واحدها در هنگام آغاز به کار یا خاموشی بدون علائم قبلی در معرض شکست ترد قرار گیرند.

می توان تردی تمپر تمامی ورق ها، فورجینگ ها و قطعات جوشکاری شده از جنس Cr–1Mo2.25 را با سفارش ترکیب مشخصی از عناصر آلیاژی که منجر به تردی تمپر می شوند، کاهش داد. هم چنین می توان تمام موادی که در معرض تردی تمپر قرار دارند را پیش از استفاده در مخزن مورد آزمایش قرار داد. روش های جدید فولادسازی، توانایی تولید فولادهایی با خلوص بالا را دارند به طوری که تا حد زیادی از تردی تمپر جلوگیری می کنند. مقاومت به تردی تمپر معمولا با استفاده از فاکتورهای مختلفی که مجموعه اثر عناصر آلیاژی است مشخص می شود. دو عدد از این فاکتورها، فاکتور واتانابه یا J فاکتور و $\bar{X}$ برای Cr–1Mo2.25 به شکل زیر مشخص می شوند:

بر حسب درصد وزنی $$J = (\%Si + \%Mn)(\%P + \%Sn) \times 10^4$$

مقدار تمام عناصر بر حسب ppm $$\bar{X} = \frac{(10P + 5SP + 4Sn + As)}{100}$$

سایر عناصر آلیاژی که منجر به تردی تمپر می شوند، آرسنیک و آنتیموان هستند که در فولادهای Cr–1Mo2.5 اثر کمتری دارند چون مقادیر آنها به ترتیب کمتر از 0.020 و 0.004 درصد است. مقاومت خوب به تردی تمپر معمولا با مقدار فاکتور J کمتر از 200 در دمای انتقال با انرژی 54 ژول مشخص می شود. در بسیاری از الزامات

باید مقدار فاکتور J کمتر از 150 باشد، اما پراکندگی قابل توجهی میان داده های تست ضربه چارپی در دمای انتقال و J فاکتور وجود دارد. تردی تمپر با تست نمونه شیار دار از یک ماده پیش و پس از سرد شدن آهسته از دمای 595 تا 315 درجه سانتی گراد انجام می گیرد تغییر ناگهانی انرژی در دمای انتقال که معمولا 54 ژول است به عنوان تردی اندازه گیری می شود.

فولاد های مدرن ASTM A387 معمولا ریز دانه، کم سیلیسیم هستند؛ برای کنترل ناخالصی های آن ها از کلسیم استفاده شده و کوئنچ و تمپر شده اند تا بالاترین مقادیر چقرمگی را داشته باشند. نتیجه تغییرات شیمیایی در طی 15 سال اخیر شامل کاهش درصد سیلیسم فولاد از 0.25 به 0.1 درصد، کاهش گوگرد از 0.02 به 0.002 درصد و کاهش فسفر از 0.015 به 0.005 درصد بوده است.

ریزدانه بودن فولاد تغییر ناگهانی در منحنی انتقال از حالت نرم به ترد را در دماهای کم کاهش می دهد. بنابراین می توان با اطمینان گفت که ورق های کوئنچ و تمپر شده Cr–1Mo2.25 نباید در هنگام کار در دماهای زیر 400 درجه سانتی گراد دچار شکست ترد شوند.

عملیات حرارتی سرد کردن مرحله ای

در برخی از مشخصات مد نظر برای فولادها باید یک عملیات حرارتی شبیه سازی شده با سرمایش مرحله ای انجام گیرد که در واقع عملیات ترد سازی سرعت یافته برای پیش بینی حساسیت به تردی تمپر در زمان کوتاه تست است. سازنده معمولا این تست آزمایشگاهی را انجام می دهد و افزایش ناگهانی را در انرژی 40 فوت پوند نمونه شیار دار گزارش می کند.

ویژگی های تست ضربه نمونه شیار دار:

می توان از تست بهبود یافته شارپی با نمونه شیار دار V برای فولادهای A387 با این شرایط استفاده کرد:

- مقدار گوگرد از 0.010 تا 0.005

- گازدایی شده در خلا

- استفاده از کلسیم برای کنترل شکل ناخالصی ها

هنگامی که ورق های ضخیم با چقرمگی نمونه شیار دار بالا مورد نیاز باشد باید عملیات کوئنچ و تمپر انجام شود. ممکن است از روش های مختلف آستنیته کردن هم برای افزایش چقرمگی استفاده کرد.

تردی تمپر فلز جوش

ارتباط فاکتور J با تردی تمپر فلز جوش بسیار ضعیف است. این احتمالا به دلیل تفاوت ترکیب شیمیایی و ریزساختار فلز جوش در مقایسه با محصولات ریخته گری شده است. بنابراین حساسیت فلز جوش به تردی تمپر معمولا با اندازه گیری مستقیم چقرمگی ضربه نمونه شیار با استفاده از رابطه زیر به دست می آید.

$$oF100 > vTr40 + 1.5\Delta vTr40$$

که در آن:

vTr40 : دمای انتقال برای تردی فلز جوش

$\Delta vTr40$: تغییرات دمای انتقال برای فلز جوش که تحت سرمایش مرحله ای قرار گرفته تا دچار تردی تمپر شود.

کنترل تردی تمپر فلز جوش:

کنترل تردی تمپر در فلز جوش 2.25Cr–1Mo به شکل قابل ملاحظه ای دشوارتر از ورق ها و فورجینگ هاست. زیرا مقادیر بیشتر سیلیسیم و منگنز برای جوش دادن بی نقص فلز جوش لازم است. گدازآورهای اصلی معمولا کمترین میزان حساسیت به تردی تمپر را ایجاد می کنند و استحکام در دمای بالا را نیز فراهم می آورند. سایر فاکتورهایی که چقرمگی در دمای پایین و تردی تمپر را تحت تاثیر قرار می دهند در ادامه ذکر شده اند:

1- اثر اندازه دانه بر بهبود چقرمگی در دمای پایین فلز جوش، کاملا شناخته شده است. افزودن نیتروژن منجر به کاهش اندازه دانه و در نتیجه افزایش چقرمگی در دمای پایین می شود.

2- کاهش مقدار اکسیژن در فلز جوش منجر به بهبود چقرمگی می شود. کربن، سیلیسیم، منگنز و تیتانیم به طور کلی برای اکسیژن زدایی به کار می روند. باید در این مورد بسیار محتاط بود زیرا مقادیر بسیار کم اکسیژن سبب کاهش چقرمگی می شود.

3- ترکیب شیمیایی و ناخالصی ها در فلز جوش کنترل شود. عناصر آلیاژی موثر در این رابطه، فسفر، آرسنیک، آنتیموان و قلع هستند. در مورد منگنز هم باید اشاره کرد که محدوده پیشنهاد شده برای فلز جوش 0.7 تا 1 درصد است.

4- بهترین محدوده دمایی برای عملیات حرارتی پس از جوش 1250 تا 1300 درجه فارنهایت یا 677 تا 704 درجه سانتی گراد است. مقادیر حاصل از تست نمونه شیاردار را می توان با افزایش زمان این عملیات حرارتی افزایش داد.

عملیات حرارتی پس از جوشکاری (تنش زدایی)

بنابر کد ASME برای بویلرها و مخازن تحت فشار، انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری یا تنش زدایی برای نرم کردن منطقه HAZ کاهش تعداد مناطق سخت و تثبیت ریزساختار لازم است. در غیر این صورت ممکن است در حین کار قطعه در معرض حمله هیدروژی یا تردی خزش قرار گیرد. روش های مختلف تنش زدایی توسط مصرف کننده و سازندگان فولادهای گرید A387 انجام می گیرد. در برخی از موارد افزایش دما یا زمان تنش زدایی برای این فولادها برای تثبیت ریزساختار منطقه HAZ پس از ساخت و با درنظر گرفتن جوشکاری های تعمیری در حین کار مخزن پیشنهاد شده است.

اگرچه با افزایش دما و زمان تنش زدایی توانایی فولاد برای دستیابی به تنش کششی مد نظر محدود می شود و بنابراین تنش زدایی بیش از حد، اثر زیان آوری بر مقادیر چقرمگی حاصل از نمونه شیار دار دارد.

پارامتر لارسون میلر

پارامتر لارسون میلر معمولا برای بدست آوردن تصوری از تغییرات خواص ماده در هنگام عملیات حرارتی در بازه های دمایی و حرارتی مختلف به کار می رود. این پارامتر به شکل گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد، زیرا خواص فولادهای کم آلیاژ عملیات حرارتی شده را کاهش داده و استحکام آن ها را در بازه طولانی در یک دما را تخمین می زند. فولادهای Cr–Mo در حالت جوش شده ساختار سخت شده دارند. انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری این ساختار را نرم و به بینیت تمپر شده تبدیل می کند. با نرم شدن ساختار چقرمگی به تدریج بازیابی می شود اما پارامتر عملیات حرارتی که به پارامتر لارسون میلر معروف است:

$$P = T(\log t + 20)$$

افزایش می یابد. (در رابطه فوق T دما برحسب کلوین و t زمان با بر حسب ساعت است).

افزایش بیش از حد این پارمتر منجر به کاهش چقرمگی می شود. بنابراین لازم است تا شرایط عملیات حرارتی به دقت کنترل شود.

ترک بازگرمایش در فولادهای Mo–Cr و Mo–V–Cr

فسفر و گوگرد منجر به افزایش RC یا ترک بازگرمایش در فولادهای کروم مولیبدن می شود. برای یک آلیاژ مشخص درصد بحرانی از فسفر وجود دارد که در زیر آن مقدار تردی رخ نمی دهد. این ملاحظاتی عبارتند از:

1- کاهش فسفر و گوگرد

2- افزودن مقادیر کم تیتانیم (0.07 درصد) که حساسیت به ترک بازگرمایش را به دلیل وجود فسفر کاهش می دهد

3- افزودن کلسیم یا فلزات کمیاب خاکی در صورت وجود گوگرد مقاومت در برابر RC را افزایش می دهد.

فولاد بهبود یافته Mo1–Cr9

افزودن مقادیر کم نیوبیوم (0.06-0.1 درصد) و وانادیم (0.25-0.18 درصد) به فولاد ، 9Cr–1Moفولادی با استحکام و شکل پذیری بالا ایجاد می کند. خواص خزشی این فولاد در طولانی مدت بهبود یافته، انبساط حرارتی آن کاهش، هدایت حرارتی و مقاومت به SCC آن نیز افزایش یافته است. کاربردهای مطرح شده برای فولاد 9Cr–1Moبهبود یافته عبارت است از :بویلرها، مخازن واکنش، سیستم های راکتور تولید کننده، مخازن تحت فشار برای گازسازی یا مایع سازی زغال سنگ، تجهیزات هیدروتریتینگ نفت و سیستم های زمین گرمایی.

فولاد Ni–Mo–Cr3 پیشرفته

فولاد 3 Cr–Mo–Niپیشرفته برای کاربرد در مقاطع ضخیم مخازن تحت فشار و به خصوص برای از سازی و مایع سازی زغال سنگ با افزودن مقادیر اندکی عناصر آلیاژی به فولاد تجاری 2.25 Cr-1Moیا ASTM A387 گرید 22 کلاس 2 توسعه یافته اند. این آلیاژ جدید سختی پذیری بهبود یافته دارد (به عنوان مثال در ورق 400 میلی متری با عملیات نرماله کردن می توان به ساختار کاملا بینیتی دست یافت)؛ استحکام آن ها افزایش یافته، مقاومت در برابر حمله هیدروژنی فوق العاده دارند، چقرمگی ضربه شارپی بهتر به همراه داکتیلیته ، مقاومت به خزش- گسیختگی و مقاومت تردی تمپر دارند .

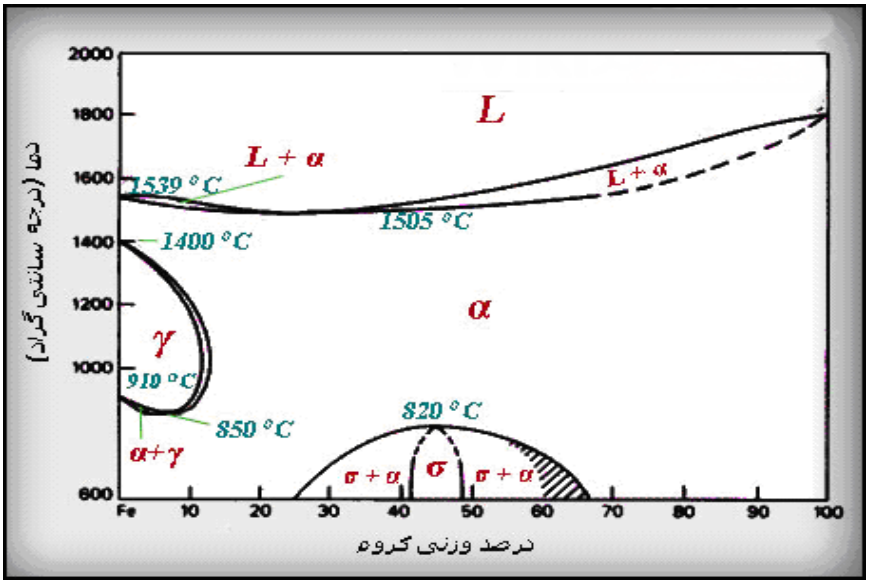
آلیاژ آهن – کروم (Fe-Cr Alloy)

را می توان پایه تشکیل فولادهای زنگ نزن به شمار آورد .کروم عنصر اصلی افزودنی در تمامی فولادهای زنگ نزن است و به همین علت بررسی دیاگرام فازی آن و ساختارهای موجود در آن با توجه به درصد کروم افزودنی، حائز اهمیت است .وجود کروم موجب افزایش مقاومت به خوردگی آلیاژ آهنی می شود.

در بخش های بعدی توضیح کاملی در مورد دیاگرام دو فازی آلیاژهای آهن - کروم ارائه شده است.

دیاگرام دو فازی آهن - کروم

حلقه γ و فازσ : دیاگرام فازی آهن – کروم که در شکل زیر دیده می‌شود شامل دو قسمت مهم می‌باشد :



1- تشکیل حلقهγ

از آن‌جا که کروم مشابه فریت α، دارای ساختار BCC است، پایدارکننده فریت بوده و منطقه α را توسعه اما منطقه فاز γ را کاهش می‌دهد. در نتیجه، حلقه γ تشکیل شده و نمودار آهن- کروم را به مناطق FCC و BCC تقسیم می‌کند. در آلیاژهای آهن- کروم با کم‌تر از 12 تا 13 درصد کروم، هنگام سرد کردن از دماهایی در گستره حلقه γ، دگرگونی آستنیت به فریت انجام می‌شود .در آلیاژهایی با بیش از 12تا 13٪Cr دگرگونی FCC به BCC رخ نمی‌دهد بلکه در هنگام سرد کردن از دماهای بالا به‌صورت محلول جامد کروم در آهن α باقی می‌مانند.

2- تشکیل فاز σ

در دماهای پایین، نمودار فازی آهن -کروم شامل گستره کاملی از محلول‌های جامد نیست، بلکه دارای فازی میانی بوده که فاز σ نام دارد و در کمتر از دمای 821 درجه سانتی‌گراد تشکیل شده و در حدود Cr46٪ متمرکز می‌شود. فاز σ دارای ساختار بلوری تتراگونال سخت و شکننده است .از آن‌جا که حضور فاز σ می‌تواند منجر به ایجاد ساختارهایی ترد و یا دارای خواص مکانیکی متغیر شود، وجود این فاز در آلیاژهای مهندسی می‌تواند مشکل آفرین باشد.

فولادهای زنگ نزن مورد استفاده در ساخت مبدل حرارتی

برای بررسی فولادهای زنگ نزن مورد استفاده در ساخت مبدل حرارتی باید ابتدا بر بررسی این دسته از فولاد ها پرداخت. فولاد های زنگ نزن ((SSآلیاژ هایی هستند که درصد کروم آن ها با یا بدون عناصر آلیاژی دیگر کمتر از 12درصد نباشد .فولادهای زنگ نزن در برابر زنگ زدن نسبت به فولادهای کربنی ساده و فولادهای کم آلیاژ مقاوم ترند .آن ها مقاومت به خوردگی عالی دارند زیرا درصد کروم آن ها بالاست .این فلزات به شکل کارشده و ریختگی در دسترس هستند.

فولادهای زنگ نزن را می توان به 5خانواده بر اساس ساختار متالورژیکی آن ها تقسیم بندی کرد.

1- فولاد زنگ نزن مارتنزیتی

2- فولاد زنگ نزن آستنیتی

3- فولاد زنگ نزن فریتی

4- فولاد زنگ نزن دوفازی

5- فولاد زنگ نزن رسوب سختی

چهار دسته نخست توسط فازهای متالورژیکی شناخته می شوند .در آهن و فولاد، به ساختار BCC فریت و به ساختار FCC آستنیت گفته می شود .بنابراین فولاد های فریتی یا آستنیتی حاوی مقادیر زیادی از این فاز ها هستند . فولادهای دوپلکس حاوی هر دو فاز فریت و آستنیت هستند .پنجمین گروه فولادهای زنگ نزن آن هایی هستند که می توان با عملیات حرارتی پیرسازی استحکام آن ها افزایش داد .این فولاد برای ساخت مبدل های حرارتی مورد استفاده قرار نمی گیرد و در نتیجه در این مطلب راجع به آن بحث نخواهد شد.

نامگذاری فولادهای زنگ نزن

فولادهای زنگ نزن کارشده بر اساس استاندارد انستیتو آهن و فولاد آمریکا (AISI) و بر اساس ترکیب دسته بندی می شوند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی Cr-Ni-Mn به عنوان سری2xx ، و فولادهای زنگ نزن آستنیتی Cr-Ni به عنوان سری 3xx و 4xx نامگذاری می شوند. فولادهای گرید رسوب سختی بر اساس درصد نیکل و کروم دسته بندی می شوند.

مشخصات ASTM برای فولادهای زنگ نزن:

بیشتر انواع فولادهای زنگ نزن AISI مانند آستنیتی، فریتی، مارتنزیتی، و برخی انواع ویژه آن ها مانند سوپر فریتی و سوپر آستنیتی در A240 بیان شده است.

راهنمای انتخاب فولاد زنگ نزن

راهنمای انتخاب انواع فولاد زنگ نزن توسط براون و دبولد به صورت جداگانه بررسی شده است. بر اساس پژوهش براون، در هنگام انتخاب گرید مناسب باید موارد زیر را در نظر گرفت:

1- انتخاب میزان مقاومت به خوردگی برای کاربرد مد نظر.

2- انتخاب مقدار استحکام مورد نیاز.

3- به علت وجود برخی مشکلات در هنگام ساخت باید آلیاژ پایه ای انتخاب شود که بهترین ویژگی ها را در ساخت داشته باشد.

4- انجام آنالیز هزینه شامل قیمت مواد اولیه، هزینه های نصب و تخمین عمر محصول نهایی.

5- تعیین در دسترس بودن مواد اولیه که از نظر هزینه، مقرون به صرفه و از نظر کارایی مناسب باشد.

از نظر دبولد باید انتخاب فولاد زنگ نزن بر اساس مقاومت به خوردگی و استحکام باشد.

فولاد زنگ نزن مارتنزیتی

فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی از مقاومت به خوردگی کمتری برخوردارند زیرا تنهای حاوی 11 تا 18 درصد کروم هستند و مقدار کربن آن ها معمولا زیر 0.4 درصد است. حداقل مقدار کروم بر اساس مقاومت به خوردگی انتخاب می شود و بیشترین مقدار آن بر اساس مقدار لازم برای آستنیته کردن کامل آلیاژ در طی عملیات حرارتی مشخص می شود. یکی از ویژگی های کلیدی این گروه توانایی آن ها برای سخت شدن در حین عملیات حرارتی است. کارآیی این فولاد در مبدل های حرارتی و در محیط های آبی محدود است.

اما این فولاد ها ترکیب مفیدی از استحکام، چکش خواری، چقرمگی و مقاومت در برابر خوردگی را در محیط های ملایم نشان می دهند. مقاومت به خوردگی تنها زمانی در مورد این ماده ایجاد می شود که به طور کامل سخت و تمپر شده باشد. فولاد AISI 410 یکی از پرکاربردترین گریدهای مارتنزیتی است که گاهی اوقات در مبدل های حرارتی استفاده می شود.

متالورژی و خواص فولاد زنگ نزن آستنیتی

فولادهای زنگ نزن آستنیتی تقریبا 80 تا 90 درصد فولاد های زنگ نزن را تشکیل می دهند. این کلاس فولاد های زنگ نزن شامل آلیاژهای گروه 200 و 300 می شود که می توان آن ها را با کار سرد، سخت کرد. آلیاژهای سری 200 برای صرفه جویی در مصرف نیکل با جایگزینی آن با منگنز به وجود آمدند به شکلی که به ازای هر یک درصد نیکل، دو درصد منگنز جایگزین شود. آلیاژ های سری 300 فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای کم کربن – آهن – کروم هستند که با نیکل هم همراه هستند و گاهی اوقات منگنز یا نیتروژن هم دارند یا حاوی مجموعه ای از این عناصر هستند تا در اثر سرد کردن سریع در دمای اتاق به آستنیت تبدیل شوند. مقدار کروم در محدوده 15 تا 32 درصد، مقدار نیکل در محدوده 8 تا 37 درصد و مقدار کربن به کمتر از 0.03 درصد محدود شده است. کروم مقاومت به اکسیداسیون و مقاومت به خوردگی در محیط خاص را ایجاد می کند.

تیپ های معمول فولادهای زنگ نزن xx3 شامل شامل 304، L304، 309، 310، 316، L316، 321، 347 و 348 می شوند. آلیاژ پایه این گروه 304، حاوی 18 درصد کروم و 8 درصد نیکل است. استحکام این آلیاژ و مقاومت به خوردگی آن متوسط و چقرمگی آن عالی است. برای بهبود مقاومت به خوردگی حفره دار شدن در برابر کلراید باید به آن مولیبدن اضافه کرد که به این ترتیب آلیاژهای 316 و 317 پدید می آیند. فولاد زنگ نزن 316 (18 درصد کروم، 12درصد نیکل، 2.5 درصد مولیبدن) و 317 (18 درصد کروم، 15 درصد نیکل، 3.5 درصد مولیبدن) در محیط های کلریدی مقاومت بیشتری نسبت به 304 از خود نشان می دهند. خواص فولادهای زنگ نزن آستنیتی عبارت است از :

- غیر مغناطیسی (نگیر)، داکتیل، کارسخت
- با عملیات حرارتی سخت نمی شوند.
- تک فاز از صفر کلوین تا دمای ذوب
- ساختار کریستالی FCC
- جوشکاری آسان
- عدم ایجاد تردی 475 درجه سانتی گراد و تردی هیدروژنی
- عدم وجود دمای انتقال نرمی به تردی

توسعه آلیاژ

فولادهای زنگ نزن آستنیتی Cr–8Ni18 به طور موفقیت آمیز در آب های شیرین و محیط های صنعتی با خورندگی ملایم به مدت 50 سال مورد استفاده قرار گرفته اند. مقاومت به خوردگی، جوشکاری و استحکام خانواده فولادهای زنگ نزن آستنیتی دائما در کاربردهای صنعتی با تغییر ترکیب شیمیایی آن ها ثابت شده است. این ویژگی ها عبارتند از:

1- مولیبدن برای بهبود مقاومت به خوردگی در محیط های کلریدی مانند تیپ 316 و 317 به کار می رود. مقاومت این فولادها در برابر حمله های شیمیایی نسبت به تیپ 304 بیشتر است.

2- فولادهای کم کربن (L304، L316 و L317) به رسوب کاربید در دمای 425 تا 870 درجه سانتی گراد (800 تا 1600 درجه فارنهایت) مقاومند و در نتیجه در حین جوشکاری دچار کاهش مقاومت به خوردگی نمی شود. معمولا توصیه می شود که در دمای کمتر از 425 درجه سانتی گراد (800 درجه فارنهایت) از این فولادها استفاده شود.

3- نیتروژن برای جبران کاهش استحکام در فولادهای کم کربن یا گرید های L اضافه می شود. افزودن نیتروژن استحکام را در تمام دماها افزایش می دهد، مقاومت به خوردگی محلی را در محلول های اسید کلر دار افزایش داده، مقاومت به حفره دار شدن و پایداری فاز را نیز بهبود می دهد. افزودن نیتروژن پسیو شدن را نیز بهبود می دهد و اثر سایر عناصر آلیاژی را به خصوص کروم و مولیبدن را افزایش می دهد. درصد نیتروژن معمولا از 0.1 تا 0.25 درصد در فولادهای زنگ نزن آستنیتی بیشتر نمی شود تا از مشکلات مربوط به ایجاد تخلخل در شمش، کارپذیری گرم و رسوب نیتروژن که در اثر حضور مقدار زیاد نیتروژن ایجاد می شوند، جلوگیری شود.

4- افزایش کروم برای افزایش مقاومت به حفره دار شدن و خوردگی شیاری.

5- افزایش نیکل برای پایدار کردن ریزساختار آستنیتی و بهبود مقاومت به خوردگی تنشی و محیط های احیا کننده. اثر نیکل بر خوردگی تنشی با استفاده از منحنی کاپسون مشخص می شود.

6- گریدهای پایدار شده: اضافه کردن تیتانیم و نیوبیوم کاربیدهای پایدار ایجاد می کند تخلیه کروم به وسیله تشکیل کاربیدهای کمپلکس کروم جلوگیری می کند و در نتیجه از حساس شدن مناطق جوش یا قطعات عملیات حرارتی شده جلوگیری می کند مانند فولاد 321 که با تیتانیم و فولاد 347 که با نیوبیوم پایدار شده است.

7- عبارت LR مخفف low residual بوده و در این حالت به معنای محدود کردن کربن برای مقاومت به خوردگی است. کاهش کربن هم چنین ریسک تشکیل فیلم های بین دندریتی غنی از نیوبیوم را کاهش می دهد. هم چنین محدودیت هایی برای سیلیسیم، گوگرد و فسفر برای بهبود مقاومت به ترک های ناشی از جدایش وجود دارد.منگنز معمولا برای بهبود مقاومت به ترک های انجمادی به ترکیب افزوده می شود.

کاربردهای فولادهای زنگ نزن برای مبدل های حرارتی

فولادهای زنگ نزن آستنیتی به دلیل قیمت پایین، مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی خوب در محدوده وسیعی از دما مورد استفاده قرار می گیرند. آن ها به طور موفق در محیط های مختلف مانند اسیدها، آب های شیرین و آب های شور مورد استفاده قرار گرفته اند. از طرف دیگر فولادهای زنگ نزن فریتی و مارتنزیتی به دلیل چقرمگی کمتر در دمای اتاق کاربردهای محدود تری دارند. فاکتورهایی که استفاده از فولاد زنگ نزن را برای کاربرد در مبدل های حرارتی مناسب می کنند عبارتند از:

-مقاومت بالا به خوردگی یکنواخت مانند خوردگی سایشی

- مقاومت در برابر محلول هایی با pH بالا
- مقاومت به اکسیداسیون و سولفیداسیون
- سازگاری با روش های ساخت
- توانایی تمیز کردن آسان رسوبات با استفاده از روش های معمول شیمیایی و مکانیکی بدون ایجاد آسیب
- قابلیت رقابت با سایر موادی که معمولا در ساخت مبدل های حرارتی به کار گرفته می شوند.
- پایداری خواص در حین کار
- سازگاری با مایعات فرآیند
- چقرمگی در کاربردهای برودتی و استحکام در دمای بالا
- مقاومت در برابر کچلی و چسبندگی
- هدایت حرارتی متوسط
- پایداری ابعادی
- فولادهای زنگ نزن جدید برای کاربرد در مبدل های حرارتی

روش های جدید فولادسازی مانند AOD و VIM در دو دهه اخیر گرید های جدید از فولاد های زنگ نزن فریتی، آستنیتی و دوپلکس را با ناخالصی های کم در محدوده وسیعی از عناصر آلیاژی برای کاربردهای خاص معرفی کرده است. در کنار ویژگی های خوب، فولادهای زنگ نزن معایبی نیز دارند:

1- حساسیت به خوردگی شیاری زیر رسوبات

2- حساسیت به حفره دارشدن و خوردگی تنشی در حضور یون کلرید در دمای هوای بالاتر از 50 درجه سانتیگراد

3- حساس شدن منجر به خوردگی بین دانه ای می شود.

