

جوشکاری فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 با روش قوسی الکتروود تنگستن گاز و ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی

محمد اهل سمردی^۱، مرتضی شمعانیان^۱، حسین ادريس^۱، امیر بهجت^۱، محمدعلی مهتدی بناب^۲، جری اسپونار^۲

۱-دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲-دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ساسکاچوان، کانادا

پست الکترونیکی: sarmadimohamad@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۰۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۰۸/۰۸)

چکیده

در این تحقیق به بررسی ریز ساختاری و خواص مکانیکی جوش فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 پرداخته شد. بدین منظور از روش قوسی تنگستن گاز و فلز پرکننده AWS ER2594 به قطر ۲/۴ میلی متر استفاده شد. به منظور بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی مجهز به پراش الکترون برگشتی استفاده شد. خواص مکانیکی توسط آزمون های ریز سختی و کشش بررسی شد. بررسی های ریزساختاری مشخص کرد که فلز پایه حاوی دانه های کشیده شده آستنیت در زمینه فریت است. فلز جوش دارای ساختار ریختگی می باشد که آستنیت به صورت دندریتی در زمینه فریت قرار گرفته است. همچنین مشاهده شد در اثر جوشکاری درصد حجمی فریت منطقه ذوب پس از جوشکاری از ۶۰ (درصد فریت فلز پایه) به حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است، که علت آن پایین بودن نرخ سرد شدن به دلیل بالا بودن میزان حرارت ورودی در روش جوشکاری قوسی تنگستن گاز می باشد. آزمون ریز سختی بر روی نمونه ها که به روش ویکرز انجام شد نشان داد که متوسط سختی فلز پایه در حدود ۲۸۵ ویکرز است؛ در صورتی که سختی در منطقه ذوب نمونه های جوشکاری شده به علت افزایش درصد آستنیت تا ۲۵۰ ویکرز کاهش یافت. این در حالی که میزان سختی منطقه متأثر از حرارت به دلیل کاهش درصد حجمی آستنیت و نفوذ ترکیباتی همچون کاربید کروم در فاز فریت تا ۳۴۰ ویکرز افزایش نشان داد. نتایج حاصل از آزمون کشش مشخص کرد که در اثر افزایش حرارت ورودی استحکام کششی کاهش یافته است، که این موضوع به علت افزایش اندازه دانه ها در اثر افزایش حرارت ورودی است.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی، جوشکاری قوسی الکتروود تنگستن با گاز محافظ، ریز ساختار، خواص مکانیکی.

Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welding of Super Duplex Stainless Steel UNSS32750

M. Ahl Sarmadi¹, M. Shamanian¹, H. Edris¹, A. Behjat¹, M. A. Mohtadi Bonab², J. Szpunar²

1-Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2-Department of Mechanical Engineering, University of Saskatchewan, Canada

(Received 26 September 2015 ; Accepted 30 October 2015)

Abstract

In this study the microstructure and mechanical properties of super duplex stainless steel UNS S32750

welding was studied. For this purpose, the method of gas tungsten arc and filler metal AWS ER2594 with a diameter of 4.2 mm was used. In order to investigate the microstructure light microscopy and electron microscopy equipped with backscatter electron diffraction were used. Mechanical properties were studied by hardness and tensile tests. Weld metal had Cast structure with austenite in the dendrite form located in ferrite matrix. It was also observed in the melting zone after welding, the ferrite volume fraction decreased to 50 percent 60% base metal ferrite). Due to the low cooling rates and high heat input method in the gas tungsten arc welding. Vickers micro-hardness test method was carried out on the samples showed that average about 285 Vickers hardness of base metal; however, hardness in the fusion region due to increased austenite fraction fell to 250 Vickers. But hardness in the heat-affected zone due to lower volume fraction of austenite and ferrite phase formation of chromium carbide intermetallic compounds increased to 340 Vickers. The results of the tensile test showed that the tensile strength decreased with increasing heat input, because of increase the size of grains due to the increased heat input.

Keywords: super duplex stainless steel, tungsten electrode arc welding with shielding gas, microstructure, mechanical properties.

۱- مقدمه

فولادهای زنگ نزن دو فاز یکی از انواع متداول فولادهای زنگ نزن می باشند. ساختار این فولاد ها از دو قسمت اصلی آستنیت و فریت تشکیل شده است، وجود فاز فریت در ساختار این فولادها باعث افزایش مقاومت در برابر ترک خوردن تنش می شود؛ اگر چه اثرات نامطلوبی مانند کاهش چقرمگی در دمای پایین را نیز به همراه دارد. ساختار این فولادها عمدتاً دارای ۱۹ تا ۲۶ درصد وزنی کروم، ۴ تا ۸ درصد نیکل و ۱/۵ تا ۴ درصد مولیبدن است. همچنین وجود نیتروژن به عنوان یک عامل آستنیت زا نقش مهمی را در ریز ساختار این فولادها ایفا می کند [۲۱]. فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی به گروهی از فولادهای زنگ نزن دو فاز گفته می شود که عدد PREN^۱ آن بالاتر از ۴۰ باشد. فولاد UNS S32750 یکی از پرکاربردترین فولادهای زنگ نزن سوپر دوفازی می باشد، که به علت خواص مطلوب استحکام و خوردگی در صنایع پالایشگاهی (نفت و گاز) کاربرد عمده ای پیدا کرده است. ترکیب این فولاد دارای حداقل ۲۵ درصد کروم، ۳/۵ درصد مولیبدن و بیش از ۰/۲ درصد نیتروژن (عامل آستنیت زا) است [۳].

