

جوش پذیری فولاد
دوپلکس¹ 2205 (1.44462)
با الکتروود E2209-15 (OK 67.55)
توسط فرآیند جوشکاری SMAW

★ تهیه و تنظیم:

مهندس مجید نیک صفت
شرکت مهندسی مشاور و بازرسی آرون جوش صنعت

مقدمه

فولادهای زنگ نزن دوپلکس، اغلب دارای ساختار فریتی با شبکه کریستالی BCC و ساختار آستنیتی با شبکه کریستالی FCC به صورت توأم می باشند. مقدار کربن این فولادها اغلب کمتر از 0/03 درصد، کرم بین 20 الی 30 درصد، نیکل 5 تا 10 درصد و مجموع عناصر آلیاژهای آنها از جمله نیتروژن، مولیبدن، مس و تنگستن نیز کمتر از 4 درصد می باشد.

فولادهای زنگ نزن دوپلکس از نظر میزان عناصر کرم و نیکل شبیه به فولادهای ضد زنگ آستنیتی 8-18 می باشند. درصد مقدار فریت و یا آستنیت در فولاد وابسته به مقدار درصد عناصر فریت زا و آستنیت زا هستند. عناصر کرم و مولیبدن فریت زا و عناصر نیکل، کربن، نیتروژن و مس آستنیت زا می باشند.

تغییر درصد مقدار فریت و یا آستنیت در ساختار کریستالی باعث تغییر خواص مکانیکی، متالورژی و فیزیکی فولاد میشود. مهمترین آلیاژهای فولادهای زنگ نزن دوپلکس عبارتند از 2304-2507-2205-255. فولادهای زنگ نزن دوپلکس خود به 5 گروه تقسیم می شوند.

1- فولاد زنگ نزن Cr-Ni-N با 22 درصد کرم، 0/1 درصد نیتروژن و 4 درصد نیکل.

2- فولاد زنگ نزن Cr-Ni-Mo-N با 22 درصد کرم، 5/5 درصد نیکل.

3- فولاد زنگ نزن Cr-Ni-Mo-N - Cu با 25 درصد کرم، و مس تا 2/5 درصد.

4- فولاد زنگ نزن Cr-Ni-Mo-N با 25 درصد کرم و 4 درصد مولیبدن و 0/2 درصد نیتروژن.

5- فولاد زنگ نزن Cr-Ni-Mo-N - W - Cu با 25 درصد کرم، 0/2 درصد نیتروژن و یا بیشتر.

فولادهای دوپلکس از نظر خواص مکانیکی و متالورژیکی شباهت های زیادی به فولادهای ضد زنگ آستنیتی و فریتی دارند. فولادهای ضد زنگ آستنیتی، اغلب قابلیت جوش پذیری خوب و مقاومت به ضربه عالی در دمای پائین دارند، اما در برابر ترکهای خوردگی تنش¹ (SCC) و خوردگی بین دانه ای² حساس هستند، در صورتیکه فولادهای زنگ نزن فریتی مقاومت بسیار بالایی در برابر ترکهای خوردگی تنش در محیط های کلریدی از خود نشان می دهند اما چقرگی آنها خصوصاً در منطقه جوشکاری و HAZ پائین است.

فولادهای زنگ نزن دو فازی با درصد فریت بیشتر می توانند خواص نزدیک به فولادهای زنگ نزن فریتی داشته باشند که در چنین شرایطی برخی از خواص فولادهای زنگ نزن آستنیتی را نیز دارند.

این فولادها بدلیل وجود فریت بالا در دمای 475 درجه سانتی گراد حساسیت به تردی و در دماهای بالاتر از 538 درجه سانتی گراد نیز تمایل به رسوب فاز شکننده سیگما دارند.