4- حساس به رسوبات

خواص مکانیکی برای کاربردهای برودتی و دما بالا

اگرچه فولادهای زنگ نزن آستنیتی در ابتدا به دلیل مقاومت به خوردگی بالا مورد استفاده قرار گرفتند اما این فولادها خواص مکانیکی عالی در محدوده وسیعی از دما از دماهای زیر صفر تا دماهای بالا دارند.

فولادهای زنگ نزن آستنیتی بر خلاف فولادهای فریتی انتقال از نرمی به تردی را نشان نمی دهند. آن ها در دماهای پایین هم چقرمگی بالای خود را حفظ می کنند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی مانند 304، 304L، 316، 316L و 347 در کاربردهای برودتی برای ذخیره گاز مایع و مخازن انتقال به کار گرفته می شوند.

فولادهای زنگ نزن آستنیتی استحکام خزش – گسیختگی خوبی در دما های بالای 600 درجه سانتی گراد نشان می دهند. اگر استحکام خزشی بیشتر در دماهای بالاتر مد نظر باشد، افزودن وانادیم، نیوبیوم و تیتانیم الزامی است. اضافه کردن این عناصر آلیاژی منجر به افزایش استحکام و کاهش چقرمگی در دمای پایین می شود.

عناصر آلیاژی و ریزساختار فولادهای زنگ نزن

در فولادهای جوشپذیر فریتی و آستنیتی ریزساختار بسیار اهمیت دارد. اگرچه کروم و نیکل اصلی ترین عناصر آلیاژی در فولادهای زنگ نزن آستنیتی هستند، سایر عناصر نیز برای ایجاد خواص ویژه به ترکیب آن ها اضافه می شوند و باید اثر آن ها را بر ریزساختار در نظر گرفت. مولیبدن، نیوبیوم و تیتانیم تشکیل فریت دلتا را در زمینه آستنیتی تقویت کرده و هم چنین کاربیدهایی مانند کروم تشکیل می دهند. از طرف دیگر مس، منگنز، کبالت، کروم، کربن و نیتروژن اثر مشابه با نیکل در تشکیل فاز آستنیت دارند. به این عناصر، عناصر آستنیت ساز می گویند.

ترکیب معمول فولادهای زنگ نزن آستنیتی در جدول زیر نمایش داده شده است.

ترکیب نامی فولادهای زنگ نزن ریختگی آستنیتی									
گرید	کربن (ماکزیمم)	منگنز (ماکزیمم)	فسفر (ماکزیمم)	گوگرد (ماکزیمم)	سیلیسیم (ماکزیمم)	کروم	نیکل	مولیبدن	سایر عناصر آلیاژی
304	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0–20.0	8.0–12.0	–	
L304	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0–20.0	8.0–12.0		
316	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	16.0–18.0	10.0–14.0	2.0–3.0	
L316	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	16.0–18.0	10.0–14.0	2.0–3.0	
317	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0–20.0	11.0–15.0	3.0–4.0	
L317	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	18.0–20.0	11.0–15.0	3.0–4.0	
321	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0–19.0	9.0–12.0		Ti=5C min (0.70 max)

347	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	9.0-13.0		max 1.10Nb+Ta=10C min ,
348	0.08	2.0	0.045	0.03	1.0	17.0-19.0	9.0-13.0		max 1.10Nb+Ta=10C min ,

تیپ های آلیاژی و کاربردهای آن ها در مبدل های حرارتی

مواد مقاوم برای استفاده در صنایع فرآیندی 304، L304، 316و 347 هستند. فولاد زنگ نزن در کندانسور ها، هیتر های آب ورودی و سایر مبدل های حرارتی مورد استفاده قرار می گیرند و کاربرد وسیعی در پالایشگاه ها، صنایع شیمیایی، صنایع کود، صنایع خمیر سلولزی و کاغذ، صنایع غذایی و غیره دارند. خواص و کاربرد تیپ های 304، 310، 316، 321 و 347 در ادامه مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

تیپ 304 (Cr-8Ni18) محبوب ترین گرید این سری فولادهای زنگ نزن است و در کاربردهایی به کار گرفته می شود که به ترکیب مناسبی از مقاومت به خوردگی و شکل پذیری نیاز دارند. ساختار یکنواخت، داکتیلیته بالا و استحکام عالی، عملکرد عالی در شکل دهی سرد، کشش عمیق و شکل دهی چرخشی تضمین می کند. این فولاد در حالت آنیل شده غیر مغناطیسی است. چقرمگی بسیار بالایی در دمای پایین دارد و برای ساخت مخازن برودتی از آن استفاده می شود. هم چنین برای کاربرد در سازه های جوشکاری شده که در آن ها محصول نهایی باید در محیط هایی با خورندگی بیشتر کار کند، مناسب است. مقاطع نازک را می توان بدون مشکلات مربوط به رسوب کاربید یا کاهش مقاومت به خوردگی جوش داد. بنابراین به همین دلیل عملیات حرارتی پس از جوش در بسیاری از موارد مورد نیاز نیست.

تیپ 304 به شدت در برابر زنگ زدگی مقاوم است و در برابر مواد غذایی، بسیاری از مواد شیمیایی آلی، رنگ ها و تعداد زیادی از مواد شیمیایی معدنی ایمن است. این ماده در محلول های اکسید کننده مقاومت خوبی در برابر خوردگی دارد. این ماده مقاومت خوبی در برابر اسید نیتریک دارد اما در برابر اسید سولفوریک مقاومت متوسط و در برابر اسیدهای هالوژنی مقاومت ضعیفی از خود نشان می دهد. برای حصول بهترین نتیجه توصیه می شود که این ماده پسیو شود تا مقاومت به خوردگی فولاد زنگ نزن حفظ شود. فولاد 304 تا دمای 870 درجه سانتی گراد در برابر پوسته شدن مقاوم است. برای کاربردهایی که گرم شدن و سرد شدن مداوم در آن ها صورت می گیرد دما نباید از 815 درجه سانتی گراد فراتر رود، ماکزیمم دمای کارکرد مداوم ماکزیمم 898 درجه سانتی گراد است.

تیپ 310

تیپ 310 (Cr-20Ni25) پرآلیاژ ترین ترکیب را در بین فولادهای زنگ نزن محبوب آستنیتی دارد و بیشترین مقاومت را به خوردگی و اکسیداسیون نشان می دهد.

تیپ 316

اضافه شدن مولیبدن در ترکیب این فولاد، بیشترین مقاومت در برابر حفره دار شدن را نسبت به تمام گریدهای کروم-نیکل ایجاد کرده است و در نتیجه برای کاربردهایی با خوردگی بالای کلر مناسب هستند. بنابراین آلیاژهای 316 و L316 هر دو مواد مقاومی در صنایع شیمیایی، خمیر سلولز و کاغذ هستند. فولاد زنگ نزن تیپ 316 در برابر سولفات ها، کلرید ها، فسفات ها و سایر نمک ها مقاوم است. با این حال مقاومت 316 و L316 در برابر حفره دار شدن در آب های آرام دریا با سرعت کمتر از 1.5 متر بر ثانیه به اندازه کافی بالا نیست. به همین دلیل در دو دهه اخیر گریدهایی با آلیاژهای بیشتر توسعه پیدا کرده اند. این فولادها به فولادهای زنگ نزن سوپرفریتی، دوپلکس و سوپر آستنیتی معروف شدند. تیپ 316 برای کاربردهایی که به استحکام بالا و مقاومت به حرارت در دمای بالا نیاز دارند به کار گرفته می شود. به علت وجود مولیبدن مقاومت این فولاد در برابر خزش از نوع 304 بیشتر است. تیپ 316 مقاومت عالی در برابر اکسیداسیون دارد و نرخ پوسته شدن آن ها در اتمسفر معمولی و در دماهای بیشتر از 898 درجه سانتی گراد به طور متوسط و در دمای 851 درجه سانتی به صورت متناوب کاهش می یابد. می توان این فولاد را بدون مشکل خاصی جوش داد و معمولا نیازی به عملیات حرارتی پس از جوشکاری نیست. این فولاد برای کاربردهایی که به استحکام بالا و مقاومت خزشی در دمای بالا نیاز دارند، استفاده می شود.

تیپ های 321 (18 درصد کروم، 1.5 درصد نیکل، تیتانیم)، 347 (18 درصد کروم، 11درصد نیکل، نیوبیوم) و 348 (18 درصد کروم، 11 درصد نیکل، نیوبیوم) به دلیل عدم وجود کاربید کروم و در نتیجه عدم ایجاد حمله های بین دانه ای به نام "فولادهای زنگ نزن پایدار شده" معروفند.

مکانیزم های مقاومت به خوردگی در فولاد زنگ نزن

(Corrosion Protection Mechanisms of stainless steel)

با لایه پسیو ارتباط تنگاتنگی دارد و در واقع فولادهای زنگ نزن مقاومت به خوردگی را مدیون لایه پسیو نازک روی سطح هستند. لایه پسیو مانعی فیزیکی میان فولاد و محیط خورنده ایجاد کرده و ضخامتی به اندازه 20 تا 30 انگستروم از جنس اکسید کروم هیدراته دارد که به شدت چسبناک بوده و در برابر حمله های شیمیایی مقاوم است .

لایه های پسیو که روی سطح تشکیل می شوند با محیط که معمولا اکسیژن یا اکسیدکننده است اندرکنش می کنند. اگر لایه پسیو به دلیل سایش یا خراش آسیب ببیند، فرآیند ترمیم یا پسیو شدن مجدد بلافاصله در حضور اکسیژن رخ می دهد. از طرف دیگر فولادهای زنگ نزن در شرایط کاهنده، با قرار گرفتن زیر شیارها یا رسوبات که نواحی بدون اکسیژن ایجاد می کنند، سریعا دچار خوردگی می شوند.

دلیل دیگر برای کاهش مقاومت به خوردگی در فولادهای زنگ نزن تشکیل لایه اکسیدی روی سطح به دلیل تمیزکاری ناقص پس از عملیات حرارتی است. این لایه اکسیدی با لایه پسیو متفاوت است. تمیزکاری قطعات عملیات حرارتی شده باید در محلول خنثی، برای جلوگیری از تشکیل لایه های اکسیدی انجام گیرد تا از ایجاد خوردگی در فولاد زنگ نزن جلوگیری شود.

فاز سیگما در فولاد زنگ نزن

فاز سیگما، یک ترکیب بین فلزی در فولادهای زنگ نزن است که به طور چشمگیری داکتیلیته و چقرمگی آن ها را کاهش می دهد و فولادهای زنگ نزن را در معرض خوردگی تنشی یا SCC و سایر انواع خوردگی قرار می دهد. وجود فاز سیگما یکی از دلایل شکست خزشی ترد در جوش های آستنیتی است. هنگامی که فلز جوش از دمای 1800 درجه فارنهایت (980 درجه سانتیگراد) تا 1000 درجه فارنهایت (535 درجه سانتی گراد) سرد می شود، نرخ سرمایش باید نسبتا سریع باشد تا از تشکیل فاز سیگما جلوگیری شود. جلوگیری از طولانی شدن زمان سرمایش در این محدوده دمایی معمولا به ایجاد فلز جوش با مقدار کم فاز سیگما ختم می شود که مشکلی ایجاد نمی کند. همانند شرایطی که در حساس شدن وجود دارد، رسوب فاز های بین فلزی می تواند توسط آنیل حل سازی خنثی شود. در نوع جدیدتر فولادهای زنگ نزن آستنیتی که سوپر آستنیتی نام دارند، آلیاژسازی با نیتروژن تشکیل فاز سیگما را به تاخیر می اندازد و تولید ورق های ضخیم تر را ممکن می کند.

رفتارهای پسیو و اکتیو فولاد زنگ نزن

در بسیاری از محیط های طبیعی فولادهای زنگ نزن در حالت پسیو باقی می ماند. هنگامی که این فولاد در شرایطی قرار گیرد که لایه پسیو از بین رود، وارد حالت اکتیو می شود. تغییر حالت به اکتیو زمانی رخ می دهد که غلظت کلرید بالا باشد مانند شرایطی که در آب دریا، محلول های کاهنده و کمبود اکسیژن وجود دارد. شرایط کمبود اکسیژن زمانی ایجاد می شود که دسترسی به اکسیژن آزاد وجود نداشته باشد مانند شرایطی که در شکاف های زیر رسوبات وجود دارد.

مقاومت به خوردگی فولاد زنگ نزن به مواد شیمیایی

آلیاژهای زنگ نزن مقاومت بسیار خوبی در برابر اسید نیتریک در تمام غلظت و دما ها از خود نشان می دهند .تیپ 304 به طور گسترده در کارخانه های اسید نیتریک مورد استفاده قرار می گیرد. برای جابجایی اسید سولفوریک بدون استفاده از ممانعت کننده ها به طور محدود از فولاد زنگ نزن 316 استفاده می شود.

خوردگی فولادهای زنگ نزن در آب دریا

درحالی که تیپ 304 به خوبی در آب های شیرین مورد استفاده قرار می گیرد، تیپ 316 در آب های شور مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از تیپ 316 در آب های شور نتایج متفاوتی را داشته است. در شرایطی که لوله های کنداسور با آب دریا خنک می شوند، استفاده از این ماده به شرطی مناسب است که لوله ها به شکل منظم حین کار تمیز شوند. اگر چه عناصر آلیاژی تیپ 316 در برابر آب دریای راکد به شدت به حفره دار شدن و خوردگی شیاری حساس هستند. که این پدیده به دلیل از بین رفتن لایه پسیو با یون های کلراید در آب های راکد یا کند ایجاد می شود.

مقاومت فولاد زنگ نزن به انواع مختلف خوردگی

به طور کلی، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون فولادهای زنگ نزن با افزایش کروم، افزایش می یابد و این مواد در طیف گسترده ای از محیط های خورنده در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می گیرند. این مواد به خوردگی یکنواخت، سایش و خوردگی سایشی و pH محلول بالا مقاوم هستند. اگرچه در شرایط ویژه ای فولادهای زنگ نزن در معرض خوردگی های موضعی قرار می گیرند.

خوردگی گالوانیک فولاد زنگ نزن

هنگامی که فولاد زنگ نزن در تماس با یک فلز نجیب تر قرار داشته باشد باید خوردگی گالوانیک را مد نظر داشت. اگر فولاد زنگ نزن در محیط پسیو باشد، خوردگی گالوانیکی روی نمی دهد. مهمترین عامل جلوگیری از خوردگی گالوانیک فولاد زنگ نزن انتخاب قطعات جوش شده و بست ها برای مقاومت به خوردگی کافی در ماده و یا مناطق بزرگ تر در معرض خوردگی است.

خوردگی موضعی فولاد زنگ نزن

تحت شرایط خاص، فولاد زنگ نزن نسبت به خوردگی موضعی بسیار حساس است. برای فولادهای زنگ نزن، تقریبا 60 درصد تخریب تجهیزات در صنایع شیمیایی به علت حفره دار شدن، خوردگی شیاری و خوردگی تنشی است. یکی از دلایل دیگر تخریب این مواد هم خوردگی بین دانه ای است. پارامترها و عوامل محیطی مانندpH ، دما و مقادیر کلر و اکسیژن به شدت بر عملکرد آلیاژ موثرند. انواع مختلف خوردگی های موضعی فولاد زنگ نزن در ادامه بررسی شده اند.

حفره دار شدن فولاد زنگ نزن

مقاومت به خوردگی فولاد های زنگ نزن به پایداری و حفظ یکنواختی لایه پسیو روی سطح در معرض خوردگی وابسته است. پایداری لایه پسیو برای مقاومت در برابر حفره دار شدن توسط درصد کروم و مولیبدن در فولاد زنگ نزن مشخص می شود. عنصر دیگری که مقاومت در برابر حفره دار شدن را افزایش می دهد، نیتروژن است. افزودن نیتروژن نسبت به مولیبدن ارزان تر است.

شکست لایه پسیو به دلیل وجود نقص در این لایه، آسیب های مکانیکی، عدم یکنواختی در سطح فلز مانند ناخالصی ها، پوسته های سطحی، رسوبات، فاز ثانویه و حضور یون های کلرید در محیط رخ می دهد. معمولا درصد بالای یون های کلرید لایه پسیو را از بین می برد. شدت حمله به درصد کلر، اسیدیته، pH و حضور اکسیژن یا سایر اکسید کننده ها بستگی دارد.

فاکتورهای مرتبط با جوشکاری، مانند ناخالصی ها، فازهای ثانویه، اختلاف ترکیب در یک فاز، حساس شدن، قوس اتفاقی، قطره جوش، غیر یکنواختی ترکیب موضعی در فلز به عنوان محل های مستعد برای آغاز حفره دار شدن مطرح هستند. در ریز ساختار ناخالصی های MnS محل های مهم برای آغاز حفره دار شدن هستند. فریت دلتا و فاز سیگما نیز حفره دار شدن را تقویت می کند.

- عدد مقاومت به حفره دار شدن

مقاومت به حفره دار شدن با افزایش درصد کروم افزایش می یابد، اما افزودن مولیبدن به فولاد زنگ نزن مانند نوع 316 (Cr, 12% Ni, 2.5% Mo ٪18) اثر بیشتری دارد. افزودن نیتروژن هم در افزایش مقاومت به حفره دار شدن موثر است و به همین دلیل جمع آثار کروم، نیتروژن و مولیبدن به عنوان معیاری برای سنجش مقاومت در برابر حفره دار شدن فولاد زنگ نزن مورد استفاده قرار می گیرد. نام این معیار عدد شاخص حفره دار شدن یا عدد معادل مقاومت به حفره دار شدن (PRE_N) است. شاخص حفره دار شدن عبارت است از:

$$\%Cr\% + 3.3Mo\% + 16N = PRE_N$$

رده بندی فلزات مختلف بر اساس مقاومت به خوردگی در جدول زیر آورده شده است.

عدد مقاومت به حفره دار شدن برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی					
	مقادیر مورد نیاز برای محاسبه PRE_N				
PRE_N	N	Mo	Cr	نامگذاری UNS	آلیاژ
18.0	-	0.0	18	S30400/S30403	L304/304
23.4	-	2.1	16.5	S30600/S30603	L316/316
29.7	0.06	3.1	18.5	S30700	317
47.9	0.23	6.3	20.5		AL-6XN

- دمای بحرانی حفره دار شدن

علاوه بر شرایط سطح و حضور رسوبات و یون های کلر، حفره دار شدن معمولا تحت تاثیر دما محیط هم هست. برای یک گرید فولاد زنگ نزن دمای خاصی وجود دارد که در آن حفره دار شدن آغاز می شود و به آن دمای بحرانی حفره دار شدن یا CPT می گویند. بنابراین باید گریدی را انتخاب کرد که در دمای کاری در معرض حفره دار شدن قرار نگیرد. دمای CPT می تواند برای بررسی نسبی عملکرد آلیاژ های مختلف به کار گرفته شود. مقادیر CPT توسط ASTM 48A در فریک کلراید (10٪ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$) و در مخلوط اسیدی کلریدها و سولفات ها (4٪ NaCl + 1٪ $Fe_2(SO_4)_3$ + 0.01 M HCl) مشخص می شود. تست های آزمایشگاهی برای بررسی رفتار حفره دار شدن بر اساس تست های الکتروشیمایی صورت می گیرد.

مقاومت در برابر حفره دار شدن به وسیله فولادهای زنگ نزن آستنیتی با درصد بالاتر کروم و مولیبدن مانند تیپ های 304، 316 و 317 بدست می آید. از طرف دیگر، می توان از مواد جایگزین مانند آلیاژهای پایه نیکل (مانند اینکونل 625، هاستلوی و G-3) یا فولادهای خاص مانند 317 LM، 700 Jessop و آلیاژ Al-6x ، تیتانیم، مس – نیکل و آلیاژهای نیکل – مس استفاده کرد.

خوردگی شیاری فولاد زنگ نزن

شیارها که در شرایط اتصال فلز به فلز، گسکت و رسوبات خوردگی به وجود می آیند، دسترسی به اکسیژن را محدود می کنند و منجر به خوردگی شیاری می شوند. برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی، فاکتورهای زیادی سبب آغاز خوردگی شیاری و رشد آن می شوند که عبارتند از:

1- فاکتور های هندسی: نوع شیار (فلز به فلز، فلز به غیر فلز)، عرض و عمق شیار، نسبت مساحت سطحی خارجی به داخلی.

2- فاکتور های محیطی: درصد اکسیژن، pH، درصد کلرید، دما، تلاطم، نفوذ و همرفت، محلول شیار و عوامل بیولوژیکی.

3- عوامل الکتروشیمیایی: محلول فلزی، کاهش اکسیژن، ایجاد هیدروژن.

4- فاکتور های متالورژیکی: ناخالصی های ترکیب آلیاژ، ویژگی های لایه پسیو.

برای کاهش اثر خوردگی شیاری باید تا حد امکان از ایجاد شیارها جلوگیری کرد، این مشکل را می توان با حفظ یکنواخت سرعت جریان در مبدل حرارتی و استفاده از گریدهای فولاد با کرم و مولیبدن بالاتر که در برابر خوردگی شیاری مقاوم تر هستند، بهبود داد. فولادهای زنگ نزن آستنیتی با مقادیر بیشتر مولیبدن مانند 316L، 904L و 254 SMO، گریدهای فریتی ماند 18Cr-2Mo و فولادهای دوپلکس مانند 2205 مقاومت زیادی در برابر خوردگی شیاری نشان می دهند.

- دمای بحرانی خوردگی شیاری

برای یک گرید مشخص فولاد زنگ نزن، خوردگی شیاری تحت تاثیر دمای محیط نیز هست. بالای دمای بحرانی، خوردگی شیاری آغاز می شود و در دمای پایین تر از دمای بحرانی خوردگی شیاری آغاز نمی شود. بنابراین انتخاب گرید فولادی که در معرض خوردگی شیاری قرار نگیرد، امکان پذیر است به شرطی که دمای محیط شیمیایی از مقادیر بحرانی تجاوز نکند. مقادیر CCCT یا دمای بحرانی خوردگی شیاری از طریق استاندارد ASTM G-48B در کلرید فریک (محلول 6 درصد FeCl3 برای شیارهای 72 ساعته) به دست می آید.

مقایسه خوردگی شیاری و حفره دار شدن در فولاد زنگ نزن

مکانیزم گسترش حفره و خوردگی شیاری مشابه هستند اگرچه مکانیزم آغاز آن ها متفاوت است. خوردگی شیاری برای آغاز به شرایط خورنده شدید نیاز ندارد. فولادی که به حفره دار شدن در یک محلول خاص مقاوم است ممکن است در همان محلول دچار خوردگی شیاری شود. با کنترل معیار های متالورژیکی موثر بر بهبود مقاومت به حفره دار شدن می توان مقاومت به خوردگی شیاری را نیز بهبود داد. اگر از حضور سولفیدهای منگنز جلوگیری شود مقاومت به حفره دار شدن و خوردگی شیاری نیز بهبود می یابد .

سه راه ممکن برای کاهش ناخالصی سولفید منگنز:

1) کاهش درصد منگنز به مقدار کمتر از حد حلالیت MnS

2) کاهش درصد گوگرد به پایین تر از حد حلالیت MnS

3) افزودن عناصر آلیاژی مانند تیتانیم و زیرکونیم که سولفیدهای قوی تر و سودمند تری را ایجاد می کنند.

خوردگی تنشی فولاد زنگ نزن

فولاد های زنگ نزن آستنیتی در معرض خوردگی تنشی قرار دارند. پاره ای از شرایط محیطی در خوردگی تنشی موثرند اما می توان آن ها به دو دسته بر اساس گسترش ترک دانه ای و مرز دانه ای تقسیم بندی کرد. خوردگی

تنشی مرزدانه ای در محیط های با یون کلرید و یون های هیدروکسیل ایجاد می شود. ترک های دانـه ای در محـیط های آبی رخ می دهد اما به ایجاد نواحی حساس وابسته است.

مهم ترین محیط هایی که منجر به ایجاد خوردگی تنشی در فولادهای زنگ نزن می شود، عبارت است از:

1- محلول های کلریدی

2- محلول های سود سوزآور

3- اسید پلی تیونیک

تنش هایی که در مقادیر کمتر آن ها خوردگی تنشی رخ نمی دهد به خوبی مشخص شده اند اما باید مقـدار آن کـم تر در نظر گرفته شود زیرا تنش های باقی مانده جوش اغلب بسیار بالا هستند.

- خوردگی تنشی کلرید در فولادهای زنگ نزن

معمولا خوردگی تنشی کلرید در فولاد زنگ نزن آستنیتی به صورت مرزدانه ای و منشعب شده اسـت. فاکتورهـایی که سرعت و شدت ترک را تحت تاثیر قرار می دهند، مقدار کلراید، مقدار اکسیژن، دما، مقدار تـنش و pH محلـول های آبی هستند. به طور کلی، برای این که خوردگی تنشی کلریدی در فولادهای زنگ نزن رخ دهد غلظت کلریـد باید 30 ppm یا بیشتر باشد و اگر این غلظت در حدود 20 ppm باشد معمولا شـرایط خورنـده نیسـت. اگـر چـه در حالتی که مقدار اندکی کلرید وجود دارد، ممکن است تمرکز غلظت به صورت موضعی رخ داده و منجر بـه ایجـاد ترک شود. با طراحی مناسب به عنوان مثال طراحی یک دریچه برای ایجاد جریان می توان از ایجاد مناطق با غلظـت بالای کلرید جلوگیری کرد. بیشتر تخریب های ناشی از خـوردگی تنشـی بـالای 170 درجـه فارنهایـت (75 درجـه سانتی گراد) و 120 درجه فارنهایت (50 درجه سانتی گراد) معمولا به عنوان حد آسـتانه بـرای خـوردگی تنشـی بـه کار می رود.

-خوردگی تنشی سود سوز آور

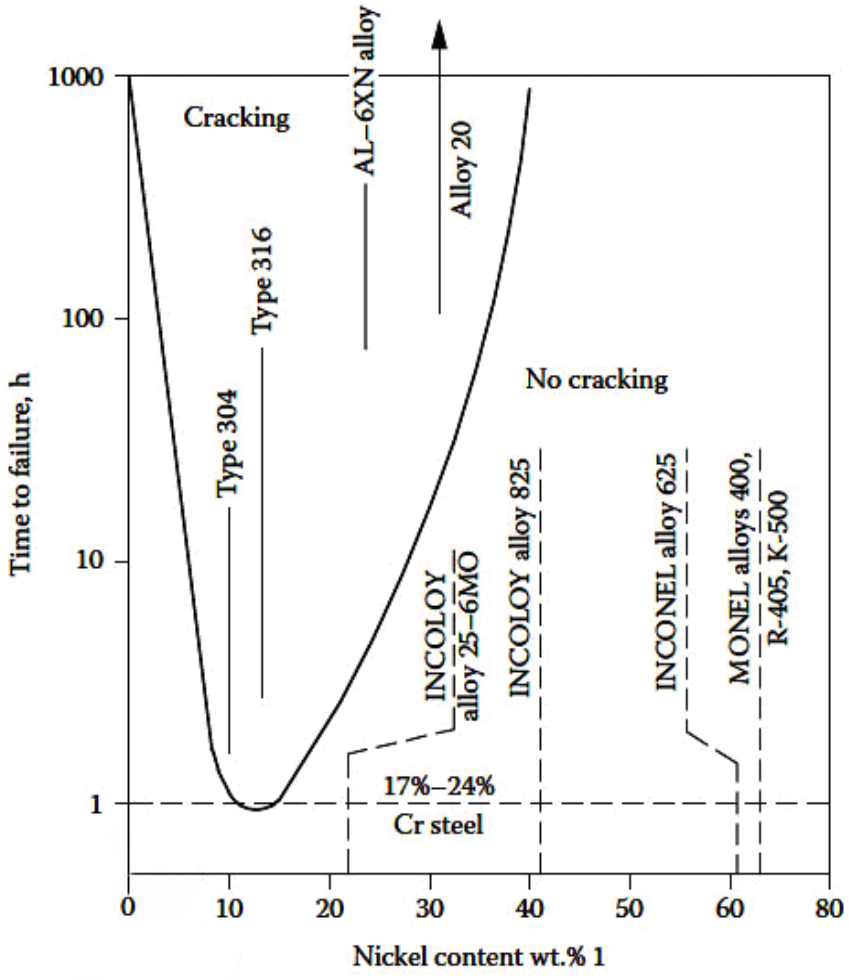
خوردگی تنشی سود سوزآور در فولادهای زنگ نزن در دماهای بالاتر از 120 درجه سانتی گراد رخ مـی دهـد. در دماهای بالاتر، از انواع جدیدتر فولادهای زنـگ نـزن فریتـی، نیکـل و آلیاژهـایی بـا درصـد بـالای نیکـل بـه عنـوان جایگزین برای فولاد زنگ نزن آستنیتی در اواپوراتور سوزآور استفاده می شود.