کنترل حرارت ورودی^۲ در جوشکاری این نوع فولادها برای دستیابی به ساختار مطلوب ضروری می باشد. حرارت ورودی

بالا باعث تشکیل فازهای مضر نظیر سیگما^۳ و چی^۴ می گردد. همچنین حرارت ورودی بسیار پایین نیز موجب افزایش درصد فریت در ریزساختار می گردد و نیز باعث ایجاد فازهای نامطلوبی نظیر نیتريد کروم (Cr₂N) می شود [۴]. بنابراین می توان گفت که در مورد جوشکاری فولادهای دو فاز (در ترکیب شیمیایی ثابت)، یکی از مؤثرترین متغیرهای کنترل کننده ی خواص اتصال حاصل، حرارت ورودی می باشد [۵، ۲۶]. همچنین با توجه به اینکه اتصالات حاصل از انجام جوشکاری الکترو تنگستنی با گاز محافظ^۵ بر روی انواع فولادها خصوصاً فولادهای دوفازی خواص مکانیکی و ریزساختاری مناسبی به همراه داشته است. بنابراین با توجه به پرکاربرد بودن فولاد سوپر دوفازی UNS S32750 در صنایع مختلف، اهمیت بررسی اتصال این فولاد با استفاده از روش قوسی تنگستن گاز مطرح می شود.

در مورد جوشکاری فولادهای دوفازی می توان به تحقیقی از صادقیان و همکاران اشاره کرد، در این پژوهش به بررسی ریز ساختاری و خواص مکانیکی مناطق غیر مشابه جوش فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 به فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X65 پرداخته شده است. نتایج نشان داد که افزایش حرارت ورودی از ۰/۵ تا ۰/۸۶ کیلوژول بر میلی متر

3 Sigma

4 Chi

5 Gas Tungsten Arc Welding

1 Pitting Resistance Equivalent Number

2 Heat Input

مکانیکی و ریزساختاری اتصال مشابه این فولاد انجام کمتر دیده شده است، هدف از انجام این تحقیق انجام جوشکاری مشابه فولاد زنگ نزن UNS S32750 به روش GTAW در حرارت های ورودی مختلف و بررسی ریز ساختار، خواص مکانیکی و تاثیر میزان حرارت ورودی بر خواص اتصال حاصل می باشد.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلز مورد استفاده به روش اسپکترومتری نشر نوری تعیین و در جدول (۱) آورده شده است. ماده اولیه ابتدا به صورت لوله با قطر ۲۰ سانتی متر و ضخامت ۳/۸ میلی متر بوده است. شرایط جوشکاری در جدول ۲ آورده شده است. برای انجام جوشکاری از فلز پرکننده دوفازی AWS ER ۲۵۹۴ با قطر ۲/۴ میلی متر با ترکیب شیمیایی که در جدول (۱) قابل مشاهده است، استفاده گردید. سپس قطعات در حالت جوشکاری IG و با آمپراژ و سرعت های گوناگون همان طور که در جدول (۳) مشاهده می شود به یکدیگر اتصال یافتند. همچنین طرح اتصال مانند شکل (۱) در نظر گرفته شد. با توجه به این که متغیرهای جوشکاری آمپراژ، ولتاژ و سرعت جوشکاری می باشند و با در نظر گرفتن این مطلب که برقراری ارتباط بین این متغیرها با ریزساختار مشکل می باشد؛ بنابراین ارتباط همه این متغیرها را توسط رابطه ۱ با حرارت ورودی بدست آمده است و در مرحله بعدی تاثیر میزان حرارت ورودی به قطعه، با خواص اتصال حاصل بررسی شده است [۱۳].

$$HI = \frac{\eta VI}{s} \quad (1)$$

که در این رابطه HI حرارت ورودی به قطعه در اثر جوشکاری و ولتاژ دستگاه (بر حسب ولت)، I شدت جریان (بر حسب آمپر)، S سرعت جوشکاری (بر حسب mm/min) و η بازده جوشکاری می باشد، که در مورد جوشکاری تنگستنی به صورت تک پاس به صورت تقریبی ۰/۷ تا ۰/۸ گزارش شده است؛ بنابراین حرارت های ورودی از رابطه ۱ بدست آمده است و در جدول (۳) آورده شده است. برای بررسی ریزساختاری پس از مانت کردن نمونه ها توسط

موجب کاهش درصد فریت جوش از ۴۴ تا ۳۴ درصد می شود. در نهایت ساختار حاصل متشکل از دو فاز آستنیت و فاز فریت (فاز زمینه) می باشد [۷]. در این تحقیق مشاهده شد با افزایش حرارت ورودی میزان آستنیت فلز جوش افزایش می یابد. همچنین همان طور که پیش تر گفته شد با افزایش حرارت ورودی، میزان آستنیت ثانویه نیز افزایش یافته است. پروفیل سختی مقاطع جوش نشان داد که با گذر از فلز پایه فولاد کم آلیاژ استحکام بالا (API X65) سختی رو به افزایش است. افزایش شدید سختی در مرز فلز جوش و فولاد کم آلیاژ به علت به وجود آمدن فازهای سخت همچون کاربید می باشد [۷].