1) Stress Corrosion Cracking

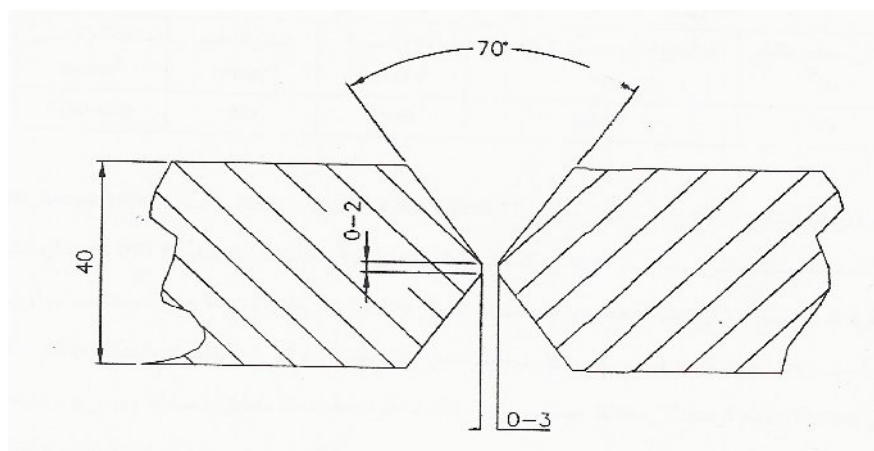
2) Intergranular Attack

فولادهای دوپلکس به دلیل مقدار کربن پائین که اغلب کمتر از 0/3 درصد می باشند قابلیت جوش پذیری مناسبی دارند و معمولاً نیازی به عملیات حرارتی پیشگرمایی ندارند، اما بعد از جوشکاری جهت انحلال بعضی از رسوبات و ترکیبات بین فلزی نیاز به عملیات حرارتی آنیل در دمای 1050 الی 1100 درجه سانتی گراد و سپس عملیات کوئنچ دارند.

مواد و روش تحقیق

در این کار پژوهشی با استفاده از فرآیند جوشکاری SMAW و الکتروود مصرفی نوع (ok67.55) E2209-15 جوش پذیری فولاد زنگ نزن دوپلکس 2205 با در نظر گرفتن نکاتی نظیر ظواهر جوش، خلل و فرج، تغییرات سختی و ریز ساختارها و رسوب ترکیبات بین فلزی در منطقه جوش و نواحی مجاور جوش HAZ مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

نتایج آزمایشات ثابت نمود که مشکل اصلی جوشکاری فولادهای زنگ نزن دوپلکس 2205 رسوب فاز شکننده سیگما در منطقه جوش و HAZ می باشد که با افزایش حرارت ورودی¹ و افزایش دمای بین پاسی² شدیداً افزایش می یابد. نمونه های آزمایشی به ابعاد $300 \times 150 \times 22 \text{ mm}^3$ و با زاویه پخ 60 درجه به صورت جناقی دو طرفه مطابق با شکل شماتیکی 1 آماده سازی شدند. آنالیز شیمیایی فولاد مزبور در جدول 1 ارائه شده است.



شکل 1

1) Heat input
2) Interpass Temperature

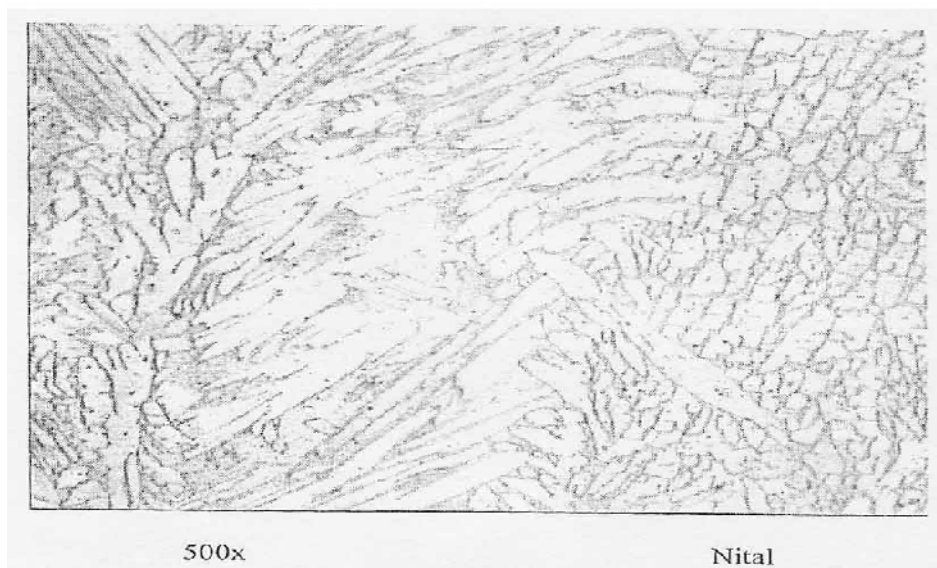
Table 5.30
Chemical Compositions of Typical Duplex Stainless Steels