- اثر درصد نیکل بر خوردگی تنشی

اثر درصد نیکل بر خوردگی تنشی فولاد زنگ نزن آستنیتی با استفاده از منحنی کاپسون مورد بررسی قرار می گیـرد که در نمودار مقابل نمایش داده شده اسـت. شـکل مقابـل نشـان مـی دهـد مـاکزیمم گـرایش فـولاد زنـگ نـزن بـه خوردگی تنشی با درصد نیکل در محدوده 8 تا 12 درصد ایجاد می شود که در فولادهای آستنیتی استاندارد 302، 304 و 316 دیده می شود.

کاهش نیکل از این مقدار منجر به بهبود رفتار خوردگی تنشی می شود، اما این تغییر با جایگزینی آسـتنیت بـا فریـت دلتا در ریزساختار همراه می شود. با افزایش درصد نیکل، مقاومت به خوردگی تنشی تا 45-42 درصد نیکل بهبـود می یابد، تا جایی که عملا آلیاژ در برابر خوردگی تنشی ایمن می شود. کـه ایـن شـرایط در آلیـاژ 825، آلیـاژ G و

آلیاژ 625 دیده می شود. بنابراین، می توان گفت که آلیاژهایی با درصد نیکل بیش از 22 درصد به ندرت دچار خوردگی تنشی می شوند و این شامل آلیاژهای 904، آلیاژ 28 و آلیاژ 20 می شود. این مواد در بسیاری از کاربردهای صنعتی که با یون های کلرید سر و کار دارند مورد استفاده قرار می گیرند.



- خوردگی تنشی فولادهای زنگ نزن آستنیتی جوشکاری شده

سطح فولادهای زنگ نزن آستنیتی درگیر تنش های کششی است که در هنگام ساخت یا در اثر اعمال تنش خارجی به وجود آمده اند و می توانند در محلول های کلریدی منجر به شکست مرزدانه ای شوند. اتصالات جوشکاری شده به دلایل زیر مستعد خوردگی تنشی هستند:

1- فرآیند جوشکاری، تنش کششی باقی مانده ای را در منطقه جوش باقی می گذارد مگر اینکه عملیات تنش زدایی موثری پس از جوشکاری انجام گیرد.

2- معمولا تمرکز تنش وجود دارد

3- سیکل های حرارتی ممکن است ریز ساختار حساس شده ایجاد کند.

عملیات حرارتی تنش زدایی می تواند یک راه حل جایگزین برای جلوگیری از خوردگی تنشی باشد. در این رابطه عملیات حرارتی حل سازی کامل در دمای 1050 درجه سانتی گراد ممکن است مورد نیاز نباشد اما آنیل پایدار

سازی در دمای 870 تا 950 درجه سانتی گراد معمولا برای قطعات جوشکاری شده که در صنعت پتروشیمی به کار می روند برای جلوگیری از خوردگی اسید پلی تیونیک مورد استفاده قرار می گیرد.

- خوردگی تنشی اسید پلی تیونیک (PASCC)

خوردگی بین دانه ای معمولا بر اثر برخورد اسید پلی تیونیک و مواد حساس شده ایجاد می شود و چنین شرایطی می تواند در برخی از تجهیزات پالایشگاه به خصوص در هنگامی خاموشی وجود داشته باشد. خوردگی PASCC به حضور ماده حساس شده، اکسیژن، آب، تنش کششی و پوسته های سولفید آهن نیاز دارد. اسید پلی تیونیک می تواند به سرعت در زمان خاموشی در اثر اندرکنش سولفید با رطوبت و اکسیژن تشکیل شود. گریدهای معمولی فولاد زنگ نزن مانند تیپ 304 و 316 و آلیاژ اینکولوی 800 می توانند در حین جوشکاری حساس شوند. پوسته های سولفیدی در حین کار و اکسیژن و آب نیز هنگام خاموشی به این سیستم اضافه می شوند. راه حل هایی که برای کنترل خوردگی PASCC شامل موارد زیر می شود:

- پاکسازی نیتروژنی اجزا یا تجهیزاتی که در معرض اتمسفر قرار دارند.

- خنثی کردن اسید با شستشوی آمونیاک یا سود.

- استفاده از مواد پایدار شده برای ساخت مبدل های حرارتی. گزارش شده که حتی فولادهای زنگ نزن پایدار شده مانند 321 و 347 هم در معرض خوردگی PASCC قرار می گیرند مگر آنکه به شکل مناسب تحت عملیات حرارتی قرار گیرند.

- روش های مناسب برای غلبه بر این شکل خوردگی به خوبی در NACE RP-01-70 مطرح شده اند.

تست های آزمایشگاهی برای تعیین خوردگی تنشی فولاد زنگ نزن

حساسیت آلیاژ ها به خوردگی تنشی کلریدی با انجام تست آزمایشگاهی بر اساس ASTM 636 یا با مرتبط کردن نرخ گسترش ترک به شدت تنش در نوک ترک و خوردگی اسید پلی تیونیک در آزمایش خوردگی بر اساس ASTM G 35انجام می گیرد.

- ارزیابی حساس شدن فولاد زنگ نزن آستنیتی به PASCC:

روش فعال کردن مجدد الکتروشیمیایی پتانسیوسینتیک می تواند در حین بازرسی برای ارزیابی درجه حساس شدن فولاد زنگ نزن آستنیتی در آب دما بالا مورد استفاده قرار گیرد.

روش های جلوگیری از خوردگی تنشی فولادهای زنگ نزن

از روش های معمولی برای غلبه بر خوردگی تنشی فولادهای زنگ نزن می توان به موارد زیر اشاره کرد:

1- استفاده از مواد جایگزین که مقاومت بیشتری در برابر خوردگی تنشی کلریدی دارند. از نمونه های رایج آن می توان به تیپ 430 فریتی جدید، سوپر فریتی مانند E-Brite، Sea-Cure و غیره، فولاد دوپلکس زنگ نزن، تیتانیم و

آلیاژهای آستنیتی با مقدار بالاتر نیکل اشاره کرد .فولادهای فریتی نسبت به خوردگی تنشی یا SCC ایمن بوده یا کمتر در معرض حمله خوردگی تنشی قرار می گیرند. می توان از تیپ های 304 و L316 که در معرض خوردگی تنشی قرار می گیرند نیز استفاده کرد به شرطی که احتیاط لازم انجام گرفته و یکی یا چند عامل ایجاد خوردگی تنشی که اغلب تنش باقی مانده، محیط کلریدی یا دما هستند، حذف شود.

2- استفاده از روش safe ending : در مبدل های حرارتی عمودی با استفاده از فرآیندی به نام safe ending بر خوردگی تنشی غلبه می شود. این فرآیند شامل استفاده از جوش سر به سر قطعات کوتاهی از مواد مقاوم به فولاد زنگ نزن آستنیتی در مناطقی است که در معرض خوردگی تنشی قرار دارند.

3- اگر فضای مرده ای وجود داشته باشد (چاه هوایی) که در آن کلریدها در اثر تر و خشک شدن مداوم تجمع کنند آنگاه لوله در معرض خوردگی تنشی قرار خواهد گرفت. این مشکل می تواند با تهویه هوا در منطقه مرده یا فلود کردن تمام سطح لوله برطرف شود.

4- لوله های بی متالیک

جلوگیری از خوردگی تنشی در راکتورهای آب جوش

خوردگی تنشی بین دانه ای یا (IGSCC) در مناطق نزدیک جوش های حلقوی در سیستم های لوله کشی زنگ نزن یک مشکل جدی در راکتور های آب جوش (BWR) است. راه حل های برای برطرف کردن مشکل راکتورهای آب جوش برای محافظت در برابر مایع درونی و ملحقات به شکل زیر است:

1- راه حل های مرتبط با مواد: هدف راه حل های مرتبط با مواد عبارت است از جلوگیری از تماس میان ماده حساس شده و مایع سرد کننده راکتور آب جوش شامل:

- استفاده از فولادهای زنگ نزن گرید هسته ای یا NG که مقدار کربن و نیتروژن آن ها کنترل شده است و در حین جوشکاری حساس نمی شود.

- عملیات حرارتی حل سازی (SHT). به گونه ای که SHT پس از عملیات جوشکاری، کاربیدهای مرزدانه و غلظت کروم در مرز دانه را به حالت عادی باز گرداند.

- استفاده از روکش های مقاوم به خوردگی. مشاهدات فرکتوگرافی برای بررسی مقاومت IGSCC فلزات جوش دوپلکس، پایه ای برای استفاده از روکش های مقاوم به خوردگی را ایجاد کرده اند که در این حالت سطح داخلی لوله در مجاورت جوش حلقوی با فلز جوش روکش شود.

2- راه حل های مرتبط با تنش:

هدف این کار جلوگیری از IGSCC با قرار دادن ماده حساس شده سطح داخلی منطقه HAZ در معرض تنش های فشاری بزرگ است.

3- استفاده از جوشکاری گرماگیر (heat-sink)

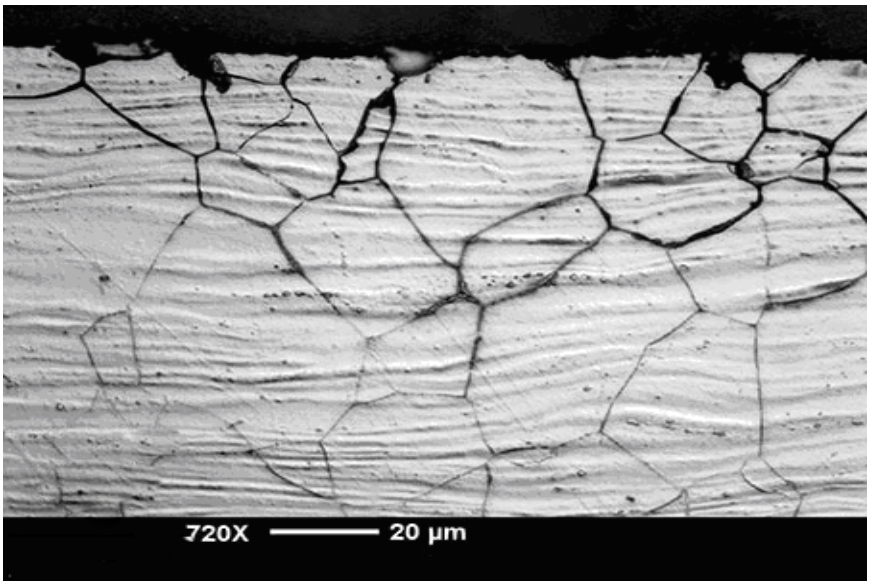
4- استفاده از فرآیند هایی که تنش حرارتی و تنش مکانیکی را بهبود می دهند.

5- کنترل محیط

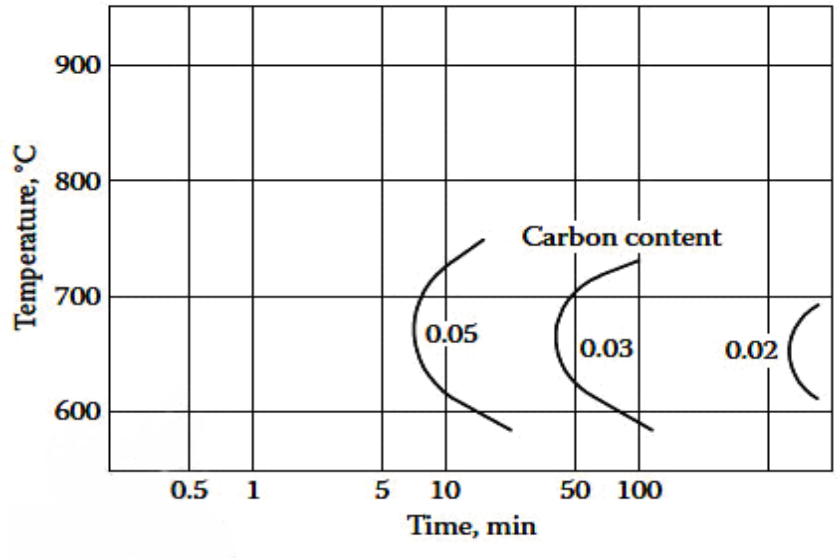
راه حلی به نام کنترل شیمیایی هیدروژن آب (HWC) نیز استفاده می شود که شامل کاهش پتانسیل الکتروشیمیایی فولاد زنگ نزن در سیستم گردش آب راکتور آب جوش به مقادیر زیر 230- میلی ولت نسبت به الکترود استاندارد هیدروژن با استفاده از تزریق هیدروژن به آب ورودی است. به همین دلیل هم به این روش شیمی هیدروژن آب یا hydrogen water chemistry می گویند.

خوردگی بین دانه ای فولاد زنگ نزن

حساس شدن فولادهای زنگ نزن با درصد کربن بیش از 0.05 درصد در بازه دمایی 500 تا 900 درجه سانتی گراد هنگامی که در معرض دمای بالا مانند جوشکاری (خوردگی جوش)، عملیات حرارتی یا لحیم کاری قرار می گیرند، رخ می دهد.



شدت حساس شدن به متغیر های فرآیند جوشکاری و ضخامت ورق بستگی دارد زیرا این پارامترها زمان و محدوده دمای بحرانی را مشخص می کنند. محدوده دمای حساس شدن به صورت شماتیک در شکل زیر نشان داده شده که در آن منحنی ها زمان لازم برای رسوب کاربید ها را در فولاد هایی با درصد کربن متفاوت، مشخص می کنند.



فاکتورهای موثر بر خوردگی جوش

فاکتورهای اصلی برای تعیین حساسیت فولاد زنگ نزن آستنیتی به شکل زیر هستند:

1- ترکیب و ریزساختار فلز: مهم ترین فاکتور ترکیبی که حساسیت به خوردگی را تعیین می کند، درصد کربن است. افزایش درصد کربن اثر مخربی دارد، حضور فریت برای مقاومت به خوردگی جوش مفید بوده اما اندازه دانه بزرگ مخرب است.

2- تاریخچه حرارتی: حساسیت معمولا به ماکزیمم زمانی که فولاد در بازه دمایی 550 تا 850 سانتی گراد می گذراند، بستگی دارد.

3- تنش های داخلی یا خارجی که در اثر تغییر شکل های گذشته، جوشکاری یا بارهای کاری ایجاد شده اند.

4- محیط: فولاد زنگ نزن حساس شده، هنگامی که در معرض محیط خورنده قرار گیرد دچار خوردگی فرا دانه ای می شود. تمام محیط ها منجر به خوردگی جوش نمی شوند. خوردگی جوش تنها در 3 نوع محیط موجب تخریب می شود:

- محیط های اکسید کننده ضعیف
- محیط هایی با اکسید کنندگی متوسط
- محیط های به شدت اکسید کننده

ریسک خوردگی جوش در محیط هایی با خورندگی متوسط بالاست.

روش های غلبه بر خوردگی جوش در فولاد زنگ نزن

از روش های مناسب برای غلبه بر خوردگی جوش در فولاد زنگ نزن می توان به موارد زیر اشاره کرد:

1- برای دست یابی به مقاومت به خوردگی به خصوص در ورق های ضخیم، باید روی قطعات جوش شده عملیات حرارتی و کوئنچینگ انجام داد.

2- برای حل مشکل حساس شدن در مبدل های حرارتی با دمای پایین باید از فولادهایی با درصد کربن بسیار کم یا فولادهای پایدار شده مانند تیپ 321 (که با Ti پایدار شده) و تیپ 347 (پایدار شده با نیوبیوم) استفاده کرد. تیتانیم و نیوبیوم تمایل بیشتری برای تشکیل کاربید نسبت به کروم دارند و بنابراین از رسوب 6C23Cr جلوگیری می کنند.

مقادیر افزودن این عناصر به فولادهای زنگ نزن بیش از مقادیر استوکیومتری است و معمولا مقادیر مورد نیاز تیتانیم و نیتروژن به صورت زیر محاسبه می شوند:

٪(Nb = 8(C + N و ٪(Ti = 5(C + N

هنگامی که فولاد برای مدت زمان طولانی در محدوده دمایی 425 تا 800 درجه سانتی گراد قرار می گیرد باید از فولادهای پایدار شده استفاده کرد.

3 - کاهش حرارت ورودی (کمتر از 3 کیلوژول بر میلی متر) و حفظ دمای بین پاس ها در حدود 175 درجه سانتی گراد است.

4 - فیلر ها و الکترود ها نیز باید برای فولادهای با کربن ناچیز پایدار شده باشند.

5 - افزایش مقدار نیکل و کروم فیلر برای جبران کاهش آرک.

باید توجه داشت که فیلر هایی که با تیتانیم پایدار شده اند را نباید در جوشکاری قوس آرگون به کار برد، زیرا تیتانیم در این شرایط تبخیر شده و اثر خود را به عنوان یک پایدار دهنده کاهش می دهد.

اگرچه مشکل خوردگی بین دانه ای با استفاده از گریدهای کم کربن یا گرید های پایدار شده برطرف می شود اما این فولادها مشکلاتی نیز دارند:

1- فولادهایی با درصد کربن کم استحکام کمتری نسبت به گریدهای پایدار شده دارند.

2- گریدهای پایدار شده نسبت به ترک گرم حساس بوده و نسبت به گریدهای پایدار نشده بـه کنتـرل بیشـتر فریـت نیاز دارند.

3- گریدهای پایدار شده نسبت به رسوب محلی کاربیدها در منطقه باریکی از HAZ منجر به خوردگی میان دانه ای می شود، حساس هستند. این نوع خوردگی به خوردگی شیار چاقو معروف است.

خوردگی شیار چاقو

در حین جوشکاری فولادهای پایدار شده تیپ 321 و 347، ناحیـه HAZ تـا دمـایی بـالاتر از 1150 درجـه سـانتی گراد گرم می شود و این دما می تواند منجر به حل شدن جزئی TiC و NbC شـود. در ایـن حالـت کـربن در ناحیـه باریکی در مجاورت جوش وارد ساختار شده و می تواند در دمای حساس شدن به کاربیـد کـروم تبـدیل شـود. ایـن ناحیه حساس تنها به اندازه چند دانه ضخامت دارد و می تواند یک ناحیه در معرض خـوردگی بـین دانـه ای تشـکیل دهد و در نتیجه به آن خوردگی شیار چاقو گفته می شود. فولادهایی که با نیوبیوم پایدار شده اند نسبت به فولادهـای پایدار شده با تیتانیم از مقاومت بیشتری به خوردگی شیار چاقو برخوردارند.

در هر دو نوع، عملیات حرارتی حل سازی در دمای بالاو کوئنچ کردن نمی تواند به طور کافی خواص اصلی را بـاز گرداند. خوردگی شیار چاقو یا خوردگی جوش در موارد زیر تفاوت دارد:

1- خوردگی شیار چاقو در یک منطقه باریک نزدیک محل جوشکاری در فلز ایجاد می شود اما خـوردگی جـوش در فاصله قابل ملاحظه ای نسبت به جوش ایجاد می شود.

2- خوردگی شیار چاقو در فولادهای پایدار شده رخ می هد.

3- سابقه حرارتی فلز نیز متفاوت است.

می توان از خوردگی شیار چاقو با استفاده از انتخاب مناسب پارامتر های جوشـکاری و اسـتفاده از عملیـات حرارتـی پایدار کردن اجتناب کرد. بنابراین معمولا از فولادهای کم کربن به جای گرید های پایدار شده استفاده می شود.

پیش بینی خوردگی بین دانه ای با استفاده از تست های آزمایشگاهی

دو تست آزمایشگاهی برای پیش بینی خوردگی میان دانه ای مورد استفاده قرار می گیرند. که در ادامـه مطـرح شـده اند.

1- تست مستقیم: تست مستقیم رضایت بخش ترین راه برای ارزیابی ریسک تخریب جـوش در یـک محـیط اسـت. روش تست ASTM که با قرار دادن ماده در معرض محیط خورنده، حساسیت آن را در یک محیط خورنده نمـایش می دهد در جدول زیر آمده است.

تست استاندارد ASTM برای حساسیت به خوردگی بین دانه ای در فولادهای زنگ نزن

روش تست ASTM	توصیف
A262، روش های A ، B، C، E، F	روش استاندارد برای شناسایی حساسیت به خوردگی بین دانه ای در فولاد زنگ نزن آستنیتی
G28، روش های A ، B	روش استانداردبرای شناسایی حساسیت به خوردگی در آلیاژهای ریختگی، پر نیکل و کروم دار
A763Tروش های W ، X، Y، Z	روش استاندارد برای شناسایی حساسیت به خوردگی بین دانه ای فولاد زنگ نزن فریتی

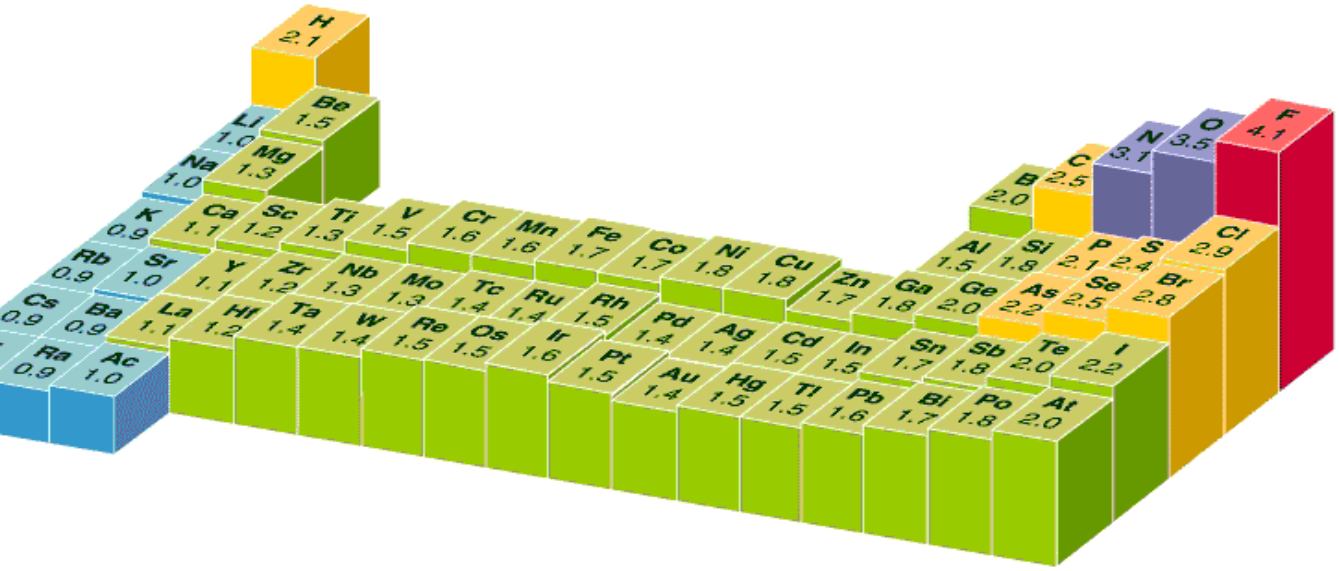
2- روش تست پتانسیومتری: در این تکنیک یک نمونه جوش پولیش شده را در معرض یک الکترولیت مناسب در پتانسیل ثابت قرار می دهند که می تواند در محدوده پسیو یا خوردگی قرار گیرد. روش پتانسیو استاتیک نسبت به روش های معمولی تست برتری هایی دارد که تعیین کمی ریسک تخریب جوش را ممکن کرده و داده هایی مربوط به بازه ای از شرایط کاری را به دست می دهد.

الکترونگاتیویته(Electronegativity)

میزان توانایی نسبی یک اتم در یک مولکول برای جذب جفت الکترون پیوندی به سوی خود است. مطابق این تعریف، می توان گفت که قطبی بودن مولکولHCl ، ناشی از اختلاف بین الکترونگاتیویته اتم های کلر و هیدروژن است. چون اتم Cl الکترونگاتیوتر از اتم H است، آن سر پیوند که به Cl منتهی می شود، حامل بار جزئی منفی، δ- و سر مربوط به اتم H حامل بار جزئی مثبت، δ+است. مفهوم الکترونگاتیویته گر چه مفید است ولی دقیق نیست. مقادیر الکترونگاتیویته نسبی اند و تنها در مقایسه های کیفی بین عناصر قابل استفاده اند. روشی ساده و مستقیم برای اندازه گیری الکترونگاتیوی وجود ندارد و روش های گوناگون برای اندازه گیری آن پیشنهاد شده است.

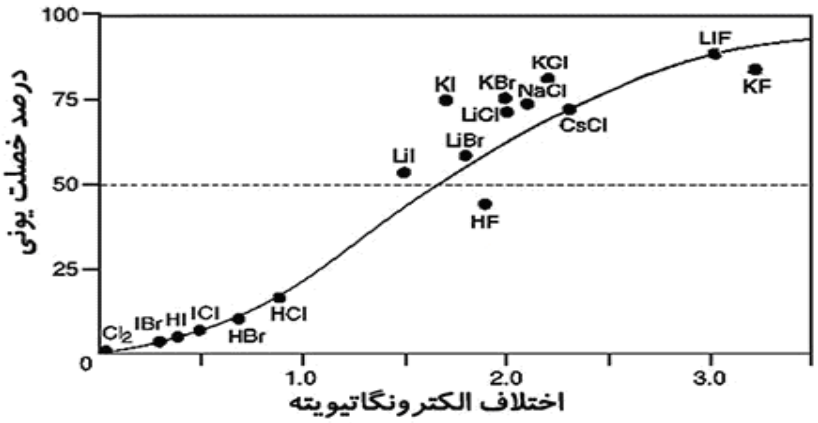
مقیاس نسبی الکترونگاتیویته پاولینگ، متداولترین مقیاس و مبتنی بر مقادیر تجربی انرژی های پیوندی است. پیوندی که بین دو اتم با الکترونگاتیویته های مختلف تشکیل می شود، پیوند قطبی است. یک پیوند کووالانسی قطبی، همواره قویتر از پیوند فرضی کووالانسی خالص بین دو اتم مشابه است. میزان اختلاف انرژی، عبارت از مقدار اضافی انرژی است که از جاذبه متقابل بارهای جزئی +δ و –δ، اضافه بر انرژی پیوند فرضی کووالانسی آزاد می شود. میزان انرژی اضافی، به قدر مطلق δ و بنابراین به تفاوت الکترونگاتیویته دو عنصر پیوند شده بستگی دارد. از آن جا که در این محاسبات تنها تفاوت الکترونگاتیوته عناصر تعیین می شود، برای بنا کردن یک مقیاس، به اتم F (الکترونگاتیوترین عنصر) به طور دلخواه عدد 4 نسبت داده شده است.