در تحقیقی دیگر ریز ساختار و رفتار خوردگی مقاطع جوش غیر مشابه فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 316L توسط امینی و همکاران بررسی گردید. برای یافتن تاثیر حرارت ورودی بر ریز ساختار حاصل، جوشکاری در چندین حرارت ورودی مختلف انجام گردید. نتایج نشان داد که افزایش حرارت ورودی از حدود ۶۶۰ تا ۸۲۵ ژول بر میلی متر، موجب افزایش درصد آستنیت فلز جوش حاصل از ۶۰/۷۹ تا ۷۴/۴۷ درصد می شود. همچنین در این تحقیق تاثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری در دمای ۱۱۲۵ درجه سانتی گراد بر ریز ساختار مورد بررسی قرار گرفت که مشاهده شد تاثیر زیادی در حاصل ندارد، بنابراین انجام عملیات حرارتی با توجه به مشکلات تکنولوژیکی توصیه نمی گردد [۸].

در سایر تحقیقات همچون تاواریس و همکاران، اقلیمی و همکاران و سروو^۱ نیز تاثیر حرارت ورودی بر روی اتصالات انواع فولادهای زنگ نزن بررسی شده است که به علت مشابه بودن نتایج تحقیقات با تحقیقات آورده شده از ذکر مجدد آنها خودداری میکنیم [۹-۱۱].

بنابراین با توجه به کاربردهای حساس این فولاد در صنایع مختلف اتصال دائم آن به روش جوشکاری اهمیت می یابد. با توجه به این که در تحقیقات انجام شده بررسی خواص

جدول ۱- درصد وزنی فولاد UNS S32750 و فلز پرکننده (AWS ER2594)

عنصر	Mo	Ni	Cr	Mn	Si	C	N	Cu	W	P	S	Fe
فلز پایه (%)	۴/۷۶	۶/۹۸	۲۶/۸۵	۰/۵۶	۰/۴۲	۰/۰۲۸	۰/۳	۰/۹۷	۰/۶۳	<۰/۰۱۸	<۰/۰۲	پایه
فلز پرکننده (%)	۴	۹/۴	۲۵	۰/۴	۰/۳	<۰/۰۲	۰/۲۵	-	-	<۰/۰۲	<۰/۰۱۵	پایه

جدول ۲- شرایط جوشکاری

گاز محافظ	دبی گاز محافظ	زاویه لبه سازی	روش جوشکاری	نوع جریان	قطبیت	الکتروود	قطر الکتروود
آرگون	۱۵ lit/min	۳۵°	GTAW	ثابت (CC)	منفی	تنگستنی	۲/۴ میلی متر

جدول ۳- متغیرهای جوشکاری قوسی الکتروود تنگستنی با گاز محافظ

شماره نمونه	آمپراژ (A)	ولتاژ (V)	زمان (S)	سرعت جوشکاری (mm/sec)	حرارت ورودی (kJ/mm)
۱	۱۱۰	۱۰/۹	۱۷۶	۰/۹	۱/۱
۲	۱۱۰	۱۱/۵	۱۹۴	۰/۸	۱/۳
۳	۱۲۰	۱۰/۶	۱۵۵	۱/۰	۱/۰
۴	۱۲۰	۱۱/۶	۱۶۰	۱/۰	۱/۱

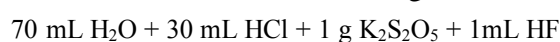
ولتاژ KV20، فاصله کاری^۲ 15mm و اندازه گام^۳ 50nm استفاده شد. تصاویر EBSD توسط نرم افزار HKL CHANNEL 5 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. به منظور بررسی نوع فازهای تشکیل شده از آزمون پراش پرتوی ایکس استفاده شد. و برای بررسی خواص مکانیکی آزمون‌های کشش، ریز سختی و شکست نگاری انجام پذیرفت. همچنین برای بررسی درصد فازهای آستنیت و فریت از آنالیز تصاویر میکروسکوپ نوری توسط نرم افزارهای آنالیز تصویری (به طور مثال نرم افزار Clemex) استفاده شد. به علاوه درصد فریت نیز توسط فریت سنج^۴ محاسبه شد و با درصد‌های بدست آمده توسط نرم افزارهای آنالیز تصویری مقایسه شد.

نتایج و بحث

۱- ریز ساختار

پس از انجام جوشکاری سه منطقه روی سطح مقطع جوش قابل

مانت گرم سمباده زنی از سمباده ۳۲۰ تا ۴۰۰۰ برای هر نمونه انجام پذیرفت. در نهایت به منظور بهبود کیفیت سطحی از فرایند پولیش کاری استفاده گردید. در نهایت نمونه ها در محلول مخصوص مطابق با ترکیب زیر حکاکی^۱ شدند. ترکیب محلول حکاکی:



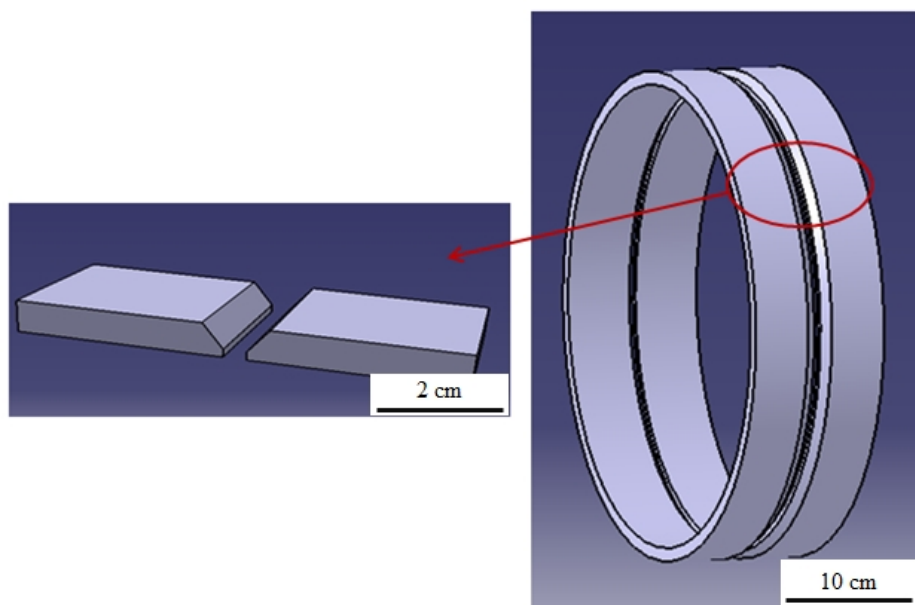
سپس نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین در این تحقیق مقاطع عرضی جوش به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به پراش الکترونی برگشتی (EBSD) مورد بررسی قرار گرفتند. از دستگاه با مدل هیتاچی SU6600 استفاده شد. آماده سازی نمونه ها توسط مجموعه ای از سمباده زنی و پولیش انجام شد، در ادامه نمونه ها به مدت ۶ ساعت در دستگاه Vibromet 2 دارای محلول کلئیدی سیلیکا با اندازه ذرات ۵۰ نانومتر پولیش نهایی شدند. در تهیه تصاویر EBSD از

2 Working Distance

3 Step Size

4 Ferritoscope

1 Etch



شکل ۱- نحوه لبه سازی ورق های فولاد UNS S32750 برای جوشکاری GTA به صورت نمادین مشاهده است که به ترتیب عبارتند از:

- فلز پایه

- منطقه متأثر از حرارت

- منطقه ذوب

در ادامه به بررسی این مناطق پرداخته خواهد شد.

الف) فلز پایه

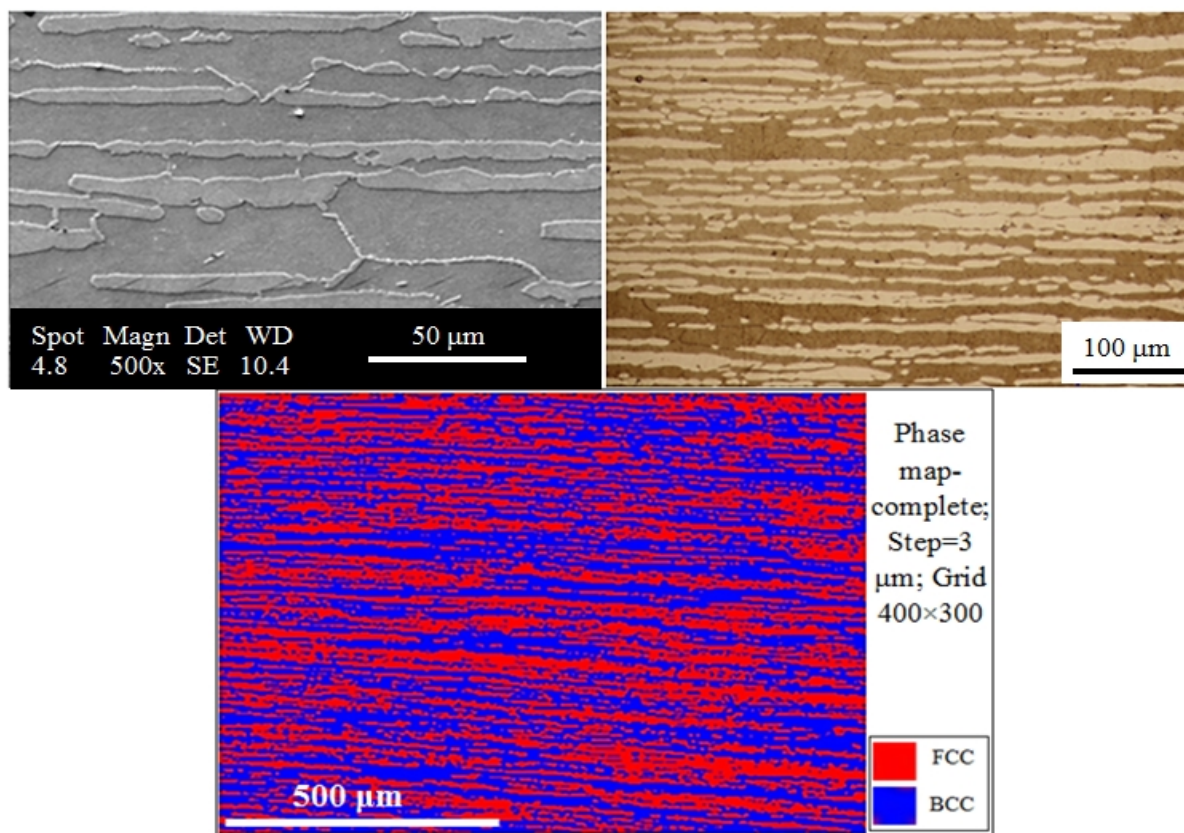
ریز ساختار فولاد UNS S32750 مورد استفاده در این پژوهش از نوع کار شده می باشد. یعنی نمونه ها قبل از آنکه تحت عملیات جوشکاری قرار گیرند تحت عملیات ترمومکانیکی نورد قرار گرفته اند. به دلیل انجام فرایند نورد ریزساختار فلز پایه به صورت لایه ای کشیده شده دیده می شود. همان طور که در شکل (۲) قابل مشاهده است، شکل گیری دانه ها به گونه ای است که فاز روشن آستنیت به صورت لایه ای کشیده شده در زمینه تیره رنگ فریت دیده می شود. شکل (۲- الف) تصویر میکروسکوپ نوری توزیع فازهای آستنیت و فریت را در فولاد UNS S32750 نشان می دهد. همچنین شکل (۲- ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می باشد که دانه بندی مربوط به فازهای فریت و آستنیت رادر این فولاد نشان می دهد.