Alloy	UNS Number	Composition ^{a,b,c}					Other Elements
		C	Cr	Ni	Mo	N	
329	S32900	0.08	23.0-28.0	2.5-5.0	1.0-2.0	—	—
44LN	S31200	0.030	24.0-26.0	5.5-6.5	1.2-2.0	0.14-0.20	—
DP3	S31260	0.030	24.0-26.0	5.5-7.5	2.5-3.5	0.10-0.30	0.20-0.80 Cu; 0.10-0.50 W
2205	S31803	0.030	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20	—
Z304	S32304	0.030	21.5-24.5	3.0-5.5	0.05-0.6	0.05-0.20	—
255	S32550	0.04	24.0-27.0	4.5-6.5	2.9-3.9	0.10-0.25	1.5-2.5 Cu
2507	S32750	0.030	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32	—
Z100 ^d	S32760	0.030	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-4.0	0.2-0.3	0.5-1.0 Cu; 0.5-1.0 W
3RE60	S31500	0.030	18.0-19.0	4.25-5.25	2.5-3.0	—	—
U50 ^d	S32404	0.04	20.5-22.5	5.5-8.5	2.0-3.0	0.20	1.0-2.0 Cu
7MoPLUS	S32950	0.03	26.0-29.0	3.5-5.2	1.0-2.5	0.15-0.35	—
DP3W	S39274	0.03	24.0-26.0	6.0-8.0	2.5-3.5	0.24-0.32	0.2-0.8 Cu; 1.5-2.5 W

- a. Single values are maximum percentages.
 b. 2.5 Mn max.
 c. 0.70-1.0 Si max.
 d. Z100—Zeron 100; U50—Uranus50

جدول 1

همانطور که در شکل 2 مشخص است ریز ساختار متالورژیکی نمونه ها قبل از عملیات جوشکاری آستنیت - فریت می باشد. ترکیب شیمیایی الکتروود مصرفی در جدول 2 ارائه شده است. شدت جریان جوشکاری بین 110-180 آمپر و ولتاژ جوشکاری بین 19-22 ولت استفاده گردید. دمای بین پاسی نیز بین 150 الی 200 درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد.



شکل 2

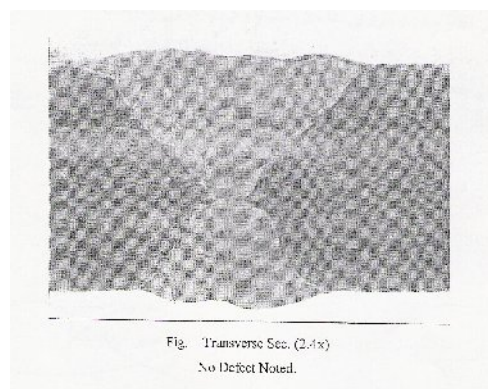
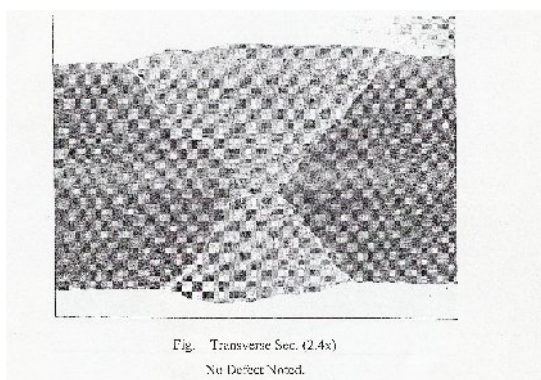
Typical all weld metal composition						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
<0.03	0.5	0.8	22.0	9.0	3.0	0.15

