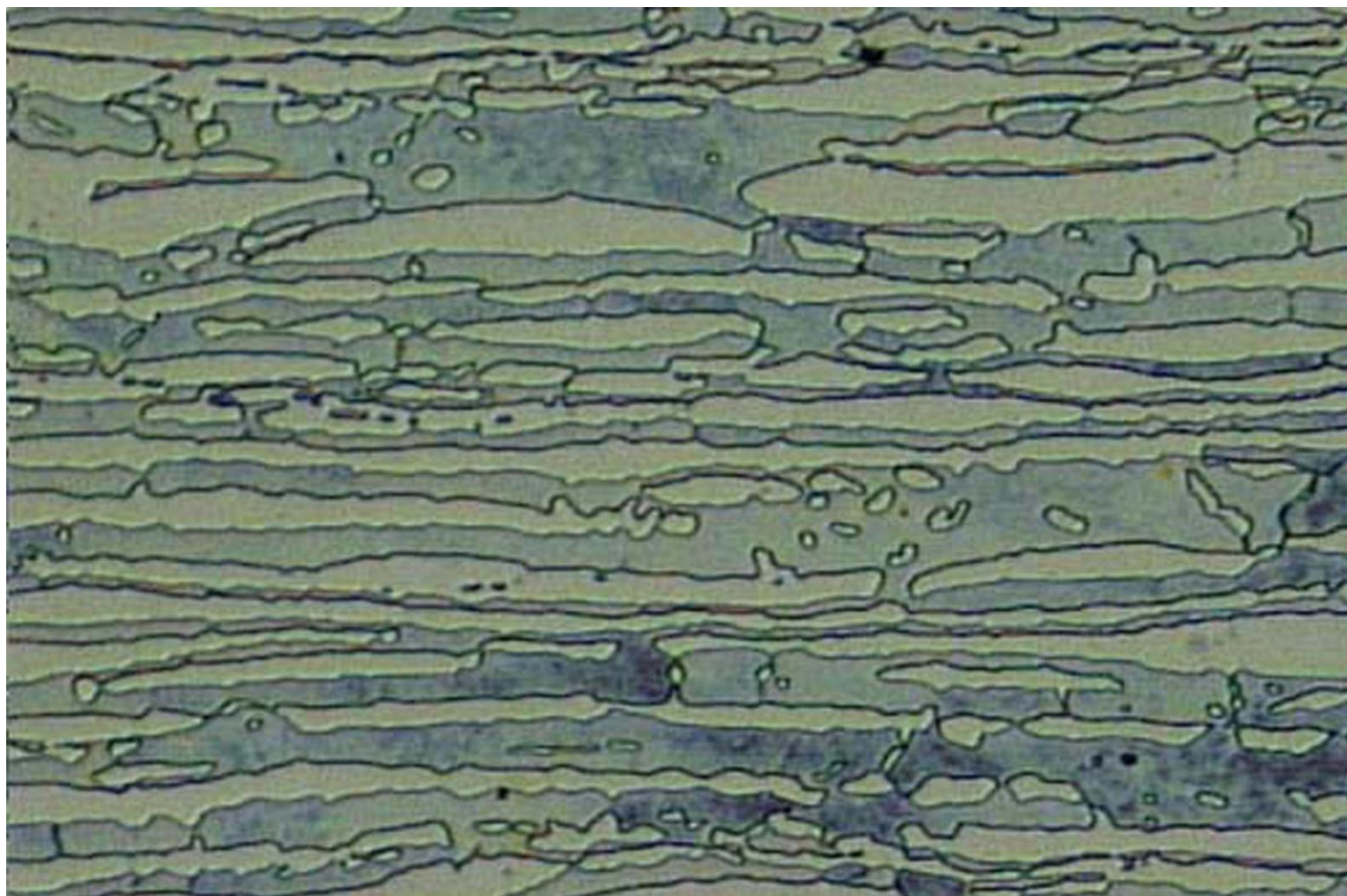


DUPLEX

STAINLESS STEEL



معرفی فولاد های زنگ نزن دو تایی (دوپلکس)