شکل (۲-ج) تصویر مربوط به نقشه فازي^۱ آنالیز EBSD این فولاد را نشان می دهد. همان طور که از تصاویر شکل ۲ مشخص است، بیش از ۶۰ درصد ساختار را فریت با شبکه BCC تشکیل داده است و میزان آستنیت در ساختار کمتر از ۴۰ درصد می باشد، بنابراین می توان گفت در فلز پایه تعادل یک به یک درصد حجمی فریت با آستنیت برقرار نمی باشد.

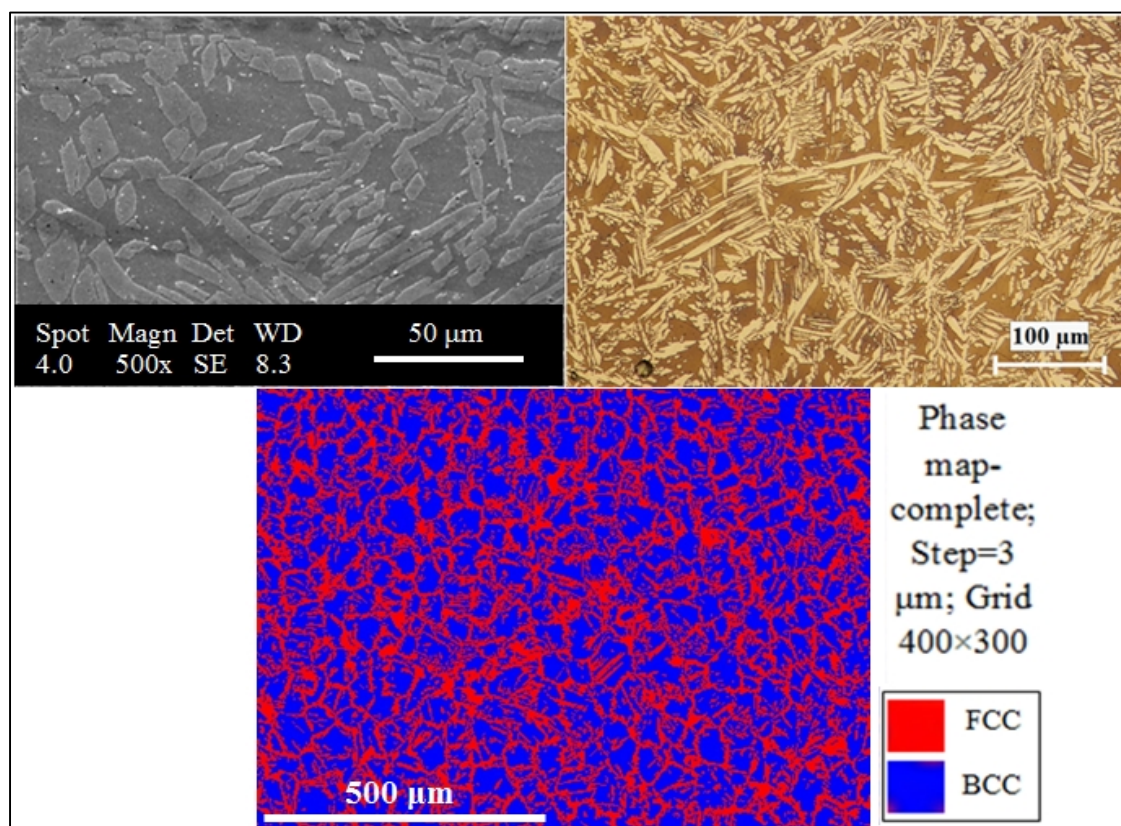
ب) منطقه ذوب

با توجه به شکل (۳) مشخص شد که فلز جوش شامل دانه های آستنیت پراکنده در زمینه فریت است. با توجه به این نکته که انجماد فولادهای زنگ نزن به صورت فریتی می باشد و سپس آستنیت طی استحاله حالت جامد در داخل فریت جوانه زنی کرده و پدید می آید، درصد نهایی فریت و آستنیت به ترکیب شیمیایی فلز پایه و پرکننده و سرعت سرد شدن بستگی دارد. آستنیت در فلز جوش فولادهای دوفازی به سه شکل از فریت جوانه می زند که عبارتند از:

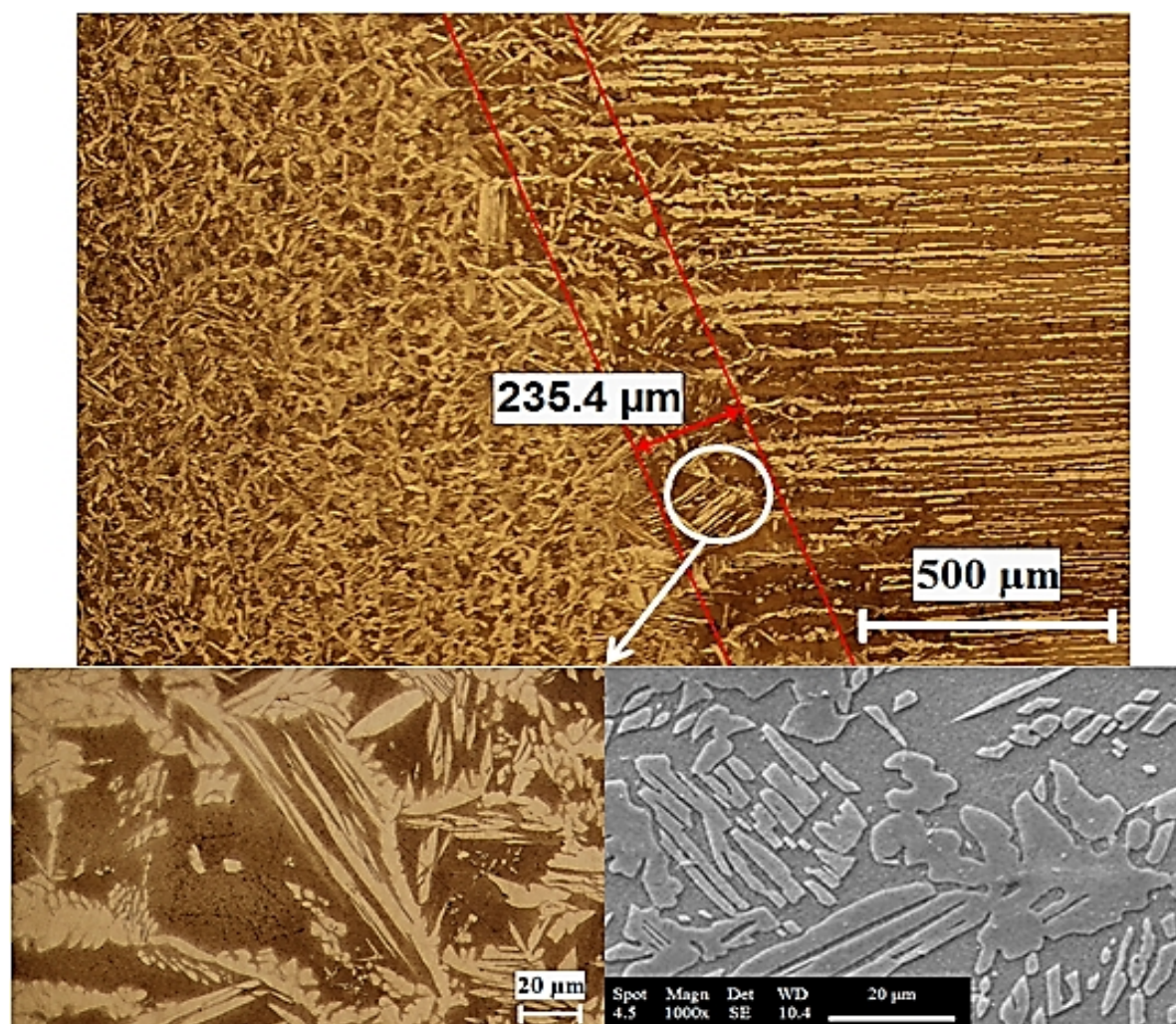
- به صورت چند شکلی در مرز دانه های فریت.
- به صورت ورقه های ویدمن اشتاتن.



شکل ۲- الف) تصویر میکروسکوپ نوری فلز پایه (فولاد S32750)، ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی فلز پایه با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر، ج) تصویر مربوط به نقشه فازی



شکل ۳- الف) ریز ساختار فلز جوش نمونه ی جوشکاری شده به روش GTAW ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی از فلز جوش نمونه جوشکاری شده به روش GTAW، ج) نقشه فازی منطقه جوش