به طور کلی، الکترونگاتیویته عناصر هر دوره از چپ به راست (به موازات افزایش تعداد الکترون های والانس) و در هر گروه از پایین به بالا (همراه کاهش اندازه اتم) افزایش می یابد. بنابراین الکترونگاتیوترین عناصر، در گوشه بالای سمت راست جدول تناوبی (بدون در نظر گرفتن گازهای نجیب) و عناصری که کمترین الکترونگاتیویته را دارند در گوشه پایین سمت چپ جدول قرار دارند.



فلزات، جاذبه کمی برای الکترون های والانس دارند)الکترونگاتیویته آن ها کم است .(ولی غیر فلزات، به استثنای گازهای نجیب، جاذبه قوی برای این گونه الکترون ها دارند)الکترونگاتیویته آن ها زیاد است .(بنابراین، مقادیر الکترونگاتیویته را می توان برای تعیین میزان واکنش پذیری فلزات و غیرفلزات به کار برد .موقعیت عنصر در جدول تناوبی برای پیشگویی واکنش پذیری آن مفید است.

مقادیر الکترونگاتیوی را می توان برای پیش بینی خصلت پیوند های یک ترکیب به کار برد .هر چه اختلاف الکترونگاتیوی دو عنصر بیشتر باشد پیوند بین آن ها قطبی تر خواهد بود .هر گاه اختلاف الکترونگاتیویته دو عنصر در حدود 1.7باشد، خصلت یونی نسبی پیوند بیش از 50درصد است.



طبق این منحنی، اختلاف 3.2 واحد الکترونگاتیویته برای CsF، نشانه خصلت نسبی یونی 92٪ آن است. اختلاف 2.3 واحد برای NaCl، نشانه خصلت یونی نسبی 73٪ و اختلاف 2.1 واحد برای MgO نشان دهنده خصلت یونی نسبی 67٪ است. هر سه این ترکیبات اساسا یونی هستند.

معمولا اختلاف الکترونگاتیویته دو غیرفلز، زیاد نیست. در این موارد، در پیوند ها خصلت کووالانسی چیره است و اختلاف الکترونگاتیویته، میزان قطبی بودن پیوند را به دست می دهد. اگر اختلاف الکترونگاتیویته صفر یا خیلی کوچک باشد (مثلا در پیوند C-S)، پیوند کمابیش غیرقطبی در نظر گرفته می شود. هر چه اختلاف الکترونگاتیویته بیشتر باشد، پیوند کووالانسی قطبی تر خواهد بود. در این پیوند ها، اتمی که الکترونگاتیویته بیشتر دارد، بار منفی جزئی را خواهد داشت. با استفاده از مقادیر الکترونگاتیویته می توان پیشگویی کرد که بین هالیدهای هیدروژن، HF قطبی ترین ترکیب است و بالاترین انرژی پیوند را دارد. خصلت یونی نسبی پیوند H-Fدر حدود 45٪ است.

مفهوم الکترونگاتیویته غیر دقیق است زیرا این خاصیت نه تنها به ساختار اتم مورد بحث بستگی دارد، بلکه تعداد و ماهیت اتم های دیگری که به اتم مزبور پیوند شده اند نیز در آن دخالت دارد. بنابراین الکترونگاتیویته یک عنصر همیشه ثابت نیست. مثلا الکترونگاتیویته فسفر در ترکیب 3PCl با الکترونگاتیویته آن در ترکیب 5PF متفاوت است. به این ترتیب مقادیر الکترونگاتیویته، کمیت های تقریبی اند و نمی توان آن ها را مبنای محاسبات دقیق قرار داد.

ساخت فولادهای زنگ نزن آستنیتی (Austenitic Stainless Steel Fabrication)

این فولادها معمولا با فرآیندهایی مانند کشش، خمش، چرخش، پرس و غیره انجام می گیرد. فولادهای زنگ نزن آستنیتی از شکل پذیری خوبی برخوردار بوده اند و کار سرد زیادی تحمل می کنند، به سرعت کارسخت می شوند و با افزایش ضخامت به عملیات حرارتی پس از شکل دهی نیاز دارند .ماشین کاری فولادهای زنگ نزن دشوار است زیرا این فولادها زود کارسخت می شوند. برای انجام این کار به ماشین های صلب، خشن تراش و تندبر نیاز دارد. کار گرم ممکن است در محدوده 2012°F–1652°F یا 1100°C–900°C انجام شود، که به دلیل مشکل حساس شدن در برخی انواع آن است.

هنگامی که فولاد برای شکل دادن، گرم می شود، برای این کار از کوره های الکتریکی برای کاهش پوسته شده استفاده می شود. کوره های گازی یا نفتی نیز در صنعت تولید استفاده می شوند. استفاده از سوخت هایی با گوگرد کم برای کاهش آلودگی با گوگرد به کار می رود که ماده را ترد کرده و مقاومت به خوردگی را کاهش می دهد. انتخاب شعله نیز در این موارد مهم است، شعله اندک اکسیدی ترجیح داده می شود، زیرا شعله های احیایی می تواند کربن داخل ساختار فولاد را کاهش داده و منجر به افت مقاومت به خوردگی شوند و شعله های به شدت اکسیدی نیز منجر به پوسته شدن می شوند.

اسیدشویی:

موادی که تحت عملیات کارگرم قرار گرفته اند عمدتا به پوسته زدایی و اسید شویی نیاز دارند. اسیدشویی می تواند با یکی از اسیدهای مناسب، مانند هیدروکلریک، سولفوریک یا مخلوطی از آن ها به صورت گرم یا سرد انجام گیرد.

رویین شدن:

رویین شدن فولادهای زنگ نزن با فروبردن قطعات فولاد زنگ نزن در محلول HNO3 و ترکیب نمک های اکسید کننده انجام می شود. در این فرآیند آهن موجود در زمینه یا آلوده حل شده و مقاومت به خوردگی سطح بازیابی می شود .گریدهای آستنیتی و فریتی به مدت 20تا 30دقیقه در دمای 130 درجه فارنهایت 55)درجه سانتی گراد(، رویین می شوند و سپس در آب گرم شسته می شوند .برای بررسی مقدار آهن حذف شده باید آزمایشاتی روی قطعه فولادی انجام گیرد .

روش های مکانیکی برش:

تمام فولادهای زنگ نزن را می توان با اره های اصطکاکی به ضخامت بیشتر از $\frac{3}{8}$ اینچ یا 9.5میلی متر برید .در این فرآیند خارج کردن حرارت یک مسئله مهم است که منجر به تخریب سریع تیغه اره و سوختن ماده می شود . دیسک های ساینده با سرعت بالا می توانند برای بریدن لوله ها و میله ها برای ضخامت های دلخواه استفاده شوند . در این موارد باید خنک کننده استفاده شود و نیابد در ترکیب آن ها برپایه گوگرد باشد .هم چنین باید از دیسک هایی که به وسیله لاستیک به هم متصل شده اند نیز خودداری کرد.

روش های برش گاز:

یکی از بزرگترین مشکلاتی که در ساخت فولادهای زنگ نزن وجود دارد استفاده از برش گاز است .فولاد زنگ نزن را نمی توان با استفاده از فرآیندهای معمول اکسی استیلن برید زیرا در اثر حرارت لایه دیرگدازی از اکسید کروم ایجاد می شود .روش برش پودری در گذشته با تزریق پودر آهن به جریان اکسی استیلن انجام می گرفت . این روش نامطلوب است زیرا بخارهای زیادی ایجاد می کند و برش انجام شده معمولا کیفیت پایینی داشته و با پودر آهن نیز آلوده می شود، بنابراین لبه برش داده شده باید به مقدار قابل توجهی با ماشین کاری برداشته شود . روش جدید برش قوس پلاسما، این مشکل را برطرف کرده است.

جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی (Austenitic Stainless Steel Welding)

جوشکاری این فولادها از دو نظر اهمیت دارد :

1- حفظ از مقاومت به خوردگی

2- جلوگیری از ایجاد ترک

جوشپذیری خوب یکی از ویژگی های بارز فولادهای زنگ نزن است و این به دلیل کاربرد وسیع تر و تنوع بیشتر این مواد در ساخت مخازن تحت فشار، تانک های ذخیره، کارخانجات شیمیایی و کاربردهای خانگی است. جوش ها در فولادهای زنگ نزن آستنیتی معمولا ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و چقرمگی قابل قیاس با فلزات پایه را دارند. این فولادها نسبت به ترک سرد حساس نیستند. به دلیل ساختار پایدار نیازی به پیش گرمایش یا عملیات حرارتی پس از جوشکاری ندارند. معمولا هیچ محدودیتی برای حرارت دهی وجود ندارد و می توان از انرژی بالای آرک بدون ایجاد اثرات مخرب استفاده کرد.

چون این جوش ها آستنیتی هستند، غیر مغناطیسی بوده و در نتیجه وزش قوس (arc blow) در حین جوشکاری پیش نمی آید. فولادهای زنگ نزن آستنیتی در مقایسه با فولادهای کربنی، کم آلیاژ و سری 400 زنگ نزن نقطه ذوب پایین تر، مقاومت الکتریکی بیشتر، هدایت حرارتی کمتر (30٪–50٪) و ضریب انبساط حرارتی بیشتری (50٪) دارند. به همین دلایل حرارت ورودی کمتر (جریان کمتر) و تجمع حرارت تنها در یک منطقه کوچک در مجاورت جوش نیاز است. اگر چه فولادهای زنگ نزن به اندازه کافی انعطاف پذیر هستند تا مقدار قابل توجهی انقباض را تحمل کنند، جوش ها ممکن است زمانی که سرد می شوند، ترک بخورند.

روش های جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی

-جوشکاری قوس فلزی محافظت شده

جوشکاری SMAW، روشی سریع و رایج با کاربردهای فراوان در زمینه فولادهای زنگ نزن است، به خصوص برای اشکالی که نمی توان با روش های جوشکاری اتوماتیک آن ها را به هم متصل کرد. الکترود ها را بر اساس ترکیب آلیاژ و بر اساس پوشش انتخاب می کنند. پوشش الکترودها معمولا مواد با پایه آهک یا تیتانیا است که به نوع جوش و تجهیزات به کار رفته بستگی دارد. حمل و نقل و نگهداری الکترودها از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا پوشش الکترودها تمایل به جذب رطوبت دارند و حضور رطوبت در حین جوشکاری منجر به تخلخل می شود.

- جوشکاری GTAW

روش GTAW به راحتی انواع فولاد زنگ نزن را جوش داده و به طور گسترده برای اتصال لوله به لوله گیر و جوشکاری مبدل های حرارتی پوسته لوله به کار می رود. در این روش عمدتا فلز پر کننده به شکل دستی توسط جوشکار تزریق می شود، اما این روش به خصوص برای قطعات ضخیم آهسته است.

برای دستیابی به نرخ رسوب گذاری بالا، این فرآیند می تواند به صورت اتوماتیک انجام بگیرد و سیم پرکننده به روش مقاومتی گرم شود. به این فرآیند GTAW با سیم داغ گفته می شود و سرعت جوش را 100٪ افزایش می دهد. در نوع دیگری از GTAW از قوس پالسی استفاده می شود. در این فرآیند، قوس پالسی کنترل حوضچه مذاب را ممکن می کند تا به این وسیله نفوذ افزایش یافته و تخلخل کاهش یابد.

استفاده از لنز گاز در جوشکاری TIG فولاد زنگ نزن آستنیتی شدیدا توصیه می شود. لنز گاز قطعه ای از جنس مس و برنج با لایه هایی از توری های فولاد زنگ نزن است که جایگزین حلقه معمول در مشعل GTAW می شود. لنز گاز به توزیع یکنواخت گاز در اطراف قوس و حوضچه جوش کمک می کند و به سرمایش جوش نیز کمک می کند.

جوش هایی با نفوذ کامل به پشت بندی گازی (back purging) نیاز دارند که در این روش قسمت پشت جوش را گازهای خنثی می پوشانند. انجام می شود تا قسمت زیرین جوش از عناصر موجود در اتمسفر محافظت شوند.

در نهایت باید توجه داشت که مقدار کافی گاز پس از جوشکاری باقی بماند (جریان پس از جوشکاری). بهترین راه جوشکاری حفظ 1 ثانیه از جریان پس از جوشکاری به ازای هر 10 آمپر جریان جوشکاری است که در حین جوشکاری رخ می دهد.

- جوشکاری GMAW

به طور کلی GMAW چهار برابر سریعتر از GTAW است. بر اساس روش انتقال فلز، سه روش جوشکاری GMAW وجود دارد که عبارتند از:

1- انتقال با اسپری کردن

2- انتقال اتصال کوتاه

3- انتقال پالسی

جوشکاری قوس اسپری اساسا یک روش جوشکاری تخت است. روش های انتقال اتصال کوتاه و اسپری پالس را می توان در تمام موقعیت ها استفاده کرد. نوع جریان جوشکاری مورد استفاده برای GMAW به نوع نفوذ مورد نظر بستگی دارد. در روش GTAW بالاترین نفوذ زمانی به دست می آید که پلاریته مستقیم وجود داشته باشد در حالی که بیشترین نفوذ در روش GMAW با پلاریته معکوس (الکترود مثبت) بدست می آید.

فرآیندهای جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی

فرآیندهای جوشکاریSMAW ،SAW ،GMAW ، GTAWو PAW به طور گسترده برای اتصال فولادهای زنگ نزن استفاده می شوند. عموما، فولادهایی که حاوی آلومینیم یا تیتانیم یا هر دو عنصر باشند می تواند با فرآیند های گاز محافظ مانند SMAW و GTAW جوشکاری قوس شوند. برای فرآیندGTAW ، باید از جریان مستقیم، پلاریته مستقیم و الکترود تنگستن با 2 درصد توریوم استفاده کرد. فولادهای زنگ نزن آستنیتی مشکلات خاصی با جوشکاری TIG دارد که از جمله می توان به رسوب کاربیدها و اعوجاج اشاره کرد. جوشکاری SAW هنگامی که جوش آستنیتی یا کم فریت مد نظر باشد، توصیه نمی شود. اگرچه هنگامی که درصد فریت جوش تا 4 درصد هم قابل قبول باشد، مناسب است.

اخیرا، درخواست برای جوشکاری FCAW فولادهای زنگ نزن به طور قابل توجهی افزایش یافته است، زیرا این فرآیند نقش به سزایی در بهبود سطح بدنه و بهبود بازدهی جوشکاری فولاد زنگ نزن دارد. از جوشکاری اکسی فیول (welding Oxyfuel) فولاد زنگ نزن باید خودداری کرد زیرا حرارت بالا است و احتراق گاز منواکسید و دی اکسید کربن و مونواکسید کربن تولید می کند که فلز جوش را کربوره کرده و احتمال حساس شدن را افزایش می دهد. بنابراین جوشکاری اکسی فیول به جز در مورد تعمیرات اورژانسی درحالتی که تجهیزات جوشکاری قوس در دسترس نباشد توصیه نمی شود. توصیه می شود که شعله خنثی یا اندکی احیایی باشد. جوشکاری قوس کربن به دلیل خطر کاهش مقدار کربن توصیه نمی شود. در شرایطی که خوردگی شدید نباشد می توان از الکترود مصرفی CO2 استفاده کرد. اگر مقاومت به خوردگی از اهمیت زیادی برخوردار باشد جوشکاری قوس فلزی با الکترود پوشش دار یا یکی از گازهای خنثی می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

انتخاب فلز پر کننده

برای بهبود خواص جوش های فولاد زنگ نزن انتخاب دقیق مواد مصرفی جوش و فرآیند تولید اجباری است: استانداردAWS A5.4 ، مشخصات مقاومت به خوردگی الکترودهای جوشکاری با پوشش کروم و فولادکروم – نیکل، لیست انواع، ترکیبات و سایر داده ها برای الکترودهای استاندارد. پر کننده های فلزی AWS ER 3xx یا فلز پر کننده سری 300 در 90٪ موارد برای فولادهای زنگ نزن به کار می روند. چنین جوش هایی مقاومت به خوردگی بالا، چقرمگی و استحکام بالا در دماهای بالا و پایین در شرایط پس از جوشکاری نشان می دهند. مواد پر کننده پیشنهادی و فولادهای آستنیتی در جدول زیر آورده شده است.

فلز پر کننده برای فولاد زنگ نزن آستنیتی	
فلز پایه	فلز پر کننده
تیپ 301، 302 و 304	AWS E308/308L
تیپ L304	AWS E308L
تیپ 316 و L316	AWS E316L
تیپ 317	AWS E317L
تیپ 321،347	AWS E347

گازهای محافظ در جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی

ترکیب گازهای مورد استفاده برای فولادهای زنگ نزن، معمولا حاوی آرگون است زیرا ذاتا خنثی بوده و توانایی آن در سهولت ایجاد قوس و سازگاری با انتقال اسپری فلز است. برای برخی از فرآیندهای جوشکاری ممکن است از هلیوم برای هدایت حرارت بیشتر به فلز پایه، افزایش نفوذ جوش و بهبود سیالیت حوضچه جوش استفاده کرد.

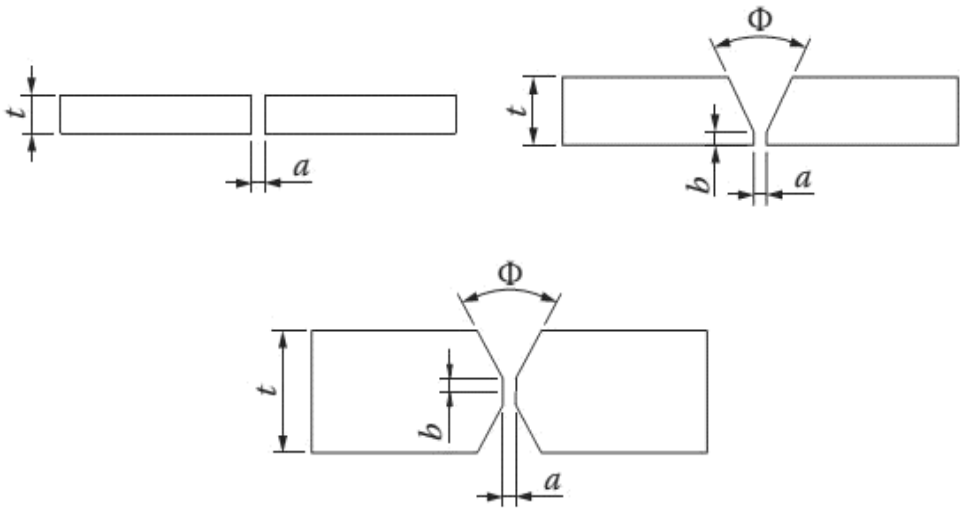
در GMAW و FCAW گاز اکسیژن و دی اکسید کربن به گاز محافظ افزوده می شود تا پایداری گاز و سیالیت حوضچه مذاب بهبود یابد. در موارد خاصی، نیتروژن یا هیدروژن به طور کنترل شده برای بهبود خواص جوش و ظاهر گرده جوش در فولاد زنگ نزن آستنیتی به کار گرفته شد.

آماده سازی پیش از جوشکاری

آماده سازی جوش برای فولاد زنگ نزن مشابه با آماده سازی فولادهای کربنی است و با ماشین کاری، سمباده زنی و برش پلاسما انجام می شود.

طراحی اتصالات

نفوذ جوش معمولا در فولاد های زنگ نزن نسبت به فولادهای کربنی کمتر است، بنابراین آماده سازی زوایای جوش بزرگتر، پیشانی پخ کوچکتر، فاصله ریشه عریض تر و مهارت های جوشکاری بیشتری برای اطمینان از نفوذ کافی بدون ایجاد عیوب ریشه نیاز است. یک طراحی اتصال معمولی برای فولاد زنگ نزن در شکل زیر نمایش داده شده است.



عملیات پاکسازی

برای بدست آوردن جوش های سالم بدون ترک و ترد، سطح باید پیش از جوشکاری پاکسازی شود. ناحیه ای که باید پیش از جوشکاری تمیز شود سطوح شیاردار جوش و سطوح جانبی برای حداقل 0.5 اینچ در هر طرف است. مهم ترین انواع آلودگی های سطح عبارتند از آهن و آلودگی های آلی.

- آلودگی های آهن:

بر حسب اتفاق، تجهیزات شکل دهی و ابزارهایی که از فولاد کربنی ساخته شده اند، می توانند ذرات آهن را روی سطح فولاد زنگ نزن به جای بگذارند. از آنجایی که زنگ آهن نسبت به سطح آستنیتی آندی است، خوردگی گالوانیکی رخ می دهد و منجر به ایجاد حفره می شود. بنابراین، مطلوبست هنگام ساخت از ورق های پلاستیکی یا

مقوایی روی ماشین آلات فولاد کربنی و کارخانه ها و تجهیزات حمل و نقل استفاده شود تا از نشست کربن روی سطوح زنگ نزن جلوگیری شود. باید این ذرات آهن را با اسید شویی حذف کرد. همواره از چرخ های اکسید آلومینیم برای این کار استفاده می شود و نه کاربید سیلیسیم. کاربید ممکن است با کروم واکنش داده و مقاومت به خوردگی فلز جوش را تحت تاثیر قرار دهد.

- آلودگی آلی:

در مرحله ساخت، آلودگی های آلی روی سطوح فلز در نتیجه استفاده از گریس، روغن، مایعات تراشکاری، علایم، رنگ و مواد جسباک ایجاد می شود. حتی مقدار کم این آلودگی ها می تواند منجر به ایجاد ترک یا تردی در جوش یا HAZ شود. برای جلوگیری از این کار، باید اطمینان حاصل کرد که فلز پایه و پر کننده تمیز هستند. حذف آلودگی های آلی به طور کامل با چربی زدایی با محلول غیر کلریدی انجام می گیرد. لایه های اکسیدی را می توان با روش های مکانیکی یا اسید شویی با محلول 10 تا 20 درصد اسید نیتریک از بین برد. روش های مکانیکی تمیز کردن سطوح اکسیدی شامل:

1- استفاده از برس سیمی

2- ماسه یا سنگریزه پاشی

3- ماشین کاری و سمباده زنی با سیال برش بدون کلر

ملاحظات جوشکاری فولاد زنگ نزن آستنیتی

چند فرآیند جوشکاری و ملاحظات در انتخاب مواد وجود دارد که برای ایجاد جوش های بی عیب و نقص با خواص مناسب در فولادهای زنگ نزن آستنیتی باید در نظر گرفته شود. برخی از این ملاحظات عبارتند از:

1- مشکل بسیار شایع ریزترک ها و ترک های ناشی از ذوب انتخابی.

2- جوش های خودزا در معرض نفوذ

3- حساس شدن ناحیه HAZ ممکن است مقاومت به خوردگی را تحت تاثیر قرار دهد. سایر عواملی که بر مقاومت به خوردگی اتصال جوش اثر می گذارند مانند ریزساختار در همسایگی سطح، ناخالصی ها، اکسید های سطحی، تنش باقی مانده جوش، آلودگی ها و سایر عیوب هندسی و شیار ها نیز بر مقاومت به خوردگی موثر هستند.

4- تیپ 304 به حرارت کمتری برای تولید همجوشی نیاز دارد که به معنای جوشکاری سریعتر برای مقدار مشخصی حرارت یا حرارت ورودی کمتر برای ایجاد سرعت یکسان است. این پدیده در روش های جوشکاری ذوبی الکتریکی از اهمیت به سزایی برخوردار است. مقاومت بیشتر فولاد زنگ نزن آستنیتی منجر به تولید حرارت بیشتر در اعمال جریان مشابه در مقایسه با فولاد کربنی است.

5- اگر به پاس های زیادی برای انجام جوشکاری نیاز باشد، باید دمای بین پاس ها در دمای کمتر 100 درجه سانتی گراد برای جلوگیری از ترک و اعوجاج نگه داشته شود و به طور کلی حرارت کمتری (30درصد کمتر) مورد نیاز است.

6- انبساط حرارتی بیشتر منجر به پیچش یا اعوجاج می شود، به خصوص در مقاطع نازک، برای کنترل ابعادی نیاز به ماشین کاری است.

7- دود جوشکاری برای کارگران خطرناک است.

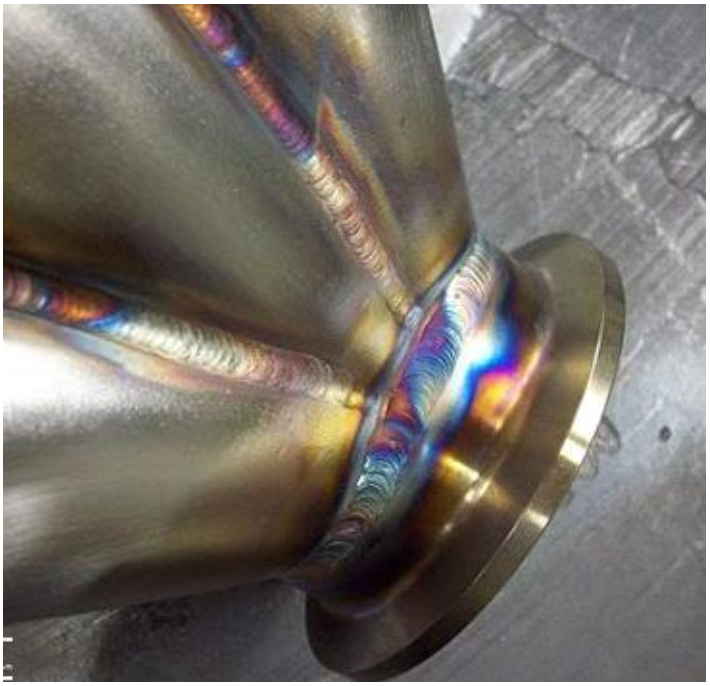
8- فاکتورهای زیادی باید برای عملیات حرارتی پس از جوشکاری در نظر گرفته شود.

9- اتصالات جوشکاری بین دو فلز غیر هم جنس به انتخاب مناسب فلز پر کننده و فرآیند نیاز دارند.

10- کاهش ترک گرم. برخی فولادهای زنگ نزن (مانند تیپ 347) در هنگام جوشکاری تمایل به انقباظ یا پارگی دارند بنابراین تعداد پاس های بیشتری مورد نیاز است.

11- به دلیل آنکه فولاد زنگ نزن هدایت حرارتی کمتری نسبت به فولاد کربنی دارد، معمولا حرارت ورودی 30 درصد کمتر مورد نیاز است. جوش ها نیز به زمان بیشتری برای سرد شدن نیاز دارند. حفظ طول قوس کوتاه و استفاده از خط جوش های گلویی برای جوش های طولانی به منظور کاهش حرارتی ورودی الزامی است.

12- ضریب انبساط حرارتی فولاد زنگ نزن آستنیتی بیشتر از فولاد کربنی، فریتی یا مارتنزیتی است. به همین دلیل فلز پایه باید حداقل تنش را داشته باشد تا از افزودن تنش باقی مانده در اتصالات جوش جلوگیری شود.