گرد آورنده : سید سامان لاجوردی



بازرگانی مهدی پور

معرفی فولادهای زنگ نزن دوپلکس

به ویژه AISI 2205

1. مقدمه

توجه به علم مواد و متالورژی نه تنها میتواند در بهره وری و انتخاب صحیح مواد در صنایع کمک شایان نماید بلکه از لحاظ اقتصادی و کمک به کاهش هزینه های اولیه ساخت ، نگهداری و محافظت از خوردگی بسیار موثر خواهد بود. پس از سالها مشاهده خسارت های ناشی از خوردگی و زنگ زدگی فولادهای ساده در محیط های خورنده و اتمسفری علم و تکنولوژی توانست فولادهای زنگ نزن آستنیتی (AISI 304,316,...) و فریتی (AISI ... 430,409L, و مارتزیتی (AISI 420,410....) را ابداع نماید، اما پس از مشخص شدن ضعفها و کاستی های فولادهای فوق الذکر ، دانشمندان علم مواد و متالورژی توانستند با مطالعات گسترده فولادهای دو فازی یا دوپلکس را به جهانیان معرفی نمایند. به نظر نگارنده، سال 1997، سال انقلاب و تحول در علم مواد بخصوص در زمینه مهندسی خوردگی بود که در آن فولادهای دوپلکس با مقاومت به خوردگی فوق العاده و همچنین تنش تسلیم بسیار بالا که حدود دو برابر فولادهای زنگ نزن آستنیتی متداول مانند 316L و 304 میباشد، در مقیاس صنعتی ساخته شد. به عنوان مثال رآکتوری را که برای کار در محیط های خورنده با فولادهای زنگ نزن مثل 316L ساخته می شد میتوان با حدود $\frac{2}{3}$ وزن قبلی از فولاد زنگ نزن دوپلکس ساخته و مقاومت در برابر یونهای خورنده ، بخصوص کلر گوگرد به صورت غیر قابل باوری افزایش یابد.

2. فولادهای زنگ نزن دوپلکس و انواع متداول آن

این فولادها دارای ترکیبات شیمیایی و زیرساختار متوازن (Duplex) و تقریباً نسبت مساوی فریتی و آستنیتی هستند.

خواص این دسته از فولادهای زنگ نزن به طور خلاصه در زیر آمده است:

1. ترکیب شیمیایی براساس کروم و مولیبدن بالا به ترتیب مقاومت به خوردگی بین دانه ای و خوردگی حفره ای را بهبود می بخشد.
2. افزودن نیتروژن میتواند به وسیله مکانیسم محلول جامد بین نشینی، سختی ساختار را افزایش داده که در نهایت راندمان مقاومت و چقرمگی را ارتقاء می بخشد.
3. زیر ساختار دو فازی متضمن مقاومت بالا بوده و در مقابل ایجاد حفره و ترک ناشی از شکست خوردگی تحت تنش (SCC) از خود مقاومت نشان میدهد.
4. چقرمگی فولادهای زنگ نزن دوپلکس نسبت به فولادهای زنگ نزن فریتی بالاتر است، اما نسبت به فولادهای زنگ نزن آستنیتی پایین تر می باشد.
5. این فولادها به راحتی قابل جوشکاری بوده و دارای مقاومت کششی بالایی هستند.

شکل 1 مقایسه رفتار 316L و دوپلکس های 2707, 2507, 2205 را بعد از 24 ساعت در دمای 85 درجه سانتی گراد در محلول 6% FeCl₃ نشان میدهد.



شکل 1

جدول 1 خواص مکانیکی و ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن 316L و 904L و انواع دوپلکس های متداول (2707,2507,2205,630(17-4PH) را نشان میدهد.