Typical properties all weld metal	
Yield stress	650 MPa
Tensile strength	800 MPa
Elongation	28%

Charpy V	
Test temps	Impact values
+20 ^o C	100 J
-40 ^o C	75 J
-60 ^o C	65 J

جدول 2

پس از مطالعه اولیه نمونه های جوشکاری شده مقاطع ماکروسکوپی از فلز جوش و مناطق HAZ به طور وسیلی مورد مطالعه و بررسی متالوگرافی و سختی سنجی قرار گرفتند. دامنه تغییرات سختی نمونه ها در فلز پایه با نواحی HAZ و فلز جوش به صورت as weld و آنیل شده به روش ویکرز اندازه گیری شدند. عملیات حرارتی آنیل در دمای 1040-1060 درجه سانتی گراد به مدت 30 دقیقه و سپس کوئنچ در آب صورت گرفت. (شکل 3)



شکل 3-قطع عرضی از نمونه جوشکاری شده (فلز پایه، نواحی HAZ و فلز جوش مشخص است)

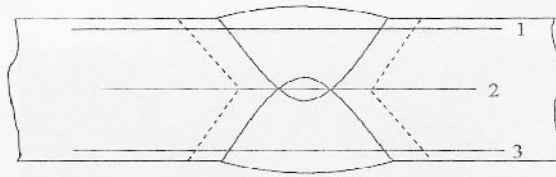
نتایج

ریز ساختارهای متالورژیکی ایجاد در مقاطع نمونه ها متفاوت بوده و رسوب فاز شکننده سیگما نیز در نمونه های عملیات حرارتی نشده نیز مشهود است. تغییرات ریز ساختاری در فولاد بعد از عملیات جوشکاری باعث تغییرات سختی در نواحی HAZ و فلز جوش شده که این تغییرات باعث تغییر در خواص مکانیکی نقاط مختلف گردیده است.

دامنه تغییرات سختی در نمونه های as weld در منطقه فلز پایه و فلز جوش زیاد نیست. میانگین تغییرات سختی در منطقه فلز پایه 226/5VH₅ و در منطقه فلز جوش 230VH₅ می باشد، اما دامنه تغییرات سختی در نمونه های آنیل شده نسبتاً زیاد است. میانگین این تغییرات در فلز پایه 214VH₅ و در منطقه جوش 291VH₅ می باشد. (شکل 4)

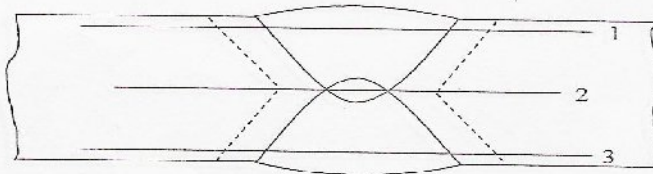
نتایج آزمایشات تحت کشش نشان می دهد که در نمونه های آنیل نشده مقدار U.T.S برابر 731 N/mm² می باشد در

صورتیکه در نمونه های آنیل شده میانگین این مقدار برابر با 612 N/mm² می باشد. (شکل 5)



Results: TYPE: HV₅ Value not exceed: Maximum value: Location:

Line	Location	Base Metal B-M	H-A-Z 1	Weld Metal W-M	H-A-Z 2	Base Metal B-M
1		215-216-212	---	279-299-285	---	216-217-212
2		206-210-212	---	297-304-290	---	216-215-212
3		217-224-217	---	294-290-281	---	210-215-212
Ave:		214		291		214



Results: TYPE: HV₅ Value not exceed: Maximum value: Location:

Line	Location	Base Metal B-M	H-A-Z 1	Weld Metal W-M	H-A-Z 2	Base Metal B-M
1		228-230-228	---	237-233-230	---	227-224-216
2		212-216-247	---	242-258-252	---	256-233-219
3		220-228-230	---	237-237-228	---	233-227-237
Ave:		226.5		239		230

شكل 4

Tensile Test

Specimen	Width (mm)	Thickness or Diameter (mm)	Ultimate Load (N)	U.T.S. (N/mm ²)	Location of Failure
1	25.52	22.92	366000	625.7	Weld Metal
2	25.40	22.83	347000	598.4	Weld Metal

الف

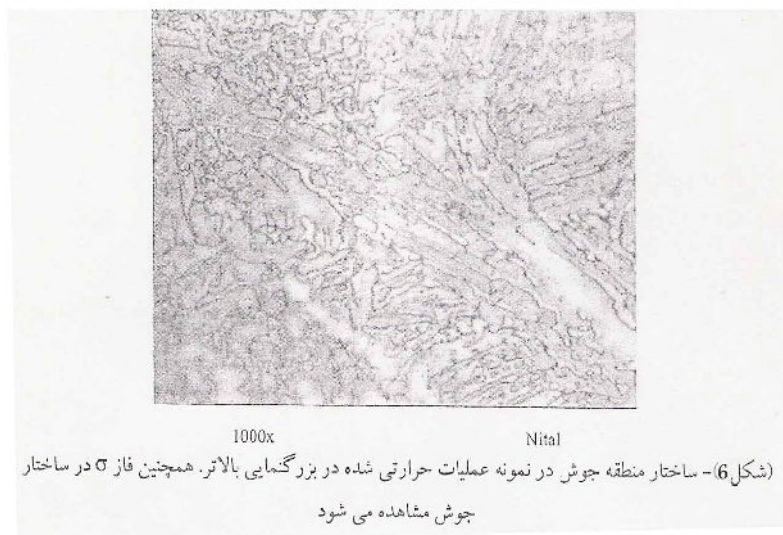
Tensile Test

Specimen	Width (mm)	Thickness or Diameter (mm)	Ultimate Load (N)	U.T.S. (N/mm ²)	Location of Failure
1	25.35	22.98	422000	724.5	Base Metal
2	25.22	22.85	425000	737.5	Base Metal

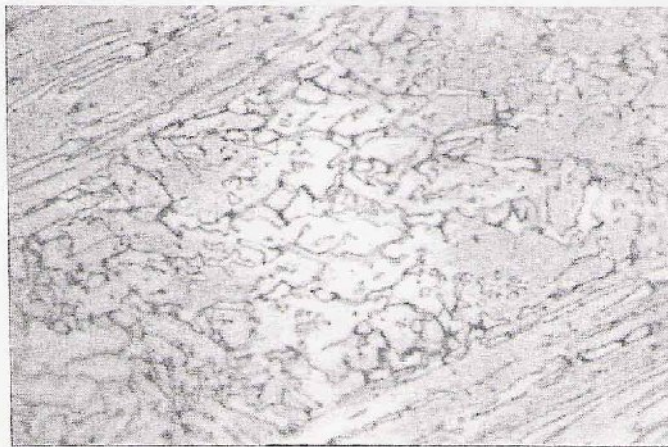
ب

شکل 5: نتایج آزمایش کشش الف: بعد از آنیل. ب: قبل از آنیل

همانطور که در شکل 4 مشخص است دامنه تغییرات زیاد منطقه فلز جوش و فلز پایه در نمونه آنیل شده به این دلیل است که مقدار آستنیت کمتر از مقدار فریت می باشد، در صورتیکه در نمونه as weld مقدار آستنیت کمی بیشتر از مقدار فریت می باشد. دلیل دیگر افزایش سختی در منطقه جوش نمونه آنیل شده می تواند بدلیل تشکیل رسوب فاز سیگما در این منطقه باشد. (شکلهای 6-7-8).