فولادهای زنگ نزن دوپلکس برای مبدل حرارتی

(Duplex stainless steels for Heat Exchangers)

همانطور که از نامشان برمی آید ریز ساختاری مخلوط از فریت و آستنیت به نسبت تقریبی 50/50 دارند. مقاومت به خوردگی آلیاژ های دوپلکس نخست به ترکیب آن ها بستگی دارد به خصوص به مقدار کروم، مولیبدن و نیتروژن .برای این فولادها، مقدار کروم می تواند از 22 تا 27 درصد و مولیبدن از 2 تا 4 درصد بسته به خوردگی مورد نظر تغییر کند. بسیاری از گریدهای فولادهای زنگ نزن دوپلکس با عددی شناخته شده اند که نشان دهنده مقدار کروم و نیکل آن هاست. به عنوان مثال گرید 2205، 22 درصد کروم و 5 درصد نیکل دارد. این اسامی ترکیب محور، توسط بسیاری از سازندگان استفاده می شوند و اخیرا به ASTM A240 اضافه شده اند. انواع جدیدتر فولادهای زنگ نزن دوپلکس شامل آلیاژ 2205 یاCode Plus Two ، 44LNیا فرالیوم 255(S32550)،(UNS S32950) 7 Mo-PLUS، 948 Atlasو 253 ME می شود. از میان تمامی این فولادها، فرالیوم 225 تنها فولاد زنگ نزن دوپلکس مناسب برای آب دریاست. فولاد 7Mo-PLUS به شکل موفقیت آمیزی در کندانسورهای خنک کننده برای تولید اسید نیتریک مورد استفاده قرار می گیرد .فولادهای دوپلکس امروزه به دلیل استحکام بالاتر و مقاومت بیشتر به خوردگی شیاری نسبت به فولادهای زنگ نزن آستنیتی، مورد استفاده قرار می گیرند.

ترکیب فولادهای زنگ نزن دوپلکس

فولادهای زنگ نزن دوپلکس مقدار بالایی کروم (22 تا 27 درصد) و مولیبدن (2 تا 4 درصد) دارند. ترکیب این فولادها به دقت کنترل می شود تا تعادل مناسب بین آستنیت و فریت برقرار شود. مقدار بالای کروم، مقاومت به اکسیداسیون بالا را ایجاد می کند. مقدار نیکل از 4 تا 7 درصد تغییر می کند. به دلیل مقدار کمتر نیکل، قیمت فولاد های دوپلکس کمتر است. افزودن 0.15 تا 0.25 درصد نیتروژن استحکام و چقرمگی را افزایش داده و مقاومت در برابر خوردگی تنشی و حفره دار شدن را افزایش می دهد. درصد کربن این آلیاژها کم است. ترکیب برخی از فولادهای دوپلکس زنگ نزن در جدول زیر نمایش داده شده است .

ترکیب اسمی برخی از فولادهای زنگ نزن سوپر/دوپلکس

عدد UNS	آلیاژ	ماکزیمم مقدار کربن	کروم	نیکل	مولیبدن	نیتروژن	سایر عناصر آلیاژ
S31803	2205™	0.03	21–23	4.5–6.5	2.5–3.5	0.15	0.7Mn (2 max.)
S32520	UR52N+™	0.03	24–26	5.5–8.0	3–5	0.2–0.35	1.5Mn
S32550	Ferralium 255™	0.03	24–27	6.5–4.5	2.9–3.9	0.20	Cu, 1.5Mn2
S32760	Zeron 100™	0.03	25	7.5	3.5	0.23	–
S32950	7-Mo plus™	0.03	26–29	3.5–5.2	1.0–2.5	0.20	Mn2
S32750	2507™	0.03	24–26	6–8	3–5	0.28	1.2Mn, 0.50Cu

مقاومت به خوردگی آلیاژهای منتخب در جدول زیر نمایش داده شده است.

عدد مقاومت به حفره دار شدن در آلیاژهای دوپلکس					
	ترکیبات لازم برای محاسبه PRE_N				
نامگذاری UNS	آلیاژ	Cr	Mo	N2	PRE_N
S31803	2205™	22	3.0	0.15	33.7
S32520	UR52N+™	25	4	0.28	41.68
S32550	Ferralium 255™	25	3.5	0.20	39.7
S32900	7 Mo™	25			25
S32950	7-Mo plus™	27.5	1.8	0.20	34.64
S32750	2507™	25	4.0	0.28	42.84
S32760	Zeron 100™	25	3.5	0.23	40.23

ویژگی ها فولاد زنگ نزن دوپلکس

-مغناطیسی هستند.

– شامل هر دو فاز آستنیت و فریت هستند.

– استحکام بالایی دارند.

– حتی در دمای 315 درجه سانتی گراد در معرض تردی 475 درجه سانتی گراد قرار می گیرند.

– در معرض خوردگی هیدروژنی قرار می گیرند.

- در معرض انتقال نرمی به تردی قرار می گیرند.

مقایسه با فولادهای زنگ نزن فریتی و آستنیتی

به دلیل اینکه فولادهای زنگ نزن به طور تقریبا مساوی از فازهای آستنیت و فریت تشکیل شده اند، خواص فیزیکی آن ها در محدوده مابین خواص فولادهای زنگ نزن فریتی و آستنیتی قرار می گیرد. ویژگی های برجسته این فولاد نسبت به فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فریتی به شرح زیر است:

1- فولادهای دوپلکس استحکام و چقرمگی بیشتر، مقاومت خوب به خوردگی و مقاومت بیشتر نسبت به خوردگی تنشی را نسبت به فولادهای آستنیتی داشته و اغلب قیمت نسبتا پایینی هم دارند.

2- فولادهای دوپلکس نسبت به فولادهای آستنیتی تنش تسلیم بیشتری داشته و به دلیل سبک تر بودن نسبت به فولاد زنگ نزن آستنیتی استفاده از آن ها از نظر اقتصادی به صرفه تر است. اما فولادهای دوپلکس برای کاربردهای برودتی مناسب نیستند.

3- در دماهای بالا، تغییراتی در بالانس فازها رخ می دهد و استفاده از این فولادها در دمای بالا توصیه نمی شود.

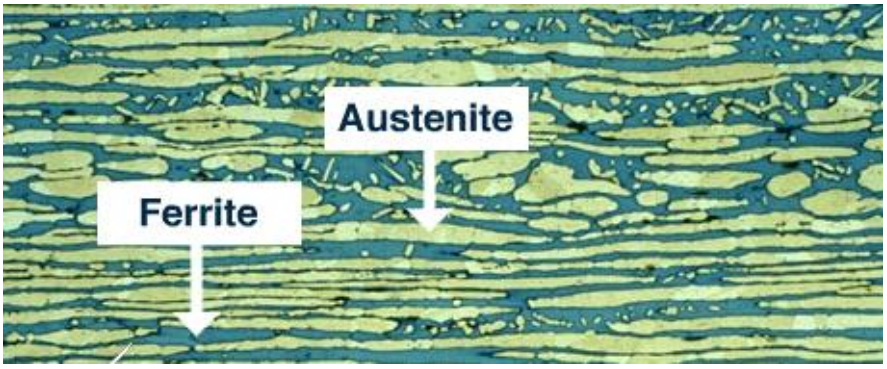
4- مقدار زیاد فاز فریت در فولادهای دوپلکس باعث می شود تا رفتار مغناطیسی داشته باشند.

5- به دلیل جدایش فازهای فریت و آستنیت، آلیاژ های دوپلکس مقاومت به خوردگی شیاری و حفره دار شدن متفاوتی را از خود نشان می دهند.

6- فولادهای دوپلکس نسبت به گرید های فریتی چقرمگی بیشتری دارند. در مقایسه با فولادهای زنگ نزن فریتی دمای انتقال نرمی به تردی در آلیاژ دوپلکس تدریجی تر بوده و در دماهای کمتر از دمای محیط رخ می دهد. بنابراین اجازه ساخت ورق های ضخیم و تولید صفحه لوله گیر را می دهد.

7- هدایت حرارتی این فولادها کمتر از نصف هدایت حرارتی فولاد است اما 25 درصد بیشتر از فولاد زنگ نزن آستنیتی است.

8- ضریب انبساط حرارتی 40 درصد کمتر از فولاد زنگ نزن آستنیتی است اما با مقدار ضریب انبساط حرارتی فولاد کربنی برابر است.



مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن دوپلکس

اگر چه مقدار نیکل این فولادها 4 تا 7.5 درصد است بوده و از مقدار نیکل فولادهای زنگ نزن آستنیتی کمتر است، مقاومت به خوردگی تنشی آن ها بهتر از آن چیزی است که از درصد نیکل آن ها استنباط می شود. فولادهای زنگ نزن دوپلکس دو مزیت مهم بر تیپ های 304 و 316 دارند که عبارتند از:

1- مقاومت خوب به خوردگی تنشی کلریدی

2- خواص مکانیکی بالاتر به همراه شکل پذیری خوب

به دلیل اینکه فولادهای دوپلکس استحکام تسلیم بیشتر از فولادهای آستنیتی است، مقاومت به خوردگی شیاری می تواند با ریزساختار 50/50 به ماکزیمم مقدار خود برسد. به دلیل اینکه نیکل عاملی برای ایجاد مقاومت به خوردگی در محیط های کاهنده است، فولادهای دوپلکس مقاومت کمتری را در این محیط ها نسبت به فولادهای آستنیتی نشان می دهند. درصد کروم و مولیبدن بالای فولادهای زنگ نزن دوپلکس به ویژه در تامین مقاومت به محیط های اکسیدکننده مهم هستند و مسئول مقاومت به خوردگی شیاری و حفره دار شدن به خصوص در محیط های کلریدی هستند. عدد PRE_N با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود.

$$PRE_N = Cr + 3.3(\%Mo) + 16(N\%)$$

برخی آلیاژها حاوی تنگستن هستند که مقاومت در برابر حفره دار شدن فولادهای دوپلکس را افزایش می دهد. برای این آلیاژها، مقاومت به حفره دار شدن با PRE_w نمایش داده می شود:

$$PRE_W = Cr + 3.3\%Mo + 1.65W + 16\%N$$

عدد PRE_N و PREw معمولا برای دسته بندی کردن خانواده ای که آلیاژ به آن تعلق دارد، استفاده می شود. در کل، موادی که عدد مقاومت به حفره دار شدن آن ها برابر با 30 است مانند آلیاژ دوپلکس 2205 در دسته دوپلکس های استاندارد قرار می گیرند و فولادهایی که عدد PRE آن ها برابر با 40 یا بیشتر است به عنوان آلیاژهای سوپردوپلکس شناخته می شوند.

فولادهای دوپلکس با مقدار کربن کم (کمتر از 0.03٪) تولید می شوند و بنابراین خوردگی بین دانه ای که به دلیل حساس شدن فلز جوش در نتیجه رسوب کاربیدها ایجاد می شود، مشکل مهمی ایجاد نمی کند. ترک ناشی از هیدروژن زمانی رخ می دهد که فریت از 55 FN فرارتر رود. (درصد فاز فریت بیشتر از 55 درصد باشد.)

آزمایشات خوردگی شامل تست CPT براساس ASTM G-48A و ASTM A262-C (تست هیویی) برای IGC، ASTM G30 و G36 برای SCC می شود.

کاربردهای فولادهای زنگ نزن دوپلکس

آلیاژهای دوپلکس مقاومت عالی به اکسیداسیون، اسیدهای کاهنده، اسید سولفوریک با غلظت کمتر از 25 درصد، مخلوط اسیدها و مواد آلی، آب دریا، نفت خام ترش، چاه های گاز و محلول های قلیایی دارند. فولادهای دوپلکس

به طور موفقیت آمیزی در مخازن و مبدل های حرارتی محتوی کلریدهای خورنده به کار گرفته شده اند، در کاربردهایی مانند پالایشگاه های نفت و گاز، کارخانجات پالپ و کاغذ، مبدل های حرارتی پالایشگاه نفت، مبدل های حرارتی فرآیندهای شیمیایی، تانک ها، مخازن تحت فشار، لوله های بویلر، پیش گرمکن دایجستور، اواپراتورها و غیره به کار گرفته شده اند.

جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی

روش های جوشکاری که برای فولادهای زنگ نزن آستنیتی استفاده می شود را می توان در جوشکار این فولادها به کار برد به جز استفاده از گاز محافظ آرگون خالص در هنگام جوشکاری زیرا به این وسیله از اضافع شدن سریم جلوگیری می شود.فرآیندهای جوشکاری که باید می توان مورد استفاده قرار داد عبارتند ازGTAW ؛ GMAW، PAW، SMAWو.SAW

-جوشپذیری

هدف از جوشکاری در فولادهای زنگ نزن دوپلکس بدست آوردن فلز جوش و منطقه HAZ با مقاومت به خوردگی، چقرمگی یکسان و بدون حضور مواد بین فلزی است. نکته جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوپلکس از تشکیل مقدار بیش از حد فریت جلوگیری می کند. مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی می تواند زمانی در اتصالات جوش بدست آید که ساختار 50/50 فریتی - آستنیتی در فلز جوش و منطقه HAZ حاصل شود. معمولا در هنگام جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوپلکس مشکلات زیر به وجود می آید:

- افزایش فاز فریت و در نتیجه کاهش چقرمگی
- ترک خوردگی در اثر ذوب انتخابی
- رشد دانه در منطقه HAZ
- کاهش مقاومت به خوردگی به دلیل فاز سیگما و رسوب کربونیترات ها
- رسوب نیترات کروم که منجر به کاهش مقاومت به خوردگی می شود.
- گرمایش به مدت طولانی در محدوده دمای 350 تا 550 درجه سانتی گراد که می تواند تردی تمپر در دمای 475 دریجه سانتی گراد را به وجود آورد و در نتیجه کاربرد آن ها به دماهای زیر 300 درجه سانتی گراد محدود شده است.

برای غلبه بر این مشکلات باید اقدامات زیر انجام داد:

- استفاده از فلز پر کننده با مقدار نیکل بیشتر که تضمین می کند مقدار PRE کمتر از 40 نباشد.

- کنترل حرارت ورودی

- کنترل دمای بین پاس ها (باید به 200 درجه سانتی گراد محدود شود.)

- بالانس فازهای آستنیت و فریت

بالانس فازها می توان تنها زمانی ایجاد شود که نرخ سرمایش به اندازه کافی آهسته باشد تا به آستنیت اجازه تشکیل مجدد را با سرمایش جوش بدهد. اگر این نرخ خیلی آهسته باشد، فازهای ترد امکان ظهور می یابند؛ از طرف دیگر، اگر سرعت بسیار بالا باشد، ترکیبات بین فلزی می توانند تشکیل شوند. جوشکاری خودکار فاز فریت را در قطعه جوش و نواحی مجاور فلز پایه افزایش می دهد. عملیات آنیل بعدی تمایل به ایجاد تعادل بین فازها در فلز پایه دارد.

- جوشپذیری

هدف از جوشکاری در فولادهای زنگ نزن دوپلکس بدست آوردن فلز جوش و منطقه HAZ با مقاومت به خوردگی، چقرمگی یکسان و بدون حضور مواد بین فلزی است. نکته جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوپلکس از تشکیل مقدار بیش از حد فریت جلوگیری می کند. مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی می تواند زمانی در اتصالات جوش بدست آید که ساختار 50/50 فریتی - آستنیتی در فلز جوش و منطقه HAZ حاصل شود. معمولا در هنگام جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوپلکس مشکلات زیر به وجود می آید:

- افزایش فاز فریت و در نتیجه کاهش چقرمگی

- ترک خوردگی در اثر ذوب انتخابی

- رشد دانه در منطقه HAZ

- کاهش مقاومت به خوردگی به دلیل فاز سیگما و رسوب کربونیترات ها

- رسوب نیترات کروم که منجر به کاهش مقاومت به خوردگی می شود.

- گرمایش به مدت طولانی در محدوده دمای 350 تا 550 درجه سانتی گراد که می تواند تردی تمپر در دمای 475 دریجه سانتی گراد را به وجود آورد و در نتیجه کاربرد آن ها به دماهای زیر 300 درجه سانتی گراد محدود شده است.

برای غلبه بر این مشکلات باید اقدامات زیر انجام داد:

- استفاده از فلز پر کننده با مقدار نیکل بیشتر که تضمین می کند مقدار PRE کمتر از 40 نباشد.

- کنترل حرارت ورودی

- کنترل دمای بین پاس ها (باید به 200 درجه سانتی گراد محدود شود.)

- بالانس فازهای آستنیت و فریت

بالانس فازها می توان تنها زمانی ایجاد شود که نرخ سرمایش به اندازه کافی آهسته باشد تا به آستنیت اجازه تشکیل مجدد را با سرمایش جوش بدهد. اگر این نرخ خیلی آهسته باشد، فازهای ترد امکان ظهور می یابند؛ از طرف دیگر، اگر سرعت بسیار بالا باشد، ترکیبات بین فلزی می توانند تشکیل شوند. جوشکاری خودکار فاز فریت را در قطعه جوش و نواحی مجاور فلز پایه افزایش می دهد. عملیات آنیل بعدی تمایل به ایجاد تعادل بین فازها در فلز پایه دارد.

- حرارت ورودی

افزایش حرارت ورودی جوشکاری، پیش گرمایش و دماهای بین پاس ها منجر به جوش های درشت دانه شده و تمایل به رسوب افزایش می یابد. حرارت جوشکاری باید مقدار فریت را محدود کند. البته باید توجه داشت که حرارت ورودی بسیار کم نیز فریت بسیار زیادی تولید می کند و پیشنهاد می شود که ورودی حرارت باید بیشتر از 1.5 kJ/mm باشد.

- ترک ناشی از ذوب انتخابی

فولادهای زنگ نزن دوفازی به ترک ناشی از ذوب انتخابی در منطقه HAZ حساس هستند زیرا لایه های نازکی از S و P نقاط ذوب پایین در طول مرزدانه ها ایجاد می شود و این اثر با وجود تنش های باقی مانده کاهش می یابد.

- رسوب فاز ثانویه

فولادهای دوپلکس به رسوب فاز سیگما در حضور عناصر آلیاژی فریت ساز، حساس هستند. فلز پایه با کربن کم، تعادل فازهای فریت و آستنیت و مقدار کافی نیتروژن، سرعت تشکیل آستنیت را در هنگام سرمایش افزایش داده و از ایجاد فاز ثانویه سیگما جلوگیری می کند.

- رسوب نیترید کروم

به دلیل افزایش مقدار نیتروژن که برای تقویت آستنیت مورد استفاده قرار می گیرد، نیتریدهای کروم (N2Cr) معمولا در مرزدانه های اتصال جوش به همراه فاز سیگما استفاده می شوند. این پدیده منجر به رسوب آستنیت ثانویه در ناحیه اطراف ماده به دلیل کاهش عناصر فریت ساز می شود. آستنیت ثانویه سبب می شود تا کاهش موضعی مقاومت به خوردگی به دلیل مقدار کم کروم در این ناحیه رخ دهد.

-مواد مصرفی جوشکاری

هنگامی که مواد مصرفی مناسب با ماده اصلی مورد استفاده قرار گیرند، ساختار نهایی فلز جوش ممکن است آستنیت کم و فریت زیادی داشته باشد و منجر به کاهش چقرمگی شود، اگرچه نرخ سرمایش کم در نظر گرفته شده باشد. تعادل فازی مطلوب با استفاده از مواد مصرفی با 2 الی 3 درصد نیکل بیشتر بدست می آید.

فولاد زنگ نزن سوپرآستنیتی

(Superaustenitic Stainless Steels)

آلیاژی با ساختار fccو عناصر آلیاژی بالا هستند که معمولا حاوی مقداری از عناصر جانشین مانند کروم، مولیبدن، نیتروژن و مقدار کافی نیکل برای پایدار ساختن ریزساختار کاملا آستنیتی هستند .این فولادها بر اساس مقدار مولیبدن طبقه بندی می شوند و معمولا مقدار مولیبدن این فولادها 4.5تا 7درصد است .افزودن 0.3تا 0.5درصد نیتروژن استحکام تسلیم دو برابر فولاد زنگ نزن معمولی را ایجاد می کند .درصد بالای نیکل 18)تا 31درصد (به همراه درصد بالای کروم و مولیبدن به آلیاژها مقاومت به خوردگی تنشی عالی می دهد .مس به برخی از آلیاژها افزوده می شود تا مقاومت به محیط کاهنده مانند اسید فسفریک داغ، اسید استیک و اسید سولفوریک رقیق را افزایش دهد.

فولادهای سوپر آستنیتی با 4.5 درصد مولیبدن

آلیاژهای آستنیتی با 4.5 درصد مولیبدن مانند AL 904L ، 254SLXو JS700 مقاومت مناسبی را به خوردگی در آب دریا به عنوان سیستم لوله کشی از خود نشان داده اند. این فولادها جوشپذیری و کارپذیری خوبی داشته و به اشکال مختلف مانند لوله، ورق و فورجینگ ها در دسترس هستند. مقدار نیتروژن در محدوده 0.4 تا 0.5 درصد مقاومت خوبی را در برابر حفره دار شدن و خوردگی شیاری دارند. درصد بالای نیکل (25٪) و مولیبدن (4.5٪) مقاومت خوبی را در برابر خوردگی تنشی کلریدی نشان می دهد. آن ها هم چنین مقاومت به خوردگی بین دانه ای خوبی از خود نشان می دهند. کلر زنی (Chlorination) برای کنترل تخریب میکروبیولوژیکی برای کاهش خوردگی زیر رسوبات ضروری است، سطوح فلنج و واشر دار در آب های شور و دریا در معرض خوردگی شیاری قرار دارند.

فولادهای سوپر آستنیتی با 6 درصد مولیبدن

فولادهای سوپر آستنیتی با 6٪ مولیبدن در صنایع شیمیایی به خوبی شناخته شده هستند. آن ها حاوی 20 درصد کروم، 18 الی 25 درصد نیکل و بیش از 0.1٪ نیتروژن هستند. افزودن نیتروژن منجر به بهبود استحکام، تثبیت

ساختار آستنیت و بهبود مقاومت به خوردگی حفره دار شدن است .فولادهای سوپر آستنیتی با 6درصد مولیبدن چقرمگی و شکل پذیری بسیار خوب فولادهای آستنیتی سری 300 را از خود نشان می دهند. فولادهای زنگ نزن سوپر آستنیتی با 6 درصد مولیبدن، اشکال و کدهای ASTM/ASME آن ها به همراه لیست ترکیبات آن ها در جداول زیر در کنار فولادهای تیپ 304 و 316 آورده شده است.

ترکیب نامی فولادهای زنگ نزن سوپرآستنیتی به همراه 304 و 316							
سایر	N	Mo	Ni	Cr	C	آلیاژ	UNS
—	—	—	8	18	0.03	304	S30400
—	—	2.5	12	17	0.03	316	S31600
Cu0.75	0.2	6.2	18	20.0	0.02	254SMO	S31254
Cu, max0.75	0.2	6.5	24.5	21	0.02	AL-6XN 1925hMo	N08367
Cu1.1	0.2	6.5	25	20	0.01	25-6 MO	N08926
Mn, 0.41Si1.39		6.5	24.5	21	0.018	AL-6X	N08366

AL-6XN N08367 برای اشکال مختلف ASTM/ASME مشخصات							
نام آلیاژ	UNS	ورق، پلیت و نوار	لوله مبدل حرارتی	لوله	فورجینگ ها	اتصالات	میله، تیر و سیم
AL-6XN	N08367	A 240, B/ SB688	A/SA 249	A312; B/ SB675, 690, 829	B/SB564, A 182 F62	B462	B/SB691

اگرچه تفاوت ترکیب شیمیایی، سه فولاد سوپر آستنیتی 6 Mo %با UNS متفاوت ,UNS S31254, N08367) and N08926)را پدید آورده اما این فولادها برای بسیاری از کاربردها، مقاومت به خوردگی مشابهی دارند و به عنوان جانشین یکدیگر مورد استفاده قرار می گیرند. درصد آهن فولادهای سوپرآستنیتی کمتر از 50 درصد است و بنابراین فولادهای این دسته به جز SMO 254 در محدوده فولادها، فولادهای زنگ نزن و آلیاژهای مربوطه ASTMقرار نمی گیرند. اخیرا آلیاژهای 6٪ مولیبدن با فولادهایN08031 ، S32050و (UR B36)B26 متحول شده اند که فولاد سوپرآستنیتی حاویNi 25% ، Cr 20%و 0.2 درصد نیتروژن هستند. نوعی از فولاد زنگ نزن 6Moبا 25 درصد نیکل مزیت هایی بر فولاد زنگ نزن 6Mo با 18 درصد نیکل دارد. برخی از این مزایا عبارتند از:

- بهبود پایداری آستنیت
- بهبود مقاومت به خوردگی تنشی
- بهبود پسیو شدن

- تشکیل آهسته تر رسوبات، حتی در محدوده دمایی 700°C–1000°C

- کاهش سینتیک حساس شدن

مقاومت به خوردگی فولاد زنگ نزن سوپرآستنیتی

در کل، فولادهای سوپرآستنیتی پرآلیاژ مقاومت عالی را در برابر خوردگی، حفره دار شدن، خوردگی شیاری و SCCنشان می دهند. فولادهای سوپرآستنیتی با 6 ٪ مولیبدن در برابر خوردگی های موضعی و تنشی در محیط اکسید کننده کلریدی، محلول های حاوی کلرید/سولفید و طیف وسیعی از فرآیندهای شیمیایی مقاومت می کنند. آن ها به طور گسترده در کاربردهای خشن در آب دریا مورد استفاده قرار می گیرند. عملکرد فولادهای سوپرآستنیتی با 6٪ مولیبدن مابین فولادهای زنگ نزن تیپ 316 و 317 و آلیاژهای پایه نیکل625 و C-276 قرار می گیرد. برخی از فولادها به منظور مقاومت به برخی از محیط های خورنده، حاوی مقدار اضافی مس هستند که مقاومت آن ها را به طور کلی در برابر اسیدها ارتقا می دهد. فولادهای کاملا آستنیتی با 6٪ مولیبدن با مقدار Cr + Moبالا شناسایی می شوند و PRE آن ها به شکل زیر محاسبه می شود:

$$PRE_N=\%Cr+3.3(\%Mo٪)30+(N)$$

عدد PRE در تمام فولادها از 35 بیش تر است. مقاومت به حفره دار شدن برای فولادهای زنگ نزن سوپر آستنیتی در جدول زیر نمایش داده شده است.

عدد مقاومت به حفره دار شدن برای برخی از فولادهای زنگ نزن سوپرآستنیتی					
	ترکیب مورد نیاز برای محاسبه PREN				
آلیاژ	UNS	Cr	Mo	N2	PREN
S31254	254SMO	20.0	6.2	0.2	46.46
N08367	AL-6XN /1925hMo	21	6.5	0.2	45.65
N08926	25-6 MO	20.5	6.5	0.2	45.15
N08366	AL-6X	21	6.5	—	42.45
S31277	27-7Mo	22	7.2	0.35	57.26

کاربرد فولاد زنگ نزن سوپرآستنیتی

در صنایع فرآیندی، فولادهای زنگ نزن با 6٪ مولیبدن جانشین فولادهای زنگ نزن معمولی شده اند که در اثر حفره دار شدن، خوردگی شیاری و خوردگی تنشی کلریدی تخریب شده اند. آن ها به طور گسترده در صنایع فرا ساحلی و نمک زدایی، حمل و نقل آب دریا، صنایع کلر و رنگبری، صنایع خمیر و کاغذ و واحد های گوگرد

زدایی مورد استفاده قرار می گیرد. تجهیزاتی که از فولادهای آستنیتی با 6٪ مولیبدن ساخته شده انـد، شـامل مخـازن تحت فشار، ستون ها، کندانسورهای خنک شونده با آب دریا، اواپوراتور، مبدل های حرارتی، کریستالایزرها، پمپ ها، لوله کشی می شوند.

جوشکاری فولاد زنگ نزن سوپرآستنیتی

در کل، فولادهای زنگ نزن سوپر آستنیتی با 6٪ مولیبدن جوشپذیری خوبی دارند. موضوع اصلی در هنگام اسـتفاده از فولادهای زنگ نزن سوپرفریتی مقاومت به خوردگی کافی در جوش ها است. در هنگام جوشـکاری، بایـد توجـه خاصی به پدیده های زیر مبذول داشت:

1- ترک داغ

2- ریز جدایش عنصری

3- رسوب فازهای بین فلزی

از آنجایی که مقدار کروم فولادهای 6٪ Mo کم است (<0.03٪) خطر رسـوب کاربیـد کـروم در مـرز دانـه هـای ناحیه HAZ و در نتیجه حساسیت به خوردگی بین دانه ای قابل چشم پوشی است.