Chemical Compositions %									Mechanical Properties		
Grade	UNS	C max	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Cb	Proof Strength	Tensile Strength	Elongation
									R p0.2	R m	A%
									MPa,min.	MPa	Min.
Duplex											
2707HD	S32707	0.030	27	6.5	5	0.3	-	-	700	920-1100	25
2507	S32750	0.030	25	7	4	0.3	-	-	550	800-1100	25
2205	S32205	0.030	22	5	3.2	0.2	-	-	485	680-1000	25
630(17-4PH)	S17400	0.070	17	4	-	-	3-5	0.30	1000	1100	50
Austenitic											
(316L)	S31603	0.030	17	11.5	2.1	-	-	-	220	515-690	45
(904L)	N08904	0.020	20	25	4.5	-	-	-	230	520-720	35

جدول 1

با توجه به گسترش مصرف فولادهای دوپلکس اجمالاً خواص و ویژگیهای متداولترین فولادهای دوپلکس با استاندارد 2205، جهت آشنایی بیشتر ارائه میگردد.

3. فولاد زنگ نزن دوپلکس (دوتایی) AISI 2205 (DIN 1.4462)

هنگامی که عملیات حرارتی به درستی در مورد فولاد زنگ نزن دوپلکس (دوتایی) 2205 اعمال میشود در ساختار متالورژیکی آن آستنیت و فریت به طور مساوی ایجاد خواهد شد.

ساختار مورد نظر، 2205 را در مقابل شکست خوردگی تحت تنش (SCC) مقاومتر از فولادهای زنگ نزن آستنیتی نظیر 304 و 316 مینماید. کرم بالاتر همراه با مولیبدن و نیتروژن مقاومت در برابر حفره ای شدن و افزایش خوردگی را در حضور یون کلر به میزان قابل توجهی بهبود میبخشد. در بیشتر محیط ها، مقاومت به خوردگی 2205 از 316 بسیار بهتر بوده به اضافه اینکه عموماً تنش تسلیم (مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک) در 2205 تقریباً دو برابر فولادهای زنگ نزن آستنیتی می باشد.

رفتار فیزیکی فولاد 2205 در دمای 50- درجه سانتی گراد، از نرم به ترد تبدیل شده لذا دمای کاربری این فولاد عمدتاً در محدوده 50- درجه الی 300+ درجه سانتی گراد می باشد.

فولاد 2205 به صورت بسیار قابل توجهی در محیط های حاوی یون کلر و سولفید هیدروژن مانند محیط های دریایی، استخراج نفت و گاز مقاوم و کاربرد دارد.

کابرد عمده این فولاد در خطوط لوله ، مخازن تحت فشار ، مخازن حمل و نگهداری ، صنایع نیشکر ، چوب و کاغذ و صنایع معدن می باشد بطوریکه فولاد 2205 به صورت همه جانبه ای در خطوط لوله و مخازن استخراج نفت و گاز از چاههای ترش و پالایشگاهها و محیط های دارای یون کلرو سولفید به کار می رود.

2205 نیز در مبدلهای حرارتی که آب شور یا آب دارای یون کلر جهت خنک کن به کار می رود استفاده میشود.

2205 با استاندارد ASTM A240 مطابق با DIN (1/4462) با استاندارد EN10088-2 میباشد.

ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی 2205 در جدول 2 به شرح زیر مشهود است .

CHEMICAL COMPOSITION

Type	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%N
S32205	0.030	1.00	2.00	0.30	0.020	22.00	4.50	3.00	0.14
	max	max	max	max	max	23.00	6.50	3.50	0.20

MECHANICAL PROPERTIES

Type	Product Form 1 or Gauge(mm)	0.2% Proof Stress(MPa)	Tensile Strength(MPa)	Elongation (%)	Brinell Hardness	Impact Energy(J)	
						20 oc	-40 oc
S32205	-	450 min	655 min	25 min 2	293 max	-	-

جدول 2

بالاترین درجه حرارتی که میتوان بصورت مداوم از فولاد 2205 استفاده نمود دمای +300 درجه سانتی گراد است. با آنیل کامل و سرد کردن سریع (کوئنچ) ، چقرمگی و مقاومت بالای خوردگی در این فولاد به دست خواهد آمد.