شکل 6

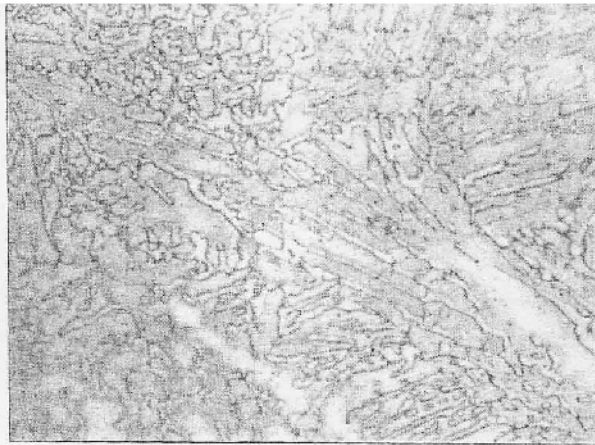


1000x

Nital

(شکل 7) - تصویر ساختار منطقه جوش در نمونه عملیات حرارتی شده را در منطقه ای دیگر نشان می دهد.

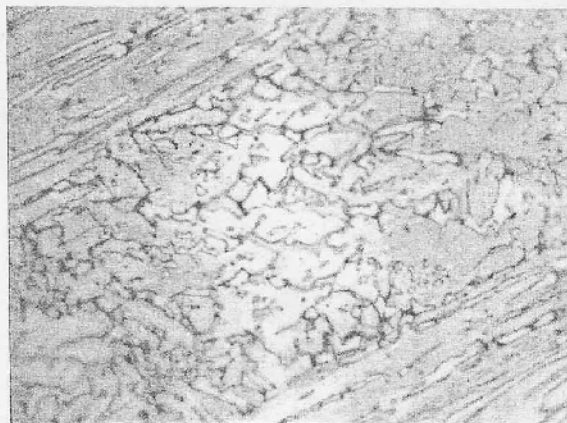
شکل 7



1000x

Nital

(شکل الف) ساختار منطقه جوش در نمونه عملیات حرارتی شده در بزرگنمایی بالاتر. همچنین فاز σ در ساختار جوش مشاهده می شود



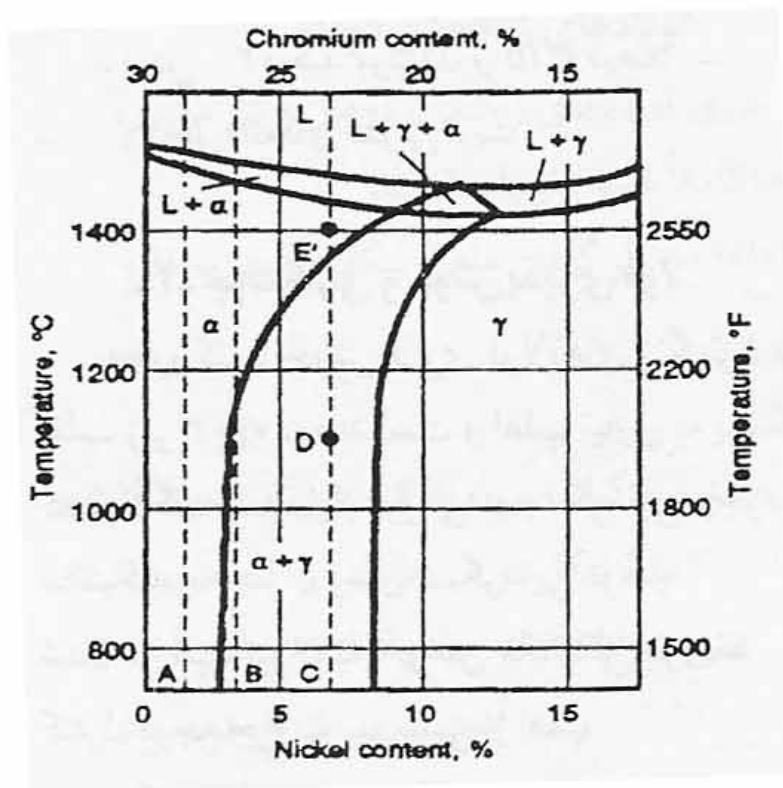
1000x

Nital

(شکل ب) - تصویر ساختار منطقه جوش در نمونه عملیات حرارتی شده را در منطقه ای دیگر نشان می دهد.