فرآیندهای جوشکاری فولاد زنگ نزن سوپرآستنیتی:

مهمترین فرآیندهای جوشکاری مورد استفاده SMAW و GTAW اتوماتیک و دستی با فلز پرکننده هسـتند. فرآینـد GTAW بدون فلز پر کننده باید تنها در مواردی استفاده شودکه عملیات حرارتی آنیل محلول سازی ثانویه انجام می گیرد. فرآیند های GMAW، SAW و PAW اتوماتیک با فلـز پرکننـده نیـز مـورد اسـتفاده قـرار مـی گیرنـد. بـرای جوشکاری فولاد آستنیتی 6٪ Mo باید موارد زیر را در نظر داشت:

1- استفاده از فلزات پر کننده که به اندازه کافی با مولیبدن آلیاژ شده به گونه ای است که جـوش هـا نسـبت بـه فلـز پایه مقاومت به خوردگی بیشتری دارند (فلز پر کننده ای که معمولا مورد اسـتفاده قـرار مـی گیـرد آلیـاژ 352 بـا 9 درصد مولیبدن است).

2- اطمینان از تمیز بودن سطح قبل و پس از جوشکاری

3- اطمینان از محافظت کافی هنگام جوشکاری

4- محدود کردن حرارت ورودی و اندازه جوش برای پرهیز از ترک گرم فلز جوش

عملیات حرارتی پس از جوشکاری فولاد زنگ نزن سوپرآستنیتی:

اگر فولادهای سوپر آستنیتی 6٪ Mo نیاز به آنیل یا تنش زدایی داشته باشـند، آنهـا بایـد آنیـل کامـل شـده و در آب کوئنچ شود .آنیل محلول سازی در دمای1150°C–1250°C به همـراه کـوئنچ معمـولا اسـتفاده مـی شـود؛ ایـن بـه یکنواخت کردن خواص محل اتصال جوش کمک خواهد کرد. عملیات حرارتـی کـه در آن فـولاد زنـگ نـزن 6٪

Mo در محدوده دمایی (705-1040°C) قرار می گیرد، فولاد را در معرض رسوب فاز سیگما، کاهش مقاومت به خوردگی و چقرمگی قرار خواهد داد. بر اساس ترکیب آلیاژ، تنش زدایی در دمای حداکثر 600°C برای چند ساعت، ممکن است در موارد خاص مورد استفاده قرار گیرد. در تمام موارد، سازنده باید از پیشنهادات تولید کننده استفاده کند.

مقاومت به خوردگی جوش فولادهای زنگ نزن سوپر آستنیتی

عواملی که منجر به کاهش مقاومت به خوردگی جوش فولاد زنگ نزن سوپرآستنیتی می شوند و اقدامات لازم جهت غلبه بر آن ها عبارتند از:

1- ریز جدایش مولیبدن در نواحی موضعی که معمولا هنگامی که از فرآیند GTAW اتوماتیک استفاده می شود، رخ می دهد.

2- نواحی ترکیب نشده. حرارت ورودی جوشکاری بالا می تواند نوارهایی از فلز پایه را در مناطق مجاور خط ذوب ایجاد کند، که ذوب شده اند اما با فلز پرکننده ترکیب نشده اند. این مشکل با کنترل حرارت ورودی و جلوگیری از سوختگی جوش برطرف می شود.

3- شیار ها، ترک ها و ریزدرزها. مناطق خوردگی شیاری می توانند در ابتدا یا انتهای پاس های جوشکاری، بین پاس های جوشکاری یا زیر قطرات جوش ایجاد شوند.

4- حساس شدن و رسوب کاربید. آلیاژهای با مقدار کربن کم (<0.02٪) این مشکل را ندارند. افزایش مقدار مولیبدن و نیتروژن مقدار کربن یا حرارت ورودی قابل تحمل را افزایش می دهد.

5- رسوب فازهای بین فلزی مانند فازهای سیگما و چی.

6- آلودگی های سطحی که می توان آن را با ساینده ها یا اسیدشویی یا حلال های مناسب از بین برد.

7- پوسته های اکسید سطحی یا رنگ که با فرآیند پوسته زدایی برطرف نشده اند.

8- ترکیب گاز محافظ. افزودن نیتروژن به اندازه 3 تا 5 درصد حجمی به مشعل و گاز های پشتی مقاومت به خوردگی را بهبود می بخشد.

9- برای بهینه ساختن مقاومت به خوردگی در فلز جوش به خصوص در جوشکاری ماشینی باید این اقدامات انجام گیرد: آنیل پس از جوشکاری، تمیز کاری سطح پس از جوشکاری، اسید شویی برای بهبود مقاومت به خوردگی و پسیو کردن سطح.

فولادهای زنگ نزن سوپر فریتی

(Superferritic Stainless steels)

به فولادهای زنگ نزن آلیاژی آهن – کروم گفته می شود که برای بهبود مقاومت به حفره دار شدن در ترکیب خود مولیبدن دارند و از تیتانیم و نیوبیوم برای بهبود مقاومت به خوردگی بین دانه ای در ترکیب آن ها استفاده شده است. مزیت بزرگ این ها مقاومت بسیار بالا در برابر خوردگی تنشی کلریدی است. ساختار فریتی و مقدار کم نیکل مقاومت به خوردگی تنشی را فراهم می آورد.

پیش از ظهور روش های پیشرفته ذوب و تصفیه فلزات، فولادهای زنگ نزن فریتی مقادیر بالایی از عناصر بین نشین مانند کربن و نیتروژن داشتند که محدودیت هایی را بر روش ساخت، چقرمگی و مقاومت به خوردگی آن ها اعمال می کرد. ساخت فولاد های فریتی جدید، به خصوص آن هایی که مقدار کروم بالایی دارند، به وسیله روش های AOD، VIM و VOD امکان پذیر شده است. در این روش ها می توان فولادی با عناصر بین نشین کم تولید کرد. در مرحله تصفیه باید دقت داشت که مقدار بین نشین ها را در حد بسیار پایین نگه داشت و کربن و نیتروژن را با عناصری مانند تیتانیم و نیوبیوم به دام انداخت.

مشخصات فولادهای زنگ نزن سوپر فریتی:

– مغناطیسی و دارای ساختار کریستالی مکعبی مرکز پر

– مقاومت بالا در دمای محیط

– کار سختی کم

– سهولت جوشکاری در گریدهای کم کربن

– با عملیات حرارتی سخت نمی شوند.

– مقاوم به خوردگی تنش کلریدی

– حتی در دمای 315 درجه سانتی گراد در معرض تردی 475 درجه سانتی گراد قرار می گیرد.

– در معرض تردی هیدروژنی و انتقال نرمی به تردی قرار دارد.

ترکیب فولاد زنگ نزن سوپرفریتی

گرید های سوپرفریتی حاوی حداکثر 29 درصد کروم (گرچه گرید 18Cr-2Mo گاهی اوقات در دسته بندی سوپرفریتی قرار می گیرد)، 4 درصد مولیبدن و در برخی آلیاژها 3.5 درصد نیکل بوده و ریزساختار کاملا فریتی دارند. معروف ترین فولادهای سوپرفریتی عبارتند از) 18-SR آرمکو(، 18Cr–2Mo، 26-1S، E-Brite 26-1)آریکو و الگنی لادلوم(، 29Cr–4Mo و UNS S44735 و) 29Cr–4Mo–2Ni دوپونت(، Sea-Cure (UNS S44660حاوی 26 درصد کروم، 3٪ مولیبدن و 1٪ نیکل هستند.

ترکیبات این آلیاژها و شکل محصولات آن ها در جداول زیر آورده شده است. بادوام ترین آلیاژهای سوپرفریتی آلیاژهای 29–4 (UNS S44735) و آلیاژ Sea-Cure (UNS S44660) هستند. هر دو دارای تیتانیم و نیوبیوم هستند که برای پایدار سازی مقدار کربن و نیتروژن به ترکیب اضافه شده اند.

ترکیب اسمی چند فولاد زنگ نزن فریتی / سوپرفریتی							
سایر عناصر	N2	Mo	Ni	Cr	C	آلیاژ	شماره UNS
Ti, 1Si0.42Al,	0.020	–	0.5	18	0.05	18-SR	S43035
0.4 Ti, 0.3 Nb	0.020	2	–	18	0.02	2–18	S44400
Ti0.5	0.015	1	0.5	26	0.01	1–26	S44625
0.10 Nb	0.015	1	–	26	0.003	E-Brite	S44627
Ti0.4	0.025	3	2.5	26	0.01	Sea-Cure	S44660
Nb+Ti	0.025	4	4	25	0.025	Monit	S44635
Ti, 0.2Nb0.4	0.020	4	0.3	29	0.02	C4–29	S44735
–	0.020	4	2	29	0.01	2–4–29	S44800

عدد مقاومت به حفره دار شدن برای چند فولاد زنگ نزن سوپرفریتی				
	ترکیب مورد نیاز برای محاسبه PREN			
PREN	Mo	Cr	نامگذاری UNS	آلیاژ
29.3	1	26	S44625	1–26
29.3	1	26	S44627	E-Brite

35.9	3	26	S44660	Sea-Cure
38.2	4	25	S44635	Monit
42.2	4	29	S44735	C4-29Al
42.2	4	29	S44800	2-4-29Al

PRE_N٪=Cr+3.3(%Mo)

مشخصات ASTM/ASME برای فولادهای سوپر فریتی گرید لوله های مبدل حرارتی			
گرید	عدد UNS	مشخصات ASTM برای لوله ها	ASME Sec. VIII, Div.1
Sea-Cure	S44660	A268, A803	SA268, SA803
2-4-29Al	S44800	A268	SA268
C4-29Al	S44735	A268	Code case 1921
Monit	S44635	A268	Code case 1900
E-Brite	S44627	A268	SA268

در جدول 13.22 نام آلیاژهای تجاری، سوپرفریتی، سوپر آستنیتی و دوپلکس آورده شده است.

نامگذاری UNS آلیاژهای سوپر فریتی و سوپر آستنیتی، نام های تجاری و سازندگان		
نامگذاری UNS	نام تجاری ثبت شده	سازندگان
S44635	Monit	Uddeholm Steel Corp.
S44627	E-Brite	Allegheny Ludlum Steel Corp.
S44735	AL 29-4C	Allegheny Ludlum Steel Corp.
S44660	Sea-Cure	Trent Tube Div. of Colt Ind., Crucible Steel Co.
S44800	AL 29-4-2C	Allegheny Ludlum Steel Corp.
S31254	254 SMO	Avesta Jarnverks AD
N08904	AL 904L	Allegheny Ludlum Steel Corp.
N08366	AL-6X	Allegheny Ludlum Steel Corp.
N08367	AL-6XN	Allegheny Ludlum Steel Corp.
N08925	1925hMo, 25-6MO	VDM Technologies, Inco-Alloys Internationals
N08026	20Mo-6	Carpenter Technology

کاربرد فولاد زنگ نزن سوپر فریتی

فولادهای سوپرفریتی کاربردهای زیادی در لوله کشی کندانسورهای نیروگاه و مبدل های حرارتی حاوی محلول های کلریدی، آب دریا و آب شور پیدا کرده اند. تیپ های18Cr–2Mo E-Brite 26-1 ، Sea-Cureو AL 29-4 در صنایع شیمیایی و پتروشیمی و هم چنین کاربردهای مرتبط با آب دریا استفاده می شوند. آلیاژ E-Brite 26-1 به دلیل مقدار کروم بالا در دماهای بالا مقاومت خوبی را نسبت به اکسیداسیون و سولفیداسیون ار خود نشان می دهد. آلیاژ E-Brite در پیش گرمکن ها و رکوپراتورها مورد استفاده قرار می گیرد.

خواص فیزیکی فولادهای زنگ نزن فریتی

فولادهای زنگ نزن فریتی دو ویژگی فیزیکی دارند که از اهمیت زیادی برخوردارند:

1- هدایت حرارتی فولاد زنگ نزن فریتی 50 درصد بیش از فولادهای زنگ نزن آستنیتی و برابر با نصف هدایت حرارتی فولادهای کربنی است.

2- ضریب انبساط حرارتی پایین که تقریبا برابر با فولاد کربنی است و 30 درصد کمتر از فولاد زنگ نزن 304

- استحکام:

استحکام فولادهای زنگ نزن فریتی به شکل زیر با فولادهای زنگ نزن آستنیتی مقایسه می شود:

1- تنش تسلیم در شرایط آنیل شده 20 تا 40 درصد بیشتر از فولادهای زنگ نزن آستنیتی است.

2- نرخ کارسختی فولادهای فریتی کمتر است.

3- در دمای بالا، فولادهای فریتی استحکام کمتری نسبت به فولادهای آستنیتی دارند اما مقاومت به اکسیداسیون آن ها بسیار خوب است.

- چقرمگی و پدیده های تردی

چقرمگی فولادهای زنگ نزن فریتی از سه مکانیزم تردی تاثیر می پذیرد:

1- تردی 885 درجه فارنهایت یا 475 درجه سانتی گراد

2- رسوب فاز سیگما

3- تردی دما بالا

هر یک از شرایط فوق شکل پذیری و چقرمگی فولادهای زنگ نزن فریتی را در دمای اتاق کاهش می دهد. و بنابراین محدودیت هایی باید به سازنده و مصرف کننده در استفاده از عملیات متنوع مانند شکل دهی گرم، لحیم کاری، جوشکاری و عملیات حرارتی تحمیل شود تا فرار گرفتن در معرض حرارت به حداقل برسد .

تردی 475 درجه یا 885درجه فارنهایت:

فولادهای زنگ نزن فریتی به جز گرید 409، هنگامی که در معرض دمای 720 تا 950درجه فارنهایت 40)تا 540 درجه سانتی گراد (قرار می گیرند، نسبت به تردی حساس می شوند .بیشترین مقدار سخت شدن و تردی در دمای 885درجه فارنهایت در نتیجه تشکیل و رسوب فاز اولیه آلفا رخ می دهد که رسوب همدوس غنی از کروم در شبکه غنی از آهن است .در نتیجه افزایش سختی و استحکام کششی، به همراه کاهش داکتیلیته و مقاومت به ضربه دیده می شود .این پدیده در فولادهایی با درصد کروم بیش از 12درصد مشاهده می شود.

به منظور غلبه کردن بر این شکل از تردی در هنگام فرآیند، سرمایش سریع در محدوده دمای 700 تا 950درجه فارنهایت نیاز است .در نتیجه فولادهای زنگ نزن فریتی جدید یا قدیمی نباید در معرض این محدوده از درجه حرارت قرار گیرند .تردی 475 درجه سانتی گراد 885)درجه فارنهایت (ضخامت بسیاری از این آلیاژها را به 3 میلی متر in 0.125).) محدود می کند به همین دلیل نمی توان از آن ها در مقاطع ضخیم استفاده کرد. اگر چه می توان از این فولادها برای لوله های مبدل حرارتی جدار نازک یا آستر استفاده کرد.

رسوب فاز سیگما:

فاز سیگما در فولادهای فریتی با درصد بالاتر کروم (15 تا 20 درصد) هنگامی رخ می دهد که برای مدت طولانی در معرض دمای 1100 تا 1500 درجه فارنهایت قرار می گیرند. رسوب در دمای اتاق منجر به تردی دمای اتاق و کاهش مقاومت به خوردگی می شود. تشکیل فاز سیگما با انتخاب ترکیب مناسب به طور کامل متوقف می شود یا به حداقل خود می رسد یا ممکن است فاز سیگما با عملیات حرارتی مناسب و کوئنچ در آب یا سرمایش سریع به فاز آستنیتی انتقال پیدا کند.

تردی دمای بالا:

هنگامی که فولادهای زنگ نزن با درصد متوسط و بالای عناصر درون شبکه ای تا حدود 1000 درجه سانتی گراد گرم شده و تا دمای اتاق سرد می شوند، رسوب کاربید و نیترید می تواند منجر به تردی و حساسیت به خوردگی بین دانه ای به خصوص در آلیاژهای دارای مقادیر بالای عناصر بین نشین شود.

انتقال نرمی به تردی:

فولادهای زنگ نزن سوپرفریتی با ساختار کریستالی bcc انتقال نرمی به تردی را نشان می دهند که برای بسیاری از گریدها نزدیک به دمای اتاق است. عناصر بین نشینی کربن و نیتروژن بر دمای انتقال نرمی به تردی اثر می گذارند. مقدار کم عنصر بین نشین در دمای انتقال نرمی به تردی پایین و چقرمگی خوب در دمای اتاق نقش دارد. به همین دلیل تمام فولادهای زنگ نزن فریتی، مقدار عناصر آلیاژی کمی دارند که با روش های ذوب ویژه بدست می آیند. این گریدهای جدید به شکل ورق و لوله از چقرمگی قابل قبولی برخوردارند و بنابراین این آلیاژها معمولا در مقاطع نازک مانند لوله، لوله لایت وال، ورق و نوار استفاده می شود. اگرچه، فولادهای سوپر فریتی تولید شده به روش VIM مقدار بسیار کمی کربن و نیتروژن دارند و بنابراین چقرمگی آن ها بهبود یافته است. این مواد معمولا تا ضخامت ورق 0.50 اینچ یا 12.7 میلی متر استفاده می شوند.

مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن فریتی

به دلیل آنکه مقدار کم فولادهای زنگ نزن فریتی در محدوده 11 تا 29 درصد است، مقاومت به خوردگی عمومی می تواند از متوسط تا عالی تغییر کند. یک ویژگی مهم فولادهای زنگ نزن فریتی مقاومت آن ها به خوردگی تنشی کلریدی است. به دلیل آنکه فولادهای آستنیتی به شدت در معرض خوردگی تنشی قرار می گیرند، فولادهای فریتی جایگزینی مقرون به صرفه نسبت به آلیاژهای پایه نیکل برای کاربردهایی هستند که به مقاومت به خوردگی تنشی نیاز دارند. فولادهای زنگ نزن سوپرفریتی مقاومت فوق العاده ای نسبت به کلریدها، قلیاها، اسید نیتریک، کاربامات آمونیوم/اوره، آمین ها و اسیدهای ارگانیک دارند. افزودن مولیبدن مقاومت در برابر خوردگی حفره دار شدن را با تولید لایه پسیو پایدارتر افزایش می دهد. عدد PRE با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود.

خوردگی بین دانه ای در فولادهای زنگ نزن فریتی

یک مانع بزرگ در استفاده از فولادهای زنگ نزن فریتی حساسیت آن ها به خوردگی بین دانه ای است. هنگامی که فولادهای زنگ نزن فریتی به دلیل جوشکاری یا عملیات حرارتی نامناسب در معرض دمای 1800 درجه فارنهایت ($982^{\circ}C$) و این مسئله آن ها نسبت به خوردگی بین دانه ای حساس می کند. مکانیزمی که مسئول خوردگی بین دانه ای است معمولا مشابه با فولادهای زنگ نزن آستنیتی است. این مسئله با آلیاژسازی با تیتانیم یا نیوبیوم و تشکیل کاربیدهای این عناصر برطرف می شود. کاهش مقدار کربن به کمتر از 0.03 درصد که در فولادهای زنگ نزن آستنیتی وجود دارد، موثر نیست. حتی زمانی که بیشترین مقدار کربن 0.01 درصد است نیاز به افزودن عناصر پایدارکننده کاربید وجود دارد.

قابلیت ساخت فولادهای زنگ نزن فریتی

شکل پذیری و چقرمگی فولاد های زنگ نزن فریتی در دمای اتاق کم است. توالی عملیات ساخت و طراحی باید به گونه ای باشد که چقرمگی و شکل پذیری نسبتا کم ماده را در دمای اتاق در نظر بگیرد. عملیات شکل دهی سرد نیز باید با شکل پذیری و چقرمگی این فولادها تناسب داشته باشد.

جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی

دو عدد از بهترین فاکتورهایی که در ایجاد جوش های خوب در فولادهای سوپرفریتی نقش دارند، عبارتند از: 1) حفظ خلوص آلیاژ و 2) عدم تغییر ساختار فریتی فلز جوش با عملیات حرارتی.

فولادهای زنگ نزن سوپرفریتی نیز مشکل فولادهای فریتی معمولی را در رابطه با رشد دانه در منطقه HAZ، خشن شدن دانه ها در فلز جوش پس از جوشکاری و کاهش مقاومت به خوردگی به دلیل حساس شدن و رسوب فاز سیگما دارند. مشکلاتی که در حین جوشکاری فولادهای زنگ نزن فریتی به وجود می آید عبارتند از:

- رشد دانه
- دانه های خشن فلز جوش

- کاهش استحکام ضربه

- کاهش مقاومت به خوردگی به دلیل حساس شدن و رسوب فاز سیگما

- به دلیل اینکه این فولادها به شدت مغناطیسی هستند در جوشکاری در معرض وزش قوس قرار دارند.

اقدامات زیر به کاهش برخی از این مشکلات کمک می کند:

- جوشکاری TIG با حفاظ و پشت بندی مناسب

- آماده سازی جوش با تمیز کاری بسیار زیاد

- جوشکاری خودکار یا پر کننده متناسب

- کاهش حرارت ورودی برای حداقل کردن رشد دانه

از آنجایی که کیفیت این فولادها از مقدار کربن و نیتروژن کم آن ها ناشی می شود، ضروری است که حذف این عناصر در هنگام جوشکاری جلوگیری شود زیرا ریسک تشکیل نیترید و کاربید کروم وجود دارد که در نهایت منجر به کاهش مقاومت به خوردگی می شود. هم چنین باید از حذف اکسیژن و هیدروژن نیز جلوگیری کرد. محافظ کامل با گاز هلیم یا آرگون خشک ضروری است. برای یک جوش موفقیت آمیز تمیزکاری و حفاظت با گازهای خنثی ضروری است به ویژه هنگامی که از پرکننده مناسب استفاده می شود.

ورودی کم حرارت برای محدود کردن رشد دانه از اهمیت ویژه برخوردار است. مشکلات مربوط به رشد دانه می تواند با استفاده از مواد پرکننده آستنیتی کاهش یابد. علاوه بر این می توان با کاهش دمای پیش گرمایش به 200 درجه سانتی گراد نیز استفاده کرد. فولادهای فریتی نسبت به فولادهای آستنیتی کمتر نسبت به عیوب جوش مستعد هستند اما حساست به شیار آن ها هر عیب موجود را بسیار مضر می سازد. بنابراین باید تمهیداتی در نظر گرفته شود تا از سوختگی کناره جوش یا نفوذ اندک جلوگیری شود و بازرسی کامل جوش باید انجام گیرد.

آلیاژهای آلومینیم در مبدل حرارتی

(Aluminium Alloys in heat exchangers)

به دلیل ترکیب منحصر به فردشان به کار گرفته می شوند. این آلیاژها به یکی از کاربردی ترین و اقتصادی ترین مواد برای به کار بردن در مبدل های حرارتی تبدیل شده اند. خواصی که استفاده از آلومینیم را برای مبدل های حرارتی مناسب می کند عبارتند از:

1- سبک و با استحکام ویژه بالا. این ویژگی به طراحان مبدل حرارتی خودرو امکان طراحی مبدل های حرارتی ارزان و فشرده را نسبت به مبدل های مسی و برنجی قدیمی می دهد.

2- هدایت حرارتی بالا. هدایت حرارتی آلومینیم خالص 60 درصد مس خالص است.

3- مقاومت به خوردگی اتمسفری و محیط هایی مانند آب شیرین، آب شور و بسیاری از مواد شیمیایی و محلول های آن ها.

4- بسته به نوع تمپر، این آلیاژها می توانند به صورت گرم یا سرد شکل دهی شوند و به اشکال مختلف درآیند.

5- توانایی اتصال با جوشکاری، لحیم کاری و لحیم برنجی.

6- محصولات روکش آلومینیم آلیاژهای پایه را از خوردگی حفره دار شدن محافظت می کند.

7- آن ها چقرمگی و استحکام را حفظ کرده و هدایت حرارتی بالایی را در دماهای زیر صفر نشان می دهد. آلومینیم استحکام عالی و شکل پذیری خود را حتی در دمای 196− درجه سانتی گراد نیز حفظ می کند. هم چنین این آلیاژها هدایت حرارتی بالایی را در دماهای برودتی نشان می دهند. برای کاربردهای برودتی، آلیاژ آلومینم 3003 معمولا برای ورق های جداکننده، پره های شیاردار و میله های جانبی به کار می روند که بدنه مبدل حرارتی صفحه پره (PFHE) را تشکیل می دهند. کلگی و نازل ها از آلیاژهای آلومینیم 3003، 5154، 5083، 5086 یا 5454 استفاده می شود.

8- این آلیاژها خاصیت بهداشتی و غیر سمی دارند.

9- غیر مغناطیسی هستند و جرقه تولید نمی کنند.

10- به اشکال مختلف با قیمت مناسب در درسترس هستند.

آلومینیوم فلز فعالی است. این فلز به دلیل انتقال حرارت بالا (188 kcal/m °C h)، سبک بودن (ρ= 2.7 g/cc)، مقاومت به خوردگی و قیمت مناسب شناخته شده است. چگالی آلومینیم یک سوم فولاد است که نسبت استحکام به وزن بالایی را ایجاد می کند. آلومینیم تمپر نشده با خلوص تجاری استحکام کششی 89,622 (13000 lb/in kPa) دارد و عملیات کار سرد می تواند استحکام را دو برابر کند. خواص مکانیکی ضعیف را می توان با آلیاژسازی بهبود بخشید. عناصر آلیاژی معمولی شامل منیزیم، منگنز، روی، مس و سیلیسیم می شوند .با استفاده از کار سرد، عملیات حرارتی و پیرسازی می توان استحکام آلومینیم را تا lb in/100,000 یا 689,476 kPa افزایش داد. با افزودن مس به اندازه 1.9٪–6٪ (سری 2000)، خواص عملیات حرارتی از فولاد کربنی متوسط پیشی می گیرد.

آلیاژهای آلومینیم مقاومت زیادی به خورگی در بسیاری از محیط های اتمسفری، آب و بسیاری از مواد شیمیایی مقاوم است. آلیاژهای آلومینیوم غیر سمی هستند و می توان آن ها را در صنایع غذایی، نوشیدنی و داروسازی به کار برد. این آلیاژها بی رنگ بوده و می توان آن را با مواد شیمایی و سایر مواد بدون نیاز به از بین بردن رنگ استفاده کرد. محصولات خوردگی آن ها خطری برای محیط زیست ندارد. قطعات آلومینیمی توسط بسیاری از فرآیندهای اتصال فلزات به یکدیگر متصل و ساخته می شوند. آلومینیم برای کاربردهای برودتی عالی است و بسیاری از آلیاژهای آلومینیم در دمای (268-212 درجه سانتی گراد) استحکام های تسلیم و نهایی بالاتری نسبت به دمای محیط دارند. سایر خواص آلومینیم و آلیاژهای آن برای کاربرهای خاص عبارتند از هدایت الکتریکی بالا، انعکاس بالا و خاصیت غیرمغناطیسی که پایداری قوس را تضمین می کند.

محدودیت های آلومینیم

محدودیت های آلومینیم عبارتند از:

1- آلومینیم و آلیاژهایش به سرعت استحکام خود را در دمای بالاتر از 100 درجه سانتی گراد از دست می دهند، آلومینیم به خوبی سایر آلیاژها در برابر آتش مقاومت نمی کند. آلومینیم در فرآیند PFHE در دماهای بالاتر از 150 درجه سانتی گراد مورد استفاده قرار نمی گیرد به ویژه در کاربردهایی که فشار بالایی دارند.

2- آلومینیم به آسیب های ناشی از حمل و نقل، ارتعاش زیاد و تنش های رها نشده موضعی حساس است.