3-1 رفتار خستگی:

استحکام بالای فولاد 2205 ، مقاومت خوبی نیز در مقابل خستگی ایجاد می کند. برای مثال در مورد 2205 و 316L در آزمایش خستگی تنش معکوس در دمای اتاق نشان داد که حد خستگی نزدیک به تنش تسلیم آنها بود. و این یعنی حد خستگی 2205 دو برابر 316L میباشد.

در بسیاری از کاربردها خستگی همراه با خوردگی مقاومت خستگی را کاهش داده که 2205 در این مورد بسیار بهتر از فولادهای آستنیتی از خود مقاومت نشان میدهد.

2-3 خواص فیزیکی :

در دمای اتاق 20 درجه سانتی گراد خواص فیزیکی فولاد 2205 در جدول شماره 3 لحاظ گردیده است.

PHYSICAL PROPERTIES	
The values given below are for 20°C, unless otherwise specified.	
Density	7 860kg/m ³
Modulus of Elasticity in Tension	200GPa
Specific Heat Capacity	470J/kgK
Thermal Conductivity: @ 100°C	17.0W/mK
@ 500°C	21.0W/mK
Electrical Resistivity	850η m
Mean Co-efficient of Thermal Expansion: 0 – 100°C	13.0μm/mK
0 – 300°C	14.0μm/mK
0 – 400°C	14.5μm/mK
Melting Range	1 410–1 460°C
Relative Permeability	Ferromagnetic

جدول 3

3-3 کار سرد :

2205 شکل پذیری خوبی داشته ولی با توجه به تنش تسلیم بالای آن قدرت بیشتری برای شکل پذیری سرد نیاز دارد. برای مثال نورد سرد 2205 در مقایسه با سایر فولادهای آستنیتی می بایستی با 60% بار و قدرت بیشتر نسبت به فولادهای آستنیتی صورت پذیرد و کشش عمیق در این فولاد نیاز به یک آنیل واسطه دارد. ظرفیت محدوده ماکزیمم فولاد 2205 در خمکاری توسط دستگاه نسبت به سایر فولادهای آستنیتی تقریباً نصف می باشید. بدین معنی که حد اقل شعاع خم داخل برای این فولاد باید 3 برابر ضخامت ورق باشد. فولاد 2205 رفتار فتری بیشتری از فولاد های ساختمانی نشان داده که این مورد جبران محدودیت های خم کاری را مینماید.

4-3 ماشین کاری:

مقاومت بالا و تنش تسلیم بالای 2205 در عین حال که در کاربرد ها بسیار مفید می باشد ولی مقداری قابلیت تراشکاری را کاهش میدهد.

سرعت برش تقریباً 20% کمتر از فولاد 304 بوده و ابزار تراشکاری باید خیلی نزدیک به تلورانسهای مورد نظر مورد استفاده قرار گیرد تا از کار سختی بیش از اندازه جلوگیری شود.

ابزار بزرگتر می تواند پایداری و تأثیر بیشتری در مقابل اتلاف گرمایی از خود بروز دهد. ابزار با زاویه شیار بزرگتر، لبه های تیز، سطح صاف، نرخ بارگذاری و عمق برش در ایجاد کار سختی سطح بسیار به یکدیگر مرتبطند. برش توسط مایعات از بهترین روش ها می باشد.

3-5 جوش کاری :

فولاد 2205 جوش پذیری خوبی در تمامی کاربردها داشته و با متد PAW و TIG-MIG-SAW سازگاری دارد. در جوش کاری خودکار خط جوش می بایستی آنیل شود. برای حفظ ساختار میکروسکوپی خط جوش حتماً الکترودهای مخصوص 2205 بکار رود.

تزریق گاز نیتروژن در جوشکاری باید ساختار آستنیتی متداول را تضمین نماید.

برای حفظ باریکی خط (HAZ) حرارت اعمالی باید کمتر از 2Kj/mm بوده و دمای بیشتر از 150 درجه سانتی گراد نباشد.