شکل 8

ساختار کریستالی فولادهای زنگ نزن دوپلکس شامل زمینه فریتی و جزایر آستنیتی می باشد. در زمان اعمال سیکل عملیات حرارتی جوشکاری در ناحیه مجاور جوش و HAZ نفوذ از حالت ساختار فریتی به ساختار آستنیتی در دمای حدود 1400°C شروع میشود. (شکل 9)



شکل 9

رشد دانه ها در اثر سرد شدن و ادامه استحاله آستنیتی در همین محدوده آنالیزی و با کاهش دما ادامه می یابد. در این شرایط فریت اولیه تشکیل شده و مرز دانه های جداکننده کاملاً مشخص هستند. فولاد 2205 وجود نیتروژن (تا 0/35 درصد) در ساختار فولادهای زنگ نزن دوپلکس باعث افزایش دمای استحاله فاری فریت به آستنیت خواهد شد.

تحلیل نتایج

تحقیقات و بررسی های انجام شده بر روی جوش پذیری فولاد 2205 با الکتروود 15-2209 نشان می دهد که فولاد مذکور بدلیل وجود عناصر آلیاژی کرم - نیکل - مولیبدن، تمایل به رسوب فاز سیگما و کاربیدها و کاهش تافنس در منطقه جوش و HAZ دارد.

استحاله حالت جامد فریت به آستنیت به صورت مکانیزم نفوذ در اثر گذشت زمان و وجود دمای بالا اتفاق می افتد محدوده دمایی 800 تا 1200 درجه سانتی گراد در جریان سرد شدن بستر مناسبی برای وقوع این استحاله است. درجه حرارتهای پایین تر از 800 درجه سانتی گراد تاثیری روی دگرگونی فاز مذکور ندارند اما می توان در این دماها تاثیرات فازها و ساختارهای غیر فلزی و بین فلزی را تحت کنترل درآورد.

به همین دلیل فقط در شرایطی که فولاد به صورت چند پاسی جوشکاری شده استفاده از سرد کردن یا کوئنچ در آب پس از جوشکاری در شرایطی بلا مانع است .

عملیات حرارتی آنیل در دمای $1050C^0$ تا 1100 (تقریباً حوالی منطقه D) برای فولاد مذکور توصیه می شود ، برای اجتناب از ایجاد فازهای بین فلزی در ساختار فولاد کوئنچ کردن در آب از دمای حدوداً $1000C^0$ الزامی است .

بنابراین با کاهش حرارت ورودی از طریق عدم حرکت زیگزاگی زیاد الکتروود ، کاهش مقدار شدت جریان از به آمپر و کاهش ساینز الکتروود در پاس و ریشه از 4 mm به 3 mm و در پاسهای تکمیلی از قطر 5 mm به 4 mm و هم چنین کاهش مدت زمان بین آنیل و کوئنچ در آب از دمای حداقل 1000 درجه سانتی گراد ، رسوب بین فلزی و نهایتاً تغییرات سختی مناطق فلز جوش و HAZ به حداقل مقدار خود می رسند .

مراجع

1. Peckner, D., and Bernstein, I.M., ed.1977.Handbook of Stainless Steels,McGrawHill Book Co.
2. Scherer, R., Riedrich, G., and Hougardy, H.1941.Welding rod, U.S .Patent 2240672.
3. Thielsch , H.1950 Alloying elements in chromium nickel stainless steels. Welding Journal 29(8):361-s to 404-s.
4. Arate, Y., Matsuda, F., and Katayams , S.1977 . Solidification crack susceptibility in weld metals of fully austenitic stainless steels (Report II).Transactions of JWRI 6(1):105-116.
5. Brooks, J.A.1975.Weldability of high N, high Mn austenitic stainless steel. Welding Journal 54 (6):189-s-to 195-s.
6. ASM specialty Handbook, stainless steels.