دسته بندی آلیاژهای ریختگی آلومینیم

آلیاژهای ریختگی دو نوع هستند: غیر قابل عملیات حرارتی سری های xxx1، 3xxx، 4xxxو xxx5، و قابل عملیات حرارتی xxx2، 6xxxو 7 .xxxدر سری هایی که قابلیت عملیات حرارتی ندارند، مقاوم سازی با کرنش سختی ایجاد می شود. تمام آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی مقاومت بالایی به خوردگی عمومی دارند. آلیاژهای آلومینیم سری 1 xxxنماینده آلومینیم غیر آلیاژی بوده و استحکام پایینی دارند. آلیاژهای سری 3 xxxویژگی های

مطلوب مشابهی با سری 1 xxxو حتی استحکام بیشتری دارند. آلیاژهای ریختگی معمول و ترکیب آن ها در جدول زیر آمده است.

ترکیب اسمی برخی از آلیاژهای ریختگی معمول آلومینیم							
		ترکیب (درصد)					
نامگذاری	Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Al
1100	0.05	0.25	0.03	0.03	0.05	0.03	٪99 (min)
3003	0.12	0.6	1.2	—	0.1	—	باقی مانده
3004	0.25	0.30	1.2	1.0	0.25	—	باقی مانده
3005	0.30	0.60	1.2	0.4	—	—	باقی مانده
5005	0.20	0.30	—	0.8	—	—	باقی مانده
5050	0.20	0.40	—	1.2	—		باقی مانده
5052	0.10	0.25	0.10	2.5	0.10	0.25	باقی مانده
5083	0.10	0.40	0.70	4.5	0.25	0.15	باقی مانده
5154	0.10	0.25	0.10	3.5	0.20	0.25	باقی مانده
5454	0.10	0.25	0.75	2.7	—	0.12	باقی مانده
5456	0.10	0.25	0.8	5.1	0.25	0.1	باقی مانده
6061	0.25	0.6	0.15	1.0	0.25	0.20	باقی مانده
6063	0.10	0.4	0.10	0.7	0.10	0.10	باقی مانده
7005	0.10	0.35	0.45	1.4	4.5	0.13	باقی مانده
7072	1.00	0.35	0.40	0.10	1.0	—	

سری xxx1 : این گرید از آلومینیم با 99 درصد خلوص مقاومت به خوردگی عالی، هدایت حرارتی و الکتریکی، شکل پذیری عالی را نشان می دهد. این آلیاژها با همه روش ها جوشکاری و لحیم کاری می شوند و عملیات

حرارتی نمی شوند. افزایش ملایم استحکام می تواند با کرنش سختی به دست آید. آن ها به عنوان بدنه پره ها در مبدل های حرارتی به کار می روند.

سری xxx2 : این آلیاژها بر پایه مس هستند. مقدار مس در محدوده ۱.۹٪–6٪. قرار دارد. این آلیاژها قابلیت عملیات حرارتی داشته و نسبت به سایر آلیاژهای آلومینیم نسبت به حمله های خورنده حساس ترند. ویژگی های آلیاژهای عملیات حرارتی شده از فولاد کربن متوسط بیشتر است. جوشکاری ذوبی پیشنهاد نمی شود اما جوشکاری مقاومتی توصیه می شود.

سری xxx 3 : مهمترین عنصر آلیاژی منگنز با ماکزیمم مقدار 1.5 درصد است. این آلیاژهای قابلیت عملیات حرارتی ندارند. آن ها استحکام متوسطی داشته، مقامت به خوردگی خوب و قابلیت کارپذیری و شکل پذیری خوبی دارند و در مخازن تحت فشار و مبدل های حرارتی لحیمکاری شده استفاده می شوند. آلیاژهای 3003، 3004 و 3105 به طور گسترده به عنوان آلیاژ همه منظوره برای کاربردهای با استحکام متوسط که به شکل پذیری و کارپذیری خوبی نیاز دارند، استفاده می شوند. استحکام آلیاژ 3003 بالاتر از آلیاژ 1100 است و آلیاژ 3004 استحکام بیشتری از 3003 دارد. آلیاژ 3004 برای اندازه دانه ریز و عدم رشد بحرانی اندازه دانه شناخته شده است.

سری xxx4 : بزرگترین عنصر آلیاژی سیلیسیم است. این سری غیر قابل عملیات حرارتی هستند و اغلب برای جوشکاری و لحیمکاری به عنوان فلز پر کننده با سیلیسیم کافی برای کاهش دمای ذوب به کار می روند. به عنوان مثال 4343 حاوی 7.5 درصد سیلیسیم و 4045 حاوی 10.5 درصد سیلیسیم به عنوان ورق لحیمکاری روکش استفاده می شوند. آلیاژ پایه xxx3 یا xxx6 است.

سری xxx5: آلیاژهای سری (Al–Mg) مستحکم ترین آلیاژهای آلومینیم هستند که قابلیت عملیات حرارتی ندارند. در بسیاری از محصولات، استفاده از سری اقتصادی تر از آلیاژهای سری xxx1 و xxx3 است. آلیاژهای سری xxx5 مقاومت بالایی به خوردگی عمومی و اتمسفرهای دریایی دارند. شناخته شده ترین گریدهایی که قابلیت جوشکاری دارند عبارتند از 5083، 5052 و 5454. کاربردهای متعدد این آلیاژها در مخازن تحت فشار و کاربردهای تبریدی بوده است. این آلیاژها معمولا به شکل ورق و پلیت در دسترس هستند. آلیاژهایی با مقدار منیزیم بیش از 3.5 درصد دچار ترک گرم نمی شوند. به دلیل لایه های اکسیدی ضخیم، باید آماده سازی سطح را مد نظر داشت. این آلیاژها به خوبی لیحمکاری نمی شوند.

سری xxx6: این آلیاژها حاوی سیلیسیم و منیزیم هستند که قابلیت انجام عملیات حرارتی را به آلیاژها می دهد. در مقایسه با سایر آلیاژهای آلومینیم، این سری مقاومت زیادی در نواحی روستایی و مقاومت خوبی در نواحی صنعتی و دریایی دارند. این سری دارای مقاومت به خوردگی تنشی دارند. این آلیاژها از قابلیت شکل پذیری، ماشین کاری و جوشپذیری خوبی برخوردارند. خواص مکانیکی آلیاژهای قابل عملیات حرارتی سری xxx6 نسبت به آلیاژهای سری xxx3 برتری دارند. استحکام تسلیم سری xxx6 در مقایسه با آلیاژهای سری xxx3 پس از عملیات حرارتی چهار یا پنج برابر بیشتر است. استحکام بالاتر برای سازندگان رادیاتور مطلوب است. این ویژگی به کاهش ضخامت دیواره لوله ها و در نتیجه کاهش وزن و هزینه مواد کمک می کند. اما معایب سری xxx6 دمای ذوب پایین و حساسیت به نفوذ سیسلیم از روکش به پایه است.

آلیاژهای سری xxx6 : می تواند لحیمکاری شوند و مقاومت نقطه جوشکاری قابل قبول است. آلیاژ 6061 شناخته شده ترین آلیاژ با قابلیت جوشکاری است. T6رایج ترین عملیات حرارتی برای آلیاژ 6061 است، اگرچه عملیات حرارتی T651، T4 و F نیز به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. آلیاژهای سری xxx6 مستعد ترک گرم هستند. اگرچه این مشکل می تواند با انتخاب فلز پر کننده و طراحی اتصال مناسب برطرف شود. توجه به طراحی اجزا و اتصالات نیز به دلیل کاهش استحکام ناحیه HAZ مورد نیاز است. استحکام ناحیه HAZ می تواند به وسیله عملیات حرارتی پس از جوش بهبود یابد.

سری xxx7: این آلیاژها حاوی 1 تا 8 درصد روی و درصد کمی از Mg، Cu و Cr هستند. این آلیاژها قابلیت عملیات حرارتی دارند. آلیاژ 7072 به طور گسترده در پوشش های آندی لوله ها و ورق های لحیم کاری از جنس 3003، 5505، 6061، 6951، 7075 و 7178 استفاده می شود.

سیستم نامگذاری تمپر آلومینیم و آلیاژهای آن

سیستم نامگذاری تمپر برای مشخص کردن شرایط محصول مورد استفاده قرار می گرفت. این سیستم بر اساس توالی عملیات مکانیکی یا حرارتی یا هر دو است که برای ایجاد عملیات تمپر مختلف به کار می رود. نامگذاری تمپر به این صورت است که نامگذاری آلیاژ ابتدا نوشته می شود و عملیات حرارتی با خط تیره از آن جدا می شود. آلیاژهای آلومینیم به 4 شکل تمپر می شوندF:، O، Hو .T ارقام نشان دهنده توالی عملیات حرارتی هستند به عنوان مثال 7075 .T651–نامگذاری پایه تمپر در جدول زیر نمایش داده شده است.

نامگذاری تمپرهای پایه برای آلیاژهای آلومینیم	
شرایط	نامگذاری
بدون عملیات حرارتی	F
آنیل شده، نرم ترین تمپر	O
کرنش سختی شده	H
تنها کرنش سختی شده	H1
کرنش سختی و اندکی آنیل شده	H2
کرنش سختی و پایدارسازی حرارتی	H3
اشکال عملیات حرارتی: عملیات حرارتی برای ایجاد کارپذیری مورد نیاز، پایداری ابعادی و استحکام	T (T1–T12)
عملیات حرارتی محلول سازی	W

اشکال آلیاژهای آلومینیم

آلومینیم در اشکال متفاوتی تولید و در دسترس قرار می گیرد که شامل تیوب های مبدل حرارتی (ساده و پره دار)، پلیت و ورق، میله، تیر و اکستروژن می شود. برخی از مشخصات ASTM برای تیوب ها، پلیت ها و ورق ها در جدول زیر آورده شده است.

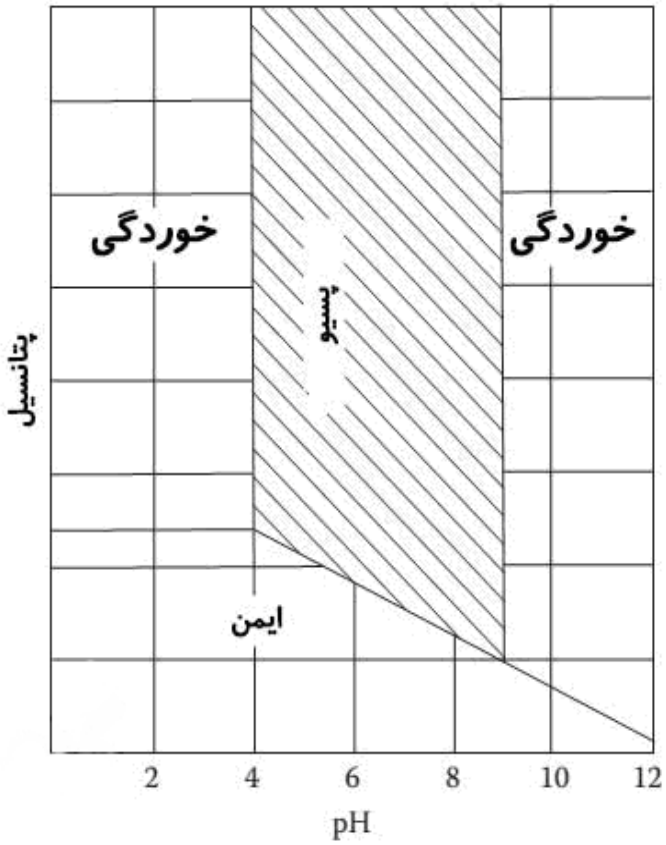
ورق ها پلیت ها و تیوب های آلیاژ آلومینیم برای مبدل حرارتی		
نامگذاری UNS آلیاژها	توضیحات	مشخصات ASTM
1060, 3003, Alclad 3003, 5052, 5454, 6061, 7072	لوله های بدون درز کششی برای کندانسورها و مبدل های حرارتی	تیوب مبدل حرارتی B234
1060, 1100, 3003, Alclad 3003, 3004, Alclad 3004, 5050, 5052, 5083, 5086, 5154, 5254, 5454, 5456, 5652, 6061, Alclad 6061	ورق ها و پلیت های آلومینیم و آلیاژهای آلومینیم	ورق ها و پلیت های آلومینیم B209

اطلاعات مربوط به لوله ها، میله ها، تیرها، اکستروژن ها و فروجینگ ها در جدول زیر آورده شده است.

لوله ها، میله ها، تیرها، اکستروژن ها و فورجینگ ها	
مشخصات ASME	مشخصات ASTM
SB210	لوله های بی درز کششی از آلومینیم و آلیاژ آلومینیم
SB211	سیم، میله و تیر آلومینیم و آلیاژ آلومینیم
SB221	لوله ها، اشکال، سیم ها، میله ها و تیرهای اکسترود شده آلومینیم و آلیاژ آلومینیم
SB241	لوله های اکسترود شده بی درز و اکسترودهای کشیده شده
SB247	فورجینگ های آلومینیم و آلیاژهای آن
SB308	اشکال استاندارد آلیاژ آلومینیم 6061—T6

خوردگی آلیاژهای آلومینیم

بررسی خوردگی آلیاژهای آلومینیم مستلزم بررسی طبیعت شیمیایی آلـومینیم اسـت. آلـومینیم فلـز فعـالی اسـت کـه مقاومـت آن بـه خـوردگی بـه پسـیو شـدن بـا لایـه سـطحی محـافظ بسـتگی دارد. در محلـول هـای آبـی، شـرایط ترمودینامیکی که تحت آن لایه رشد می کند معمولا با دیاگرام پتانسیل – pH پوربه نمایش مـی دهنـد. ایـن نمـودار نشان می دهد که آلومینیم تنها در محـدوده برابـر بـا 4 pHتـا 9 پسـیو اسـت. اکثـر آلیاژهـای آلـومینیم مقاومـت بـه خوردگی به اتمسفر طبیعی، آب شیرین، آب شور، بسیاری از روغـن هـا و مـواد شـیمایی و هـم چنـین مـواد غـذایی دارند. لوله های آلومنیمی در خنک کننده های فریونی مورد استفاده قرار می گرفتند.



خوردگی آلیاژهای آلومینیم در آب

آلیاژهای سریxxx1 ، xxx3، xxx5و xxx6 مقاومت به خوردگی را در آب های با خلوص بالا، آب های طبیعی و آب دریا نشان می دهند. هنگامی که این آلیاژها برای نخستین بار در معـرض آب بـا خلـوص بـالا قـرار مـی گیرنـد، واکنش ملایمی رخ می دهد اما با گذشت زمان و تشکیل لایه محافظ اکسیدی سرعت واکنش کاهش می یابد.

آلیاژهای آلومینیم از سری های xxx1 ،xxx3، xxx5 و xxx6 مقاومت خوبی به اکثر آب ها طبیعی نشان می دهنـد. اگر خوردگی رخ دهد، به شکل حفره دار شدن خواهد بود. اجزای اصلی آب طبیعی که منجـر بـه خـوردگی حفـره دار شدن آلومینیم می شوند، یون های مس، بی کربنات، کلراید، سولفات و اکسیژن هستند.این آلیاژها در آب هـای سخت تمایل بیشتری به حفره دار شدن دارند.

اشکال خوردگی آلیاژهای آلومینیم

-خوردگی یکنواخت:

اکثر آلیاژهای آلومینیم مقاومت عالی به خوردگی اتمسفری دارند. اگر لایه اکسید سطحی در محیط محلول مانند اسید فسفریک یاهیدروکسید سدیم، آلومینیم قرار بگیرد، به طور یکنواخت و پیوسته حل می شود.

- خوردگی گالوانیک:

آلومینیم و آلیاژهایش نسبت به سایر فلزات به جز روی و منیزیم آندی هستند. در محیطی که آلومینیم در معرض حفره دار شدن قرار دارد باید از اتصال آلومینیم با فلزات کاتدی تر جلوگیری کرد. معروف ترین مثال خوردگی گالوانی آلیاژهای آلومینیم در حین کار هنگامی است که آن ها در تماس با فولاد یا مس بوده و در معرض محیط مرطوب شور قرار گیرند. هم چنین استفاده از مس در مخازن آلومینیم و مبدل های حرارتی مورد استفاده در سیستم های خنک کننده آب مطلوب نیست زیرا حضور چند بخش در میلیون مس در آب ورودی احتمال حفره دار شدن آلومینیم را افزایش می دهد.

موقعیت آلومینیم در سری گالوانی که آلومینیم و آلیاژهایش را نسبت به به اکثر فلزات آندی می کند، سبب می شود تا از این فلز به عوان آند فدا شوند برای حفاظت کاتدی از آلیاژ پایه استفاده شود.

- حفره دار شدن:

از آلیاژهای تجاری، سری های xxx1، xxx3 و xxx5 مقاومت به حفره دار شدن عالی دارند. اگرچه، با مقدار مس بیشتر از 0.04 درصد، آلیاژهای سری xxx3 به حفره دار شدن حساس هستند. در 0.15٪ مس، این آلیاژها به خصوص در آب دریا بیشتر دچار حفره می شوند. آلیاژهای xxx2، xxx6 و xxx7 معمولا روکش می شوند تا در برابر حفره دار شدن حفاظت شوند.

عوامل موثر بر خوردگی حفره دار شدن:

حفره دار شدن معمولا به دلیل حضور مس، جیوه و یون های هالید است که کلرید مخرب ترین آن هاست و معمولا در محل کار وجود دارد.

می توان با حذف عوامل کاهنده مورد نیاز برای واکنش کاتدی از حفره دار شدن جلوگیری کرد. در غیاب اکسیژن محلول یا سایر واکنشگرهای کاتدی، آلومینیم دچار حفره نمی شود زیرا به پتانسیل حفره دار شدن نمی رسد. حفره دار شدن در محلول های خنثی معمولا به وسیله اکسیژن ایجاد می شود.

رفتار خوردگی:

سرعت حفره دار شدن آلومینیم به رفتار پلاریزاسیون بستگی دارد. مانند سایر فلزات پسیو، خوردگی آلومینیم در محدوده پسیو که pH آن 4–9 است ممکن است به صورت حفره دار شدن باشد. حفره دار شدن آلومینیم در ورای این محدوده کم شده و خوردگی به صورت یکنواخت پیش می رود.

خوردگی تنشی:

خوردگی SCC در آلیاژهای خالص تجاری xxx1، آلیاژهای آلومینیم – منگنز xxx3 و آلیاژهای آلومینیم – منیزیم حاوی 3 درصد منیزیم سری xxx5 و مستحکم شده با کار سرد رخ نمی دهد. در مواقع خاص، خوردگی تنشی در آلیاژهای آلومینیم – منیزیم – سیلیسیم xxx6 رخ می دهد.

آلیاژهای حساس به خوردگی تنشی:

خوردگی تنشی در آلیاژهای آلومینیم ریختگی معمولا به آلیاژهایی که حاوی مقادیر قابل توجهی عنصر آلیاژی مس، منیزیوم، سیلیسیم و روی محدود می شود. آلیاژهایی که می توان با کار سرد استحکام آن ها را افزایش داد نسبتا به خوردگی تنشی مصون هستند. آلیاژهای ریختگی که در معرض خوردگی تنشی قرار دارند شامل موارد زیر می شوند:

- سری xxx2 شامل مس با مقادیر کمتر منیزیم، منگنز و سایر عناصر هستند.
- سری xxx7 حاوی روی با مقدار کمی منیزیم، منگنز، مس و سیلیسیم هستند
- سری xxx5 که بیش از 3 درصد منیزیم دارند با یا بدون عناصر آلیاژی

در آلیاژهای آلومینیم، این ترک خوردگی بین دانه ای است. عواملی که مقاومت به خوردگی تنشی را تحت تاثیر قرار می دهند عبارتند از:

خواص جهت دار آلومینیم: خوردگی تنشی آلیاژ ریختگی آلومینیم در تمپر با اندازه و زمان اعمال تنش کششی و نیز با جهت اعمال تنش مشخص می شود. اثر تنش در جهات مختلف با ساختار جهت دار دانه که در آلیاژهای ریختگی آلومینیم معمول است، ایجاد می شود. مقاومت که با مقدار تنش کششی مورد نیاز برای ایجاد ترک اندازه گیری می شود زمانی بیشترین حد خود را دارد که تنش وارده در جهت طولی است، کمترین حد در جهت عرضی و در سایر جهات متوسط است.

محیط: آب یا بخار آب برای خوردگی تنشی آلومینیم لازم است و در غیاب آن ترک خوردگی ایجاد نمی شود. میان گونه هایی که به ترک خوردن شتاب می دهند، کلرید بیشترین اثر را دارد.

روش تست استاندارد برای تعیین حساسیت به خوردگی تنشی در آلیاژهای آلومینیم با استحکام بالا ASTM G47 است. این استاندارد حساسیت SCC آلیاژ با استحکام بالای xxx2 و xxx7 است هنگامی که جهت تنش وارده عمود بر ساختار دانه ها باشد.

پوسته شدن :

خوردگی سطحی است که از سطح آغاز شده و پخش می شود. این خوردگی در آلیاژهای آلومینیم و مس-نیکل دیده می شود. حمله با حفره دار شدن در این متفاوت است که ظاهر آن به صورت پوسته است و معمولا در طول مرزدانه ها رخ می دهد. حمله های خوردگی منجر به ورقه ورقه شدن و گاهی اوقات سطح تاول دار می شود. به دلیل لایه برداری تمام لایه های ماده خورده می شوند. انتهای نمونه مشابه با دسته ای از کارت می شود که برخی از آنها جدا شده اند.

آلیاژهای حساس به پوسته شدن:

در تمپر های خاص، محصولات ریخته گری شده آلیاژهای آلومینیم در معرض خوردگی لایه ای قرار می گیرند، که منجر به ایجاد محصولات ورقه شده می شود. این خوردگی در محصولاتی پیشروی می کند که ساختار جهت دار دارند و در آن دانه ها کشیده شده اند. آلیاژهای سری xxx2، سری xxx5 با مقادیر بالاتر منیزیم و سری xxx7 بیشتر در معرض خوردگی لایه ای قرار می گیرند.

این خوردگی در آلیاژهای ریختگی غیر قابل عملیات حرارتی مانند سری xxx1، xxx3 و تیپ های غیر قابل عملیات حرارتی xxx6 به ندرت دیده می شود. می توان برای غلبه کردن بر این مشکل از عملیات حرارتی و آلیاژ سازی استفاده کرد. روش تست استاندارد برای تعیین حساسیت به خوردگی لایه ای ASTM G34، روش تست غوطه وری برای تعیین ورقه ورقه شدن در آلیاژهای آلومینیم سری xxx2 و xxx7 یا تست EXCO است. این روش تست برای محصولات ریختگی مانند پلیت ها، ورق ها، اکستروژن ها و فورجینگ ها به کار می رود. استاندارد ASTM G66 نیز تست غوطه وری آلیاژهای آلومینیم سری xxx5 برای ورقه ورقه شدن است که به تست ASSET معروف است.

خوردگی بین دانه ای :

آلیاژهای آلومینیم که فاز ثانویه در مرزدانه ها تشکیل نمی دهند یا آلیاژهایی که در آن ها اجزای تشکیل دهنده پتانسیل خوردگی مشابه با زمینه دارند، نسبت به خوردگی بین دانه ای حساس نیستند. آلیاژهای آلومینیم مانند 1100، 3003، 3004 آلیاژهای آلومینیم – منیزیم سری xxx5 که حاوی کمتر از 3 درصد منیزیم هستند دچار خوردگی بین دانه ای نمی شوند. آلیاژهای سری xxx6 معمولا در برابر این نوع خوردگی مقاومت می کنند. عملیات حرارتی در سری xxx2، xxx5 با بیش از 3 درصد منیزیم و آلیاژهای سری xxx7 که رسوب مرزدانه در آن ها رخ می دهد به خوردگی بین دانه ای حساس هستند. درجه حساسیت به خوردگی با موارد زیر افزایش می یابد:

1- مقدار منیزیم

2- مقدار کار سرد

3- مقدار زمانی که آلیاژ در معرض دما قرار می گیرد.

مقاومت به خوردگی بین دانه ای با استفاده از عملیات حرارتی که منجر به یکنواخت تر شدن رسوب درون ساختار دانه می شود یا با محدود کردن عناصر آلیاژی که خوردگی بین دانه ای را ایجاد می کنند، حاصل می شود.

خوردگی شیاری :

خوردگی شیاری آلومینیم در آب شیرین قابل چشم پوشی است. در آب شور خوردگی به شکل حفره دار شدن رخ داده و سرعت خوردگی پایین است.

خوردگی سایشی، خوردگی حباب زایی و خوردگی برخوردی:

آلومینیم و آلیاژهایش به خوردگش حباب زایی، برخوردی و سایشی حساس هستند.

خوردگی خستگی:

آلیاژهای آلومینیم، مانند بسیای از فولادها، مقاومت کمی در برابر خوردگی خستگی دارند. خوردگی خستگی آلیاژهای آلومینیم مشخصا درون بلوری بوده و با تخریب ناشی از خوردگی تنشی متفاوت است که معمولا بین دانه ای هستند. خوردگی موضعی سطح آلومینیم افزایش تنش را ایجاد کرده و استحکام خستگی و در نتیجه عمر خستگی را به شدت کاهش می دهد.

خوردگی آلومینم در موتور دیزلی با سیستم خنک کننده آب

خوردگی یکنواخت ممکن است در برخی از مخلوط های آب/گلیکول رخ دهد که ممانعت کننده مناسب ندارند. خوردگی موضعی با شکست لایه پسیو توسط یون کلرید آغاز می شود. حفره دار شدن و خوردگی شیاری می تواند با استفاده از ممانعت کننده ها جلوگیری شود. آنیون هایی که برای کاهش اثر خوردگی رایج هستند را می توان به دو دسته تقسیم بندی کرد:

1- اکسید کننده. ممانعت کننده هایی که لایه پسیو روی سطح فلز ایجاد می کنند.

2- غیر اکسید کننده. ممانعت کننده هایی که با تشکیل رسوبات نامحلول با یون های آلومینیم به عنوان عامل مسدود کننده به کار می روند.

بنزوات، فسفات و سیلیکات مثال هایی از ممانعت کننده های غیر اکسید کننده هستند. نیترات ها و کرومات ها از ممانعت کننده های اکسید کننده هستند.

جلوگیری از خوردگی و اقدامات کنترل کننده

روش های مهم جلوگیری از خوردگی آلومینیم شامل موارد زیر می شود:

- انتخاب آلیاژ و عملیات تمپر

2- ملاحظات طراحی تجهیزات

3- ممانعت کننده ها

4- حفاظت کاتدی

5- استفاده از محصولات الکلد Alclad

6- تغییر محیط

7- ضخیم ساختن لایه اکسیدی و پوشش های آلی

- انتخاب آلیاژ و تمپر

در کل، آلیاژهای سری xxx5 آلومینیم – منیزیم بهترین مقاومت به خوردگی را دارند، پس از آن ها آلیاژهای سری xxx1، xxx3 و xxx6 با خلوص تجاری قرار دارند. آلیاژهای سری xxx2 و xxx7 معمولا لایه محافظ مانند روکش دارند. انتخاب تمپر مقاومت بهتری به خوردگی بین دانه ای و لایه لایه شدن برای آلیاژهای سری xxx5 بدست می دهد در حالی که در آلیاژهای سری xxx7 مقاومت بهتری به خوردگی تنشی ایجاد می شود.

- ملاحظات طراحی

جنبه های طراحی که رفتار خوردگی را تحت تاثیر قرار می دهند شامل انتخاب نادرست آلیاژ یا تمپر، زوج گالوانی، عدم وجود آب بندی در شیارها برای جلوگیری از خوردگی شیاری و انتخاب روش اتصال و فلز پر کننده.

- ممانعت کننده ها

فسفات ها، سیلیکات ها، نیترات ها، فلوریدها و غیره برای استفاده با آلومینم در برخی کاربردها توصیه شده است. اگر مس در سیستم های بسته مد نظر باشد، از مرکاپتوبنزوتیازول برای جلوگیری از خوردگی مس و خوردگی رسوبی آلومینیم استفاده می شود.