ضریب انبساط حرارتی پایین تر 2205 در مقایسه با سایر فولادهای زنگ نزن باعث کاهش کجی و انحراف و تنش های مشترک خط جوش خواهد شد.

اگر چه اغلب پیشگرمی در جوش ضروری نیست ولی برای محدوده های ضخیم تر توصیه میگردد.

پیش گرمی عمدتاً در محدوده 100 الی 250 درجه سانتی گراد توصیه میشود. گرم کردن بعد از جوشکاری چقرمگی و مقاومت خوردگی بین دانه ای را به حالت اول باز می گرداند.

3-6 مقاومت خوردگی :

عموماً مقاومت به خوردگی فولاد 2205 از 316 و 317L بسیار بهتر است. در ذیل رفتار انواع خوردگی در فولاد 2205 تشریح می گردد.

3-6-1 خوردگی حفره ای (Pitting):

مقاومت خوردگی حفره ای در محیط های اسیدی با حضور یون کلر بسیار مهم می باشد.

شرایط فوق منجر به نفوذ موضعی در لایه محافظ سطح فولاد و ایجاد حفره دانه ای عمیق شده که آثار تخریبی آن خیلی بیشتر از حفره های سطحی می باشد.

Pitting و خوردگی شکافی معمولاً بوسیله مقدار کرم ، مولیبدن و نیتروژن موجود در فولاد اندازه گیری میشود که به آن عدد مقاومت معادل PITTING یا PRE می گویند که برابر است با

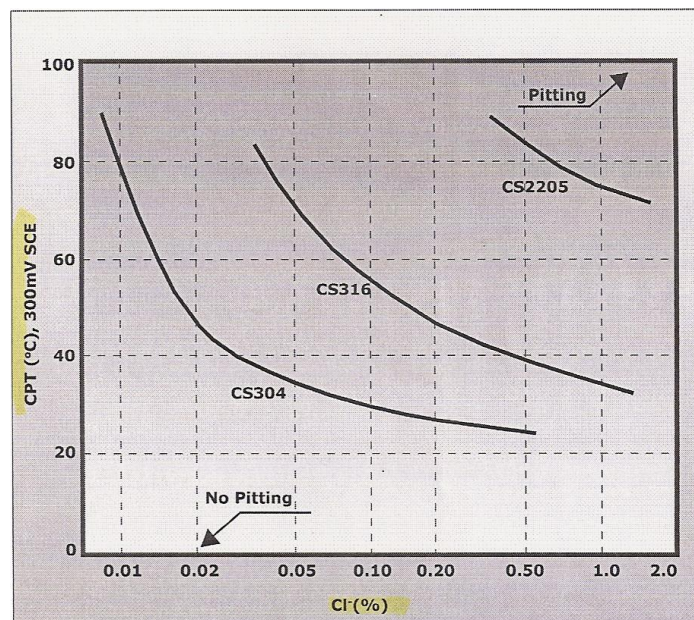
$$PRE = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N$$

جدول شماره 4 عدد مقاومت معادل حفره ای شدن چند فولاد زنگ نزن را با هم مقایسه نمده و به طور کامل مقاومت فولاد 2205 در برابر Pitting را روشن می سازد. به وضوح دیده میشود که عدد PER فولاد 2205، 1/5 برابر فولاد زنگ نزن 316 می باشد.

Alloy	%Cr	%Mo	%N	PRE
CS304	18.20	0.05	0.0500	19.2
CS316	17.00	2.10	0.0500	24.7
CS2101	21.50	0.40	0.2250	26.4
CS2205	22.50	3.30	0.1700	36.1

جدول شماره 4

منحنی شماره 5 رابطه دمای بحرانی شروع حفره ای شدن با مقدار یون کلر محلول را در فولادهای مختلف نشان میدهد. بنابراین کاملاً واضح است که فولاد 2205 در محیط های کلریدی و دماهای بالا نسبت به سایر فولادها کاربرد ایمن تری دارد. لذا 2205 در محیط های کلر دار بسیار بهتر از سایر فولادهای ضد زنگ کارایی دارد.