شکل ۴- ریز ساختار منطقه متأثر از نمونه ی جوشکاری شده به روش GTAW

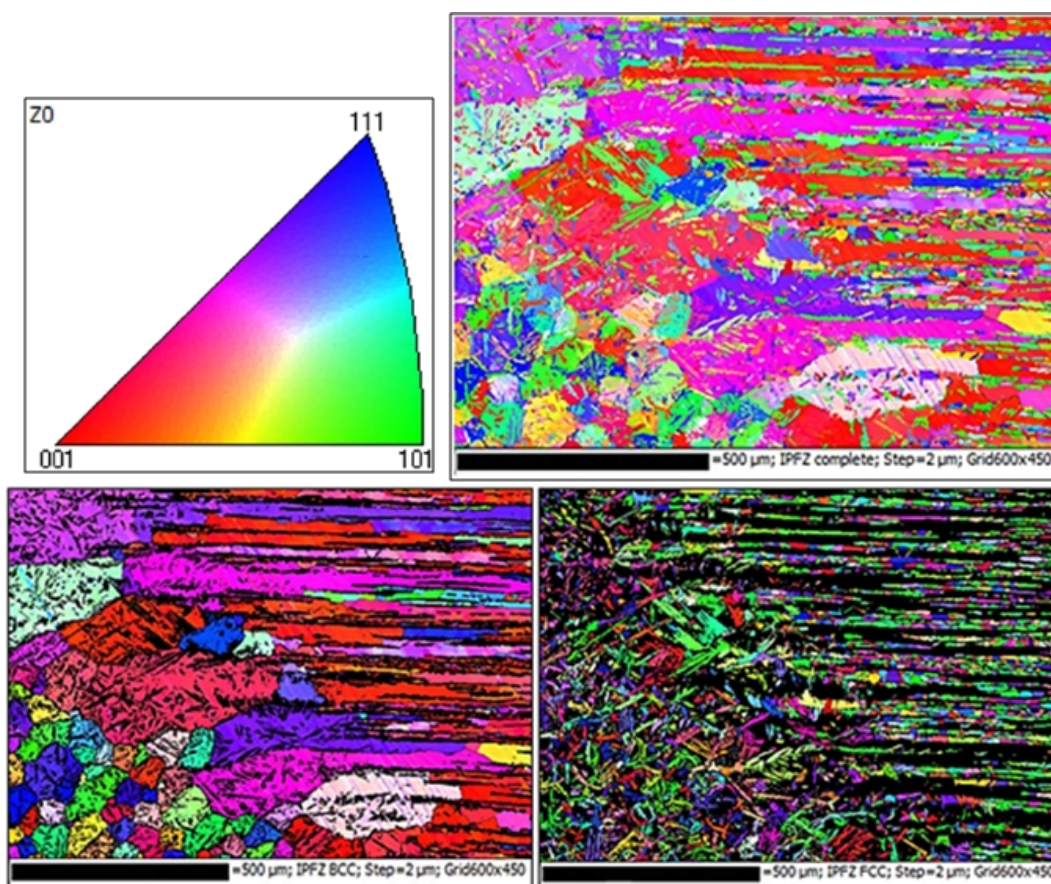
- به صورت رسوبات بین دانه ای.

از بین موارد ذکر شده آستنیت مرزدانه ای و ویدمن اشتاتن در دماهای بالاتر تشکیل می شوند، بنابراین نیروی محرکه کمتری نیاز دارند. اما آستنیت بین دانه ای در دماهای پایین تر تشکیل می شود و بنابراین به میزان تحت ایجاد بیش تری نیاز دارد. بنابراین می توان گفت آستنیت های وید من اشتاتن و چند شکلی در همان ابتدا در دماهای بالا تشکیل می شوند، در صورتی که ذرات آستنیت درون دانه ای به نیروی محرکه بیش تری نیاز دارند [۴]. همان طور که در شکل (۳-الف) مشاهده می شود در این منطقه رشد دانه های در داخل فریت به صورت دندریتی است. در شکل (۳-الف) فاز تیره رنگ فریت و فاز روشن آستنیت می باشد.

ج) منطقه متأثر از حرارت

این منطقه در بین مناطق فلز پایه و ذوب قرار گرفته است. به دلیل نرخ بالای سرد شدن ناشی از جوش های ذوبی ریز ساختار این منطقه دارای نسبت های غیر تعادلی از فریت و آستنیت می باشد. در منطقه متأثر از حرارت سه پدیده اتفاق می افتد که به ترتیب عبارتند از:

- حل شدن آستنیت در اثر حرارت ناشی از جوشکاری.
 - رشد دانه های فریت دلتا.
 - استحاله تبدیل فریت دلتا به آستنیت (در دمای ۸۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد) [۱۲].
- همان طور که گفته شد در هنگام جوشکاری در منطقه متأثر از حرارت ابتدا ساختار به صورت کاملاً فریتی در می آید و در



شکل ۵- تصویر مربوط به نقشه فازی منطقه متأثر از حرارت نمونه یاتصال یافته به روش GTAW، الف) کامل، ب) فاز FCC، ج) فاز BCC

و بنابراین نیتروژن به صورت نیتريد کروم رسوب می کند. همچنین حرارت ورودی کم باعث می شود استحاله حالت جامد تبدیل فریت به آستنیت به کندی پیشرفت کند و در نتیجه درصد فریت در ساختار افزایش خواهد یافت [۱۴ و ۳]. برای توضیح بهتر تأثیر حرارت ورودی از معادلات رزنتال استفاده می شود [۱۳]. بر طبق روابط رزنتال حرارت ورودی زیاد باعث می شود نرخ سرد شدن کاهش یابد. با کاهش نرخ سرد شدن زمان کافی برای استحاله فریت به آستنیت فراهم می شود، بنابراین مقدار آستنیت در ساختار نهایی افزایش می یابد.