حفاظت کاتدی

در برخی کاربردها، قسمت هایی از آلیاژ آلومینیم به وسیله حفاظت کاتدی به وسیله آند فدا شونده یا با جریان اعمالی محافظت می شود. از آنجایی که واکنش کاتدی یون های هیدروکسیل تولید می کند، جریان این آلیاژها نباید به اندازه ای بالا باشد تا محلول را به گونه ای قلیایی کند که خوردگی قابل توجهی ایجاد کند.

آلیاژهای الکلد (Alclad)

استفاده از محصولات الکلد برای مقاومت در برابر خوردگی به خوبی ثابت شده است. آلیاژهای الکلد محصولی کامپوزیتی است که در آن لایه سطحی نازکی از آلیاژ آلومینیم (آندیک)، معمولا 5 الی 10 درصد ضخامت کل به شکل متالورژیکی با آلیاژ اصلی (کاتدیک) پیوند برقرار کرده که برای ایجاد استحکام مورد نیاز و روکش برای ایجاد ماکزیمم مقاومت به خوردگی به خصوص در برابر حفره دار شدن انتخاب می شود. اختلاف پتانسیل بین آلیاژ پایه و روکش حفاظت کاتدی را برای هسته ایجاد می کند. روکشی که معمولا استفاده می شود آلیاژ 7072 است که حاوی 1 درصد روی بوده و پتانسیل محلول آن -0.96 V است که حداقل 100 mV آندی تر از آلیاژهای هسته مانند 3003 و 6951 است. از آنجایی که روکش ها نسبت به هسته آندی هستند، خوردگی انتخابی روکش تا فصل مشترک روکش و هسته اتفاق می افتد. پس از رسیدن به فصل مشترک، خوردگی به صورت عرضی گسترش می یابد و از خوردگی موضعی جلوگیری می شود. محصولات الکلد به شکل ورق و تیوب که در یک طرف یا طرف دیگر پوشش داده شده اند، در دسترس هستند.

به عنوان مثال، تیوب های الکلد برای رادیاتورهای آلومینیمی لحیم شده برای ممانعت از خوردگی لوله در بخشی که در تماس با آب است، استفاده می شوند. ترکیب معمول محصولات الکلد معمولا در کاربردهای مبدل حرارتی مورد استفاده قرار می گیرد که در جدول زیر آورده شده است.

آلیاژهای الکلد	
آلیاژ روکش	آلیاژ پایه
7072	3003
7072یا 7013	3004 , 6061
7072	6951
7072, 7008, 7011	7075
7072	7178

تغییر محیط

چنین تغییراتی عبارتند از:

کاهش خوردگی محیط

تنظیم pH محلول

هوازدایی آب برای کاهش مقدار اکسیژن

و در نتیجه کاهش تمایل به حفره دار شدن آلومینیم

- ضخیم کردن لایه اکسید سطحی و پوشش آلی

پوشش هایی با روکش نفوذی یا پاشش حرارتی مشابه با لایه روکش عمل کرده و به صورت فدا شونده خورده می شوند تا از آلیاژ هسته محافظت کنند.

فولادهای نفوذ داده شده با آلومینیم مورد استفاده در مبدل های حرارتی پالایشگاه نفت خام

نفوذ بخار آلومینیم به سطح آلیاژهای پایه آهن یا پایه نیکل یکی از روش های حفاظت از تیوب های فولادی (نام این فرآیند آلونایزینگ است) و سایر اجزای مبدل های حرارتی از اثر مخرب اکسیداسیون دما بالا، سولفیداسیون و کربوریزاسیون است. در نتیجه، این فرآیند کاربردهای وسیعی در مبدل های حرارتی مورد استفاده در پالایشگاه های شیمیایی و پالایشگاه های نفت خام یافته است.

آلیاژهای مس مورد استفاده در مبدل های حرارتی

(Copper Alloys in Heat Exchangers)

مانند برنج های دریایی، کاپرونیکل ها (مس-نیکل)، برنزهای آلومینیم و آلیاژهای پایه نیکل، مونل در گرمکن های آب ورودی به وفور استفاده می شوند .خوردگی آن ها به وسیله آب ورودی اگرچه اندک است، احتمال مشکل حمل مس را به درون سیستم تولید بخار و احتمال انسداد واحد توربین را افزایش می دهد .با ظهور واحدهای فوق بحرانی با فشار بالا، استفاده از لوله های فولاد کربنی در گرمکن آب ورودی به منظور حذف ورود مس به سیستم تولید بخار مرسوم شد.

مواد مبدل های حرارتی به انتقال حرارت خوب، استحکام، مقاومت به خوردگی، سهولت شکل دهی به اشکال گوناگون مانند لوله ها، صفحه های لوله گیر و پره ها با فرآیندهایی مانند کشش، نورد، خمش، سوراخکاری، برشکاری، ماشین کاری و قابلیت اتصال مناسب نیاز دارد .مس و آلیاژهای مس ترکیب خوبی از این خواص را از خود نشان می دهند .به علاوه آلیاژهای مس خاصیت مهار باکتری هم دارند که خاصیت ضد جرم به آن می دهد .
سه کاربرد مهم مس و آلیاژهای مس عبارتند از:

1- لوله کشی کندانسور بخار

2- مبدل های حرارتی خودرو مانند رادیاتورها، خنک کننده هوا، خنک کننده روغن

3- کندانسورهای و اواپراتور مبرد و تهویه مطبوع.

نامگذاری آلیاژهای مس

برای ایجاد نظم در نامگذاری آلیاژهای زیاد مس، انجمن توسعه مس به همراه انجمن تست مواد آمریکا و انجمن مهندسان اتومبیل، سیستم 5 رقمی را ابداع کرده اند. این سیستم بخشی از سیستم نامگذاری یکپارچه (UNS) برای فلزات و آلیاژها است. در این سیستم شماره های C10000 تا C79999 به آلیاژهای کار شده و شماره های C80000تا C99999 به آلیاژهای ریختگی اختصاص یافته اند. آلیاژهای کار شده در سیستم UNS به گروه های زیر تقسیم می شوند.

C1xxxx : مس و آلیاژهای با مقدار مس بالا

C2xxxx : آلیاژهای مس – روی (برنج روی)

C3xxxx : برنج های دارای سرب

C4xxxx : برنج های دارای قلع

C5xxxx : برنز قلع

C6xxxx : برنز های آلومینیم، منگنز و سیلیسیم

C7xxxx : آلیاژهای مس – نیکل

مس با خلوص بالا برای مبدل های حرارتی

مس های با خلوص بالا مانندC10100 ، C10200، C10400، C10500، C10700، C10800، C11000، C11300، C11400، C11500و C11600 در این دسته قرار می گیرند. آنها حاوی حداقل 99.3٪ مس هستند. عناصری مانند نقره، آرسنیک، آنتیموان، گوگرد، فسفر، سرب، نیکل، کادمیم، زیرکونیم، منیزیم، بور و بیسموت می توانند به تنهایی یا به صورت ترکیب حضور داشته باشند. این گروه در قالب تجاری به شکل های مختلفی (مانند بدون اکسیژن) موجود هستند. به دلیل انتقال حرارت بالا، این فلزات برای پره ها، لوله ها، خنک کننده های هوا، هوا سرد کن موتور، خنک کننده روغن، کندانسور و اواپراتور تهویه مطبوع، مبردها و کویل های گرم کننده استفاده می شوند. آن ها مقاومت خوبی به خوردگی اتمسفری و گالوانی دارند.

مس های بدون اکسیژن:

مس های بدون اکسیژن شکل پذیری و مقاومت به خستگی خوبی دارند و می توانند با استفاده از روش های جوشکاری و لحیم کاری به هم متصل شوند. نقره گاهی اوقات به مس بدون اکسیژن افزوده می شود تا استحکام آن را در دمای بالا افزایش دهد.

مس های اکسیژن گیری شده با فسفر (C12000–C12300) :

مس های C12000، C12200، C12300 به این دسته تعلق دارند. به دلیل انتقال حرارت خوب، آن ها منحصرا در خنک کننده های هوا، کندانسورها و اوپوراتور در صنایع شکر و کود، مبردها و تهویه های مطبوع استفاده می شود. مس اکسیژن گیری شده در ساخت تجهیزات فرآیند به کار می رود زیرا می تواند با جوش اکسی استیلن و لحیم نقره متصل شود. مس های اکسیژن گیری شده هنگامی که در اتمسفر کاهنده در 370 درجه سانتی گراد یا بالاتر حرارت داده می شوند، مشکل تردی دارند .

مس تصفیه شده به روش آتشی:

C12500، C12700، C12800، C12900 و C13000 برای ساخت رادیاتور به کار گرفته می شوند.

آلیاژهای با مس بالا برای مبدل های حرارتی

آلیاژهای کار شده با مس بالا C19200 و C19400 حاوی حداقل 96 درصد مس هستند. ترکیب C19400 مس با 2.4 درصد آهن است. افزودن آهن استحکام و مقاومت به خوردگی را افزایش می دهد. این آلیاژها شکل پذیری خوب و لحیم کاری عالی دارند و جوشکاری قوس محافظتی و OAW خوبی دارند. آن ها نسبت به خوردگی تنشی مقاوم هستند. این آلیاژها در ابتدا به عنوان لوله کشی درز جوشی در سیستم نمک زدایی استفاده می شوند.

آلیاژ برنج برای مبدل های حرارتی

اصلی ترین عنصر آلیاژی برنج، روی است C23000 ،. C24000، C26000، C26800، C27000و C28000 به این دسته تعلق دارند. دیگر عناصر آلیاژی اصلی، سرب، قلع و آلومینیم هستند. افزودن روی به مس نقطه ذوب، چگالی و هدایت حرارتی و مدول الاستیسیته را کاهش داده است. این کار استحکام، سختی، ضریب انبساط حرارتی را افزایش می دهد. این آلیاژها حساسیت به روی زدایی و SCC دارند. سرب برای بهبود ماشین کاری به ترکیب اضافه می شود. افزودن قلع به میزان 1 درصد استحکام و مقاومت به روی زدایی را افزایش می دهد. آلومینیم برای پایدار ساختن لایه محافظ سطحی اضافه می شود.

مونتز متال (Cu–40Zn60) : C28000 به طور کلی مقاومت بیشتری را به ترکیبات دارای گوگرد نسبت به آلیاژهای دارای مقادیر بالاتر مس دارد. قابلیت کار سرد آن بسیار ضعیف است اما خواص عالی برای انجام کار گرم دارد و محکم ترین آلیاژ Cu-Zn است.

برنج سرب دار Cu–Zn–Pb، C31200–C38590

مونتز متال سرب دار یا برنج های سرب دار به عنوان مثال C36500، C36600، C36700 و C36800 به این گروه تعلق دارند و مقاومت خوبی به خوردگی در آب های شیرین و شور دارند. آلیاژ C36500 به روی زدایی حساس است. سایر آلیاژهای C36600، C36700 و C36800 ممانعت شده هستند و در ترکیب آن ها عناصر آرسنیک، آنتیموان و فسفر در بازه 0.02–0.1 درصد به عنوان ممانعت کننده استفاده شده است که در مقاومت بالای این آلیاژها به روی زدایی سهم مهمی دارد.

برنج قلع Pb–Sn–Cu–Zn ، C40400–C49080

برنج دریایی (Admiralty brass) یا C44300 به طور گسترده در کندانسورهای خنک شونده با آب و خنک کننده های پالایش نفت و عملیات پتروشیمیایی مورد استفاده قرار می گیرد. این ماده در محیط هایی که غلظت بالای آمونیوم و سولفید هیدروژن وجود داشته باشد به وسیله حفره دار شدن و خوردگی تنشی و روی زدایی مورد حمله قرار می گیرد.

ترک خوردگی لوله های برنج دریایی در تعدادی از مبدل های حرارتی پالایشگاهی در طی خاموشی زمانی که رسوبات حاوی آمونیوم روی سطوح لوله ها در معرض هوا قرار گرفتند، به کرات دیده شده است. می توان با استفاده از اسپری محلول بسیار رقیقی از اسید سولفوریک بلافاصله پس از خروجی دسته لوله ها از پوسته از این مشکل جلوگیری کرد. مقادیر کم (0.02٪–0.11٪) فسفر، آرسنیک و آنتیموان مقاومت به روی زدایی را افزایش می دهند.

برنج دریایی ممانعت شده C44300، C44400 و C44500 مقاومت به روی زدایی و مقاومت خوب به خوردگی را در شرایط محیطی مختلف مانند آب شیرین، آب شور، شورابه، بخار و میعانات بخار و ترکیبات گوگرد موجود در عملیات پالایشگاهی از خود نشان می دهد. اما این آلیاژها در حین کار به دلیل سرعت برخورد بالا و خوردگی تنشی آمونیوم تخریب می شوند.

برنج کشتی C46400, C46500, C46600, C46700

اضافه کردن 0.75 درصد قلع به مونتز متال (Cu–40Zn60) برنج کشتی (Naval Brass) را ایجاد می کند. برنج کشتی مقاومت خوبی را در محیط های صنعتی، روستایی، دریایی، محصولات نفتی، الکل ها، گازهای خشک و آب دریا نشان می دهد. این آلیاژ مقاومت خوبی در برابر بازهای ضعیف دارد، اما مقاومت اندکی در برابر سیانیدها و ترکیبات آمونیوم از خود نشان می دهد. این آلیاژ در برابر روی زدایی مقاومت می کند و مقاومت خوبی را در آب های شور و شیرین از خود نشان می دهد. افزودن عناصر ممانعت کننده مانند فسفر، آرسنیک و سرب در مقادیر کم (0.02٪–0.11٪) به C46400 منجر به تولید برنج کشتی ممانعت شده C46500، C46600 و C46700 می شود که در برابر روی زدایی مقاوم است.

برنزهای آلومینیم برای مبدل های حرارتی

برنزهای آلومینیمCu–Al–Ni–Fe–Si–Sn - C60600–C64400

برنزهای آلومینیم حاوی 5 تا 7 درصد آلومینیم با یا بدون آهن، نیکل، منگنز و سیلیسیم هستند. آلیاژهای معمول ریخته گری مس – آلومینیم آلیاژهای C60800، C61000، C61300، C61400، C61500، C61800، C62300، C63000، C63200. این آلیاژها طیفی را از آلیاژهای تک فاز حاوی 7 درصد آلومینیم تا آلیاژهای پیچیده دوفاز حاوی 11 درصد آلومینیم با عناصر الیاژی آهن، نیکل و منگنز در بر می گیرد. این آلیاژها به شکل ریختگی و کار شده وجود دارند. آن ها به طور کلی برای کار در شرایط قلیایی، نمک های خنثی، نمک های اسیدی غیر اکسید کننده و بسیاری اسیدهای آلی و ترکیبات آن ها مناسب هستند. آن ها در برابر خوردگی آب (نوشیدنی، شورابه، آب دریا) مقاومت می کنند. برنز آلومینیم و آلیاژهای نیکل- مس دو گروه از مهمترین آلیاژهای مس برای کاربردهای آب دریا هستند. بنابراین ویژگی های برنز های آلومینیم عبارتند از:

1- برنزهای آلومینیم در برابر اکسیداسیون و پوسته شدن در دمای بالا به دلیل تشکیل لایه اکسید آلومینم سطحی مقاومت می کنند.

2- برنز های آلومینیم استحکام قابل توجه و مقاومت به خوردگی سایشی را ایجاد می کنند.

3- می توان آن را به وسیله جوشکاری و لحیمکاری به هم متصل کرد.

4- حساس به خوردگی تنشی در محیط آمونیوم مرطوب و محلول های جیوه ای

5- مقاوم در برابر آلیاژ زدایی که به ترکیب آلیاژ وابسته است.

6- خواص خوردگی از ریزساختار آلیاژ تاثیر می گیرد. مقدار کمی از قلع به C61300 افزوده می شود تا از خوردگی تنشی بین دانه ای جلوگیری کند.

لوله های برنز های آلومینیم و لوله های کار شده به طور گسترده در کندانسورهایی استفاده می شوند که از آب دریا استفاده می کنند. صفحه لوله گیر از این آلیاژها با بسیاری از آلیاژهای لوله مانند C70600، C71500، C68700 و تیتانیم سازگار هستند. قطعات ریخته گری آلیاژهای C95400، C95500 و C95800 به عنوان صفحه لوله گیر و مخزن آب (water box) استفاده می شوند.

برنزهای سیلیسیم برای مبدل های حرارتی

برنزهای سیلیسیمCu–Si–Ag ، C64700–C66100

برنز سیلیسیم B با کد C65100 و ترکیب (Cu–1.5Si98.5) و برنز سیلیسیم A با ترکیب (Cu–3Si97) در این گروه حائز اهمیت هستند. این آلیاژها حاوی حدود 3 درصد سیلیسیم و حدود 1 درصد منگنز هستند. این آلیاژها به دلیل خواص مکانیکی عالی، کار پذیری (کار سرد و هم کار گرم)، قابلیت اتصال خوب و مقاومت به خوردگی به خصوص خوردگی خستگی معروف هستند.

برنج آلومینیم برای مبدل های حرارتی

مقاومت برنج آلومینیم به خوردگی برخوردی در آب دریا و آب شور که با سرعت بالا حرکت می کنند به لایه اکسید سطحی چسبنده روی سطح آن وابسته است. اما مستعد روی زدایی است که می توان با ممانعت کردن به وسیله آرسنیک (1%–0.02%) بر این مشکل غلبه کرد. برنج آلومینیم ممانعت شده با آرسنیک (C68700) در کندانسورهای نیروگاه های فسیلی، گرمکن های آب ورودی و کندانسورهای ناو استفاده گسترده یافته است. این آلیاژ به عنوان جایگزین برنج دریایی در جایی که سرعت خنک کردن آب بالا است، مورد استفاده قرار می گیرد.

مس – نیکل ها برای مبدل های حرارتی

مس – نیکل هاCu–Ni–Fe ، C70000–C79900

مس- نیکل ها یا کاپرونیکل های C70400، C70600، C71000، C71500 و C72200 آلیاژهای تک فاز محلول جامد هستند و نیکل عنصر آلیاژی اصلی آنها است. آلیاژهای حاوی 10 تا 30 درصد نیکل از دیدگاه سازندگان مبدل حرارتی مهم هستند. آن ها در برابر آب های شیرین، آب شور و دریا مقاوم هستند. آلیاژهای مس – نیکل که حاوی آهن و منگنز هستند نسبت به خوردگی سایشی و SCC مقاوم هستند. آهن اگر به صورت محلول جامد باشد مقاومت این آلیاژها را به حمله برخوردی زیاد می کند.

حضور آهن به شکل رسوبات ریز می تواند برای مقاومت به خوردگی مضر باشد. مس – نیکل ها زمانی که سرعت آب خنک کننده بالا باشد جایگزین لوله فلزی دریایی ممانعت شده هستند. نرخ های خوردگی برای C70600 و C71500 در آب دریا حدود 1 mpy است.

ماکزیمم سرعت طراحی برای لوله های کندانسور 3.6 m/s یا 12 s/ft برای C70600 و 4.6 m/s یا 15 s/ft برای C71500 است. در دماهای بالا، مقاومت به خزش مس- نیکل ها بیشتر از مس و برنج است. بنابراین آن ها در گرمکن های آب ورودی دما بالا و فشار بالا و مبدل های حرارتی استفاده می شوند. مس نیکل ها در برابر خوردگی تنشی SCC بسیار مقاوم هستند. در میان تمام آلیاژهای مس این دسته مقاوم ترین به خوردگی تنشی در محیط آمونیوم است. بنابراین آن ها معمولا در بخش هوازدایی کندانسورهای با سطح بالا مورد استفاده قرار می گیرند. اگر سولفاید در محیط موجود باشد این آلیاژها حساس به خوردگی غیر یکنواخت و حفره دار شدن هستند. آلیاژ زدایی به ندرت در کاپرونیکل ها دیده می شود. آلیاژ C70600 با ترکیب Cu–10Ni90 در مبدل های حرارتی و کندانسورهای آب دریا، گرمکن های آب ورودی و مبدل های حرارتی پالایشگاهی مورد استفاده قرار می گیرند. آلیاژ C71500، با ترکیب Cu–30Ni70 به نام کروم مس نیکل Cu-30Ni-2.8Cr67.2 شناخته می شود. در میان تمام آلیاژهای مس، این آلیاژ مقاومت عالی به حمله برخوردی، SCC و خوردگی در برابر بیشتر اسیدها، آب ها و میعانات بخار از خود نشان می دهد. این آلیاژ در کاربردهایی که مشکلات خوردگی شدید دارند مانند کندانسورهای نیروگاهی، گرمکن های آب ورودی، مبدل های حرارتی ناوها، کندانسورها، مبدل های حرارتی پالایشگاهی مانند کندانسورهای بالادستی و مبردها و سرد کن های ثانویه مورد استفاده قرار می گیرند.

لیست آلیاژهای مورد استفاده در مبدل های حرارتی

نام مس و آلیاژ های مسی که در مبدل های حرارتی مورد استفاده قرار می گیرند:

لیست تفصیلی از مس و آلیاژهای آن و ترکیبات نامی مورد استفاده در انواع مبدل های حرارتی در جدول زیر آورده شده است.

مس و آلیاژهای مسی که در مبدل های حرارتی مورد استفاده قرار می گیرند.		
99.99% Cu min	نام رایج	عدد UNS

C10100 (OFE)	Oxygen-free electrolytic electronic) copper）	99.99% Cu min
C10200 (OF)	Oxygen-free copper without residual deoxidants	99.99% Cu min
C10300	Oxygen-free extra-low-phosphorus copper	99.99% Cu min
C10400	Oxygen-free copper with silver	
C10500		
C10700		
C10800	Oxygen-free low-phosphorus copper	99.99% Cu min
C11000	Electrolytic tough-pitch copper	99.99% Cu min
C11300	Silver-bearing tough-pitch copper	99.99% Cu min
C11400		
C11500		
C11600		
C12000 (DLP)	Phosphorus-deoxidized copper (low-residual copper)	99.99% Cu min
C12200 (DHP)	Phosphorus-deoxidized copper (high-residual copper)	99.99% Cu min
C12300 (DHP)	Phosphorus-deoxidized copper (high-residual copper）	99.99% Cu min
C12500	Fire-refined copper	99.88% Cu min, remainder Ag, As, Sb, and others
C12700		
C12800		

C12900		
C13000		
C14200	Phosphorized, arsenical copper	99.94% Cu min, 0.1%–0.5% As, 0.015%–0.04% P
C19200	Phosphorized copper iron ⁄1with	98.97% Cu, 1.0% Fe, 0.03% P
C19400	High-strength modified copper	97.4% Cu, 2.4% Fe, 0.13% Zn, 0.04% P
C23000	Red brass	84%–86% Cu, remainder Zn
C26000	Cartridge brass	70% Cu, 30% Zn
C26800	Yellow brass	65% Cu, 35% Zn
C27000		
C28000	Muntz metal	60% Cu, 40% Zn
C36500	Leaded Muntz metal, uninhibited	58%–61% Cu, 0.4%–0.9% Pb, 0.25% Sn max, remainder Zn
C36600	Arsenical inhibited leaded Muntz metal	58%–61% Cu, 0.4%–0.9% Pb, 0.25% Sn max, remainder Zn
C36700	Antimonial inhibited	
C36800	Phosphorus inhibited	
C44300	Admiralty brass	70%–73% Cu, 0.9%–1.2% Sn, remainder Zn
C44300	Arsenical inhibited admiralty brass	
C44400	Antimonial inhibited admiralty brass	
C44500	Phosphor inhibited admiralty brass	
C46400	Uninhibited naval brass	59%–62% Cu, 0.5%–1.0% Sn, remainder Zn
C46500	Arsenical inhibited naval brass	
C46600	Antimonial inhibited	
C46700	Phosphorus inhibited	

C60800	Aluminum bronze	95% Cu, 5% Al
C61300	Aluminum bronze, 7%	90% Cu, 6%–7.5% Al, 0.15% Ni, 2%–3% Fe
C61400	Aluminum bronze D	91% Cu, 7% Al, 2% Fe
C63000	10% Aluminum–nickel bronze	82% Cu, 10% Al, 5% Ni, 3% Fe
C63200	9% Aluminum–nickel bronze	82% Cu, 9% Al, 5% Ni, 4% Fe
C65100	Low-Si bronze B	98.5% Cu, 1.5%–2.0% Si, 0.7% max Mn
C65500	High-Si bronze A	97% Cu, 3% Si
C68700	Aluminum brass D, arsenical inhibited	77.5% Cu, 20.5% Zn, 2% Al
C70400	٪5Copper–nickel,	95% Cu, 5% Ni
C70600	٪10Copper–nickel,	90% Cu, 10% Ni
C71000	٪20Copper-nickel,	80% Cu, 20% Ni
C71500	٪30Copper–nickel,	70% Cu, 30% Ni
C71640	Copper–nickel–iron–manganese	29%–32% Ni, 1.7%–2.3% Fe, 1.5%–2.5% Mn
C71900	Chromium copper–nickel	67.2% Cu, 30% Ni, 2.8% Cr
C72200	Chromium copper–nickel	83% Cu, 16.5% Ni, 0.5% Cr

اشکال محصولات آلیاژهای مس مورد استفاده در مبدل های حرارتی

اشکال محصول

آلیاژهای مس در اشکال مختلف مانند پلیت ها، ورق ها و نوارها، لوله های مبدل حرارتی و بست ها موجود هستند. نامگذاری لوله های مبدل حرارتی بر اساس ASTM در جدول زیر آورده شده است.

مشخصات ASTM برای آلیاژهای مس لوله های مبدل های حرارتی		
مشخصات ASTM	توضیح	عددUNS آلیاژها
B111	لوله های بی درز کندانسور و بست ها	C10100, C10200, C10300, C10800, C12000, C12200, C14200, C44500, C60800, C61300, C61400, C68700, C70400,

	از جنس مس و آلیاژهای آن	C70600, C71000, C71500, C71640, C72200
B359	لوله های کندانسور و مبدل های حرارتی با پره داخلی از جنس مس و آلیاژهای آن	C10100, C10200, C10300, C10800, C12000, C12200, C14200, C19200, C23000, C44300, C44400, C44500, C60800, C68700, C70400, C70600, C71000, C71500, C72200
B395	لوله های کندانسور و مبدل حرارتی بی درز U شکل از جنس مس و آلیاژهای آن	C10200, C10300, C10800, C12000, C12200, C14200, C19200, C23000, C44300, C44400, C44500, C60800, C68700, C70400, C70600, C71000, C71500, C72200
B543	لوله های مبدل حرارتی جوشکاری شده از جنس مس و آلیاژهای آن	C10800, C12200, C19400, C23000, C44300, C44400, C44500, C68700, C70400, C70600, C71000, C71500, C71640, C72200
B552	تیوب های مس نیکل بی درز و جوشکاری شده برای کارخانه نمک زدای از آب	C70600, C71500, C71640, C72200

نامگذاری پلیت ها، ورق ها و نوارها مبدل حرارتی بر اساس ASTM در جدول زیر نمایش داده شده است.

مشخصات ASTM برای آلیاژهای مس پلیت ها، ورق ها و نوارهای مورد استفاده در مبدل های حرارتی		
مشخصات ASTM	توضیح	عددUNS آلیاژها
B171	پلیت و ورق آلیاژ مس برای مخازن تحت فشارکندانسورها و مبدل های حرارتی	C36500. C36600, C36700, C36800, C44300, C44400, C44500, C46600, C46700, ,C61300 C61400, C63000, C63200, C70600, ,C71500 C72200
B569	نوار برنجی با عرض و ضخامت کم برای لوله های مبدل حرارتی	C26000
B96	پلیت، ورق، نوار و میله نوردی برای کاربرد عمومی و مخزن تحت فشار از جنس آلیاژ مس – سیلیسیم	C65100, C65400, C65500, C65800