منحنی شماره 5

2-6-3 اکسیداسیون :

مقاومت اکسیداسیون فولاد 2205 در مصارف متناوب و ثابت تا دمای 980 درجه سانتی گراد خوب بود. اگر چه مصرف ثابت بین 300 درجه سانتی گراد الی 950 درجه فولاد را ترد و مقاومت خوردگی را کاهش می دهد. برای مثال مبدل‌های حرارتی در دماهای بالا بدون هیچ مشکلی مورد استفاده قرار میگیرند و می توان با آنیل کامل و سرد کردن ناگهانی (کوئنچ) چقرمگی و مقاومت خوردگی 2205 را به حالت اول بازگرداند.

3-6-3 خوردگی محیطی :

مقاومت خوردگی محیطی فولاد 2205 بسیار بالا و غیر قابل مقایسه با کلیه فولادهای آستنیتی موجود میباشد.

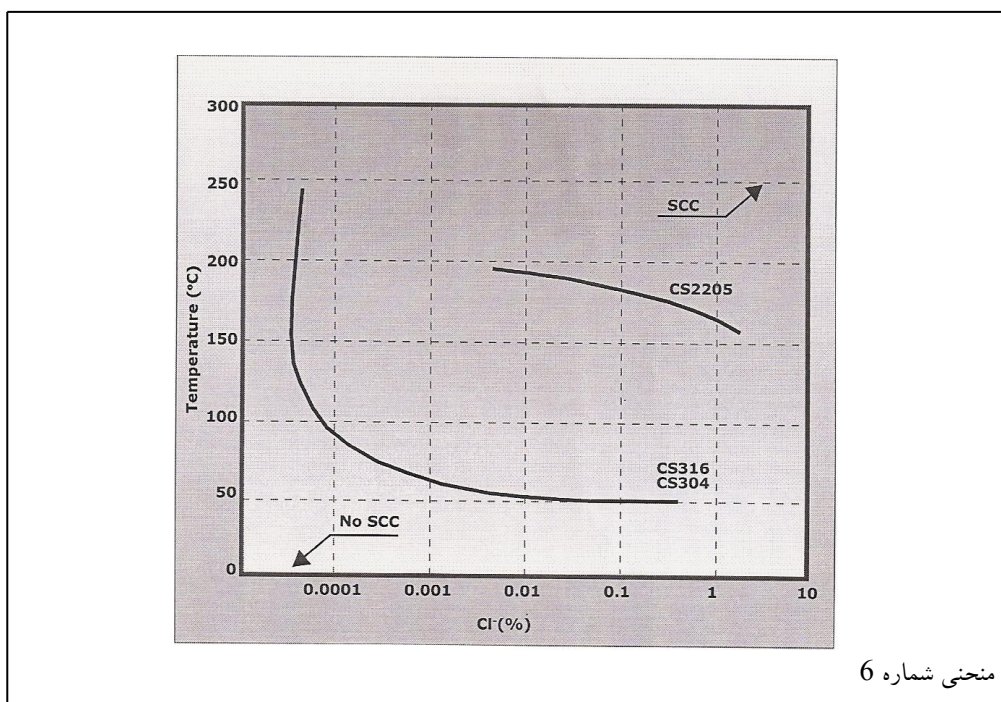
4-6-3 خوردگی بین دانه ای:

حساسیت خوردگی بین دانه ای در خط جوش (HAZ) زمانی است که دما بین 450 تا 850 درجه سانتی گراد باشد. در این دما کاربیدها در مرزدانه ها رسوب مینمایند و هنگامی که در معرض محیط خورنده قرار بگیرد امکان آسیب توسط خوردگی مرز دانه وجود خواهد داشت. اما به لحاظ کم بودن کربن در 2205 این نوع خوردگی در این فولاد اتفاق نمی افتد.

5-6-3 شکست خوردگی تحت تنش (SCC):

شکست خوردگی تحت تنش (STRESS CORROSION CRACKING) در فولادهای زنگ نزن آستنیتی در زمانی اتفاق میافتد که فولاد در محیط کلریدی و تحت تنش و دمای بالاتر از 60 درجه سانتی گراد قرار گیرد. تنش از طریق اعمال نیرو یا پس ماند نیروها از کار سرد اعمالی یا جوش در فولاد بوجود می آید و یون کلر لزوماً به مقدار زیاد نباید وجود داشته باشد. حتی اگر مقدار کمی از نمک به صورت موضعی نیز موجود باشد تأثیر خود را خواهد گذاشت و با توجه به مطالب مذکور ارزیابی رخ دادن شکست خوردگی تنش (SCC) بسیار سخت می باشد. جایی که این پدیده رخ میدهد، افزایش بهره وری با کاهش تنش اعمالی یا کاهش تنش های پس ماند و یا تعدیل حرارت امکان پذیر می باشد.

2205 بسیار کمتر از سایر فولادهای زنگ نزن آستنیتی در معرض این نوع خوردگی قرار می گیرد منحنی شماره 6 تأثیر دما و یون کلر در ایجاد این نوع خوردگی در فولادهای 304, 316, 2205 را بطور کامل نمایان می سازد.



3-6-6 خوردگی سایشی :

با توجه به تلفیق سختی بالای اولیه و کار سختی و مقاومت به خوردگی فولاد 2205، مقاومت این فولاد در برابر خوردگی سایشی که به وسیله ذرات جامد و صلب و سایش از محلولها ایجاد می شود، بسیار بالا است.

3-6-7 خستگی خوردگی :

از آنجایی که فولاد 2205 مقاومت بسیار بهتری از سایر فولادهای زنگ نزن در برابر خوردگی دارد و مقاومت تنش تسلیم نسبت به آنها نیز دو برابر است، بنابر این در آزمایش خستگی خمشی چرخشی انجام شده در محلول 3% نمک طعام PH7 و دمای 40 درجه سانتی گراد و 6000 دور در دقیقه، فولاد 2205 با تنش 430 Mpa بعد از 2×10^7 دور تناوبی چرخش خمشی می شکند، این در حالی است که فولاد 316 با تنش 260 Mpa در این آزمایش خواهد شکست.

4. خلاصه و نتیجه گیری

فولادهای زنگ نزن دوپلکس در مقایسه با فولادهای زنگ نزن آستنیتی متداول (316L, ...)، دارای مزیت های ذیل می باشند.

1. تنش تسلیم (مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک) دو برابر
2. مقاومت به خوردگی بسیار بالاتر در محیط های حاوی یون کلرید و سولفید
3. مقاومت بسیار بالاتر در برابر خوردگی حفره ای (Pitting) و شکست خوردگی تحت تنش

(Stress Corrosion Cracking)

یکی از رایج ترین و مقرون به صرفه ترین فولادهای دوپلکس ، فولاد زنگ نزن با استاندارد AISI220 یا DIN 1.4462 می باشد که در مبدل‌های حرارتی و صنایع چوب و کاغذ و پتروشیمی و تأسیسات دریایی ، بالاترین کاربرد را دارد.

گرد آورنده : مهندس سید سامان لاجوردی

منابع و مأخذ

1. Technical Properties Of Duplex , Columbus Publish ,June 2007
2. Sandvik Seamless Heat Exchanger Tubing ,Sandvik Publish,2006
3. 17-4PH Data Sheet, AK Steel Cooperation , August 2007
4. Ferrite –Austenite Stainless Steel , Fujikura ,October 1997
5. High Alloyed Steel Bing Resistive To Corrosion By Natural Gas ,Niehaus Et Al,June 1983
6. Characterization Of a High Performance Duplex Stainless Steel For Ortheptic Application ,Cigada-A,October 1999

شرح عکس روی جلد:

ریز ساختار فولاد زنگ نزن دوپلکس 2205 بزرگنمایی 250 ، فاز آستنیت به شکل جزایر سفید در زمینه فاز فریت