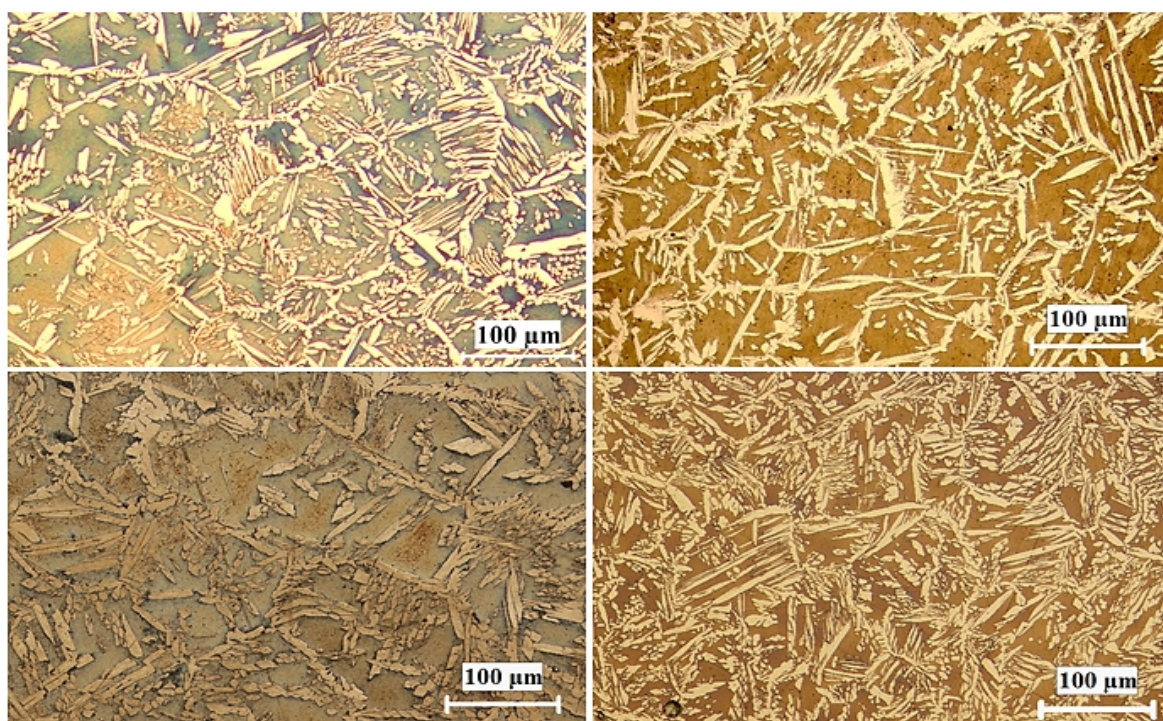
با مقایسه تصاویر شکل (۶) مشخص می گردد با افزایش حرارت ورودی درصد آستنیت فلز جوش (مناطق دندردیتی) افزایش یافته است. همان طور که از مقایسه بین نمونه های ۱ و ۳ مشخص است با افزایش حرارت ورودی به فلز جوش، درصد آستنیت

ادامه به علت نرخ سرد شدن بالا (که در جوشکاری ذوبی ناچاراً اتفاق می افتد) و عبور سریع از گستره دمایی تشکیل آستنیت، استحاله نفوذی فریت به آستنیت سریعاً متوقف می شود و در این منطقه در مقایسه با فلز پایه و منطقه ذوب آستنیت کمتری تشکیل می گردد [۱۲ و ۷]. همچنین اندازه دانه ها در این منطقه بیش تر از فلز پایه می باشد (شکل ۴ و ۵). عرض این منطقه در حدود ۱۹۰ تا ۲۴۰ میکرومتر اندازه گیری شد. این منطقه در شکل (۴) قابل مشاهده است.

نرخ سرد شدن کم و زیاد هر کدام معایب و مزایایی در جوشکاری فولادهای دو فازی به همراه دارند. به طور مثال در نرخ سرد شدن بالا نیتروژن موجود در فولاد (که در این فولاد مقدار قابل توجهی می باشد) نمی تواند از فریت به سمت آستنیت نفوذ کند (زمان کافی برای نفوذ را پیدا نمی کند). در نتیجه یک منطقه غنی از نیتروژن در فاز فریت به وجود می آید.

جدول ۴- درصد حجمی آستنیت منطقه ذوب، عرض HAZ و میزان حرارت ورودی برای نمونه های اتصال یافته به روش GTAW

شماره نمونه	حرارت ورودی (kJ)	درصد آستنیت منطقه ذوب	عرض منطقه متأثر از حرارت (μm)
۱	۱/۱	۴۷/۴	220 ± 17
۲	۱/۰	۴۵/۲	203 ± 10
۳	۱/۳	۵۰/۵	235 ± 21
۴	۱/۱	۴۶/۸	212 ± 18



شکل ۶- ریزساختار منطقه ذوب پس از جوشکاری. الف) نمونه شماره ۱، ب) نمونه شماره ۲، ج) نمونه شماره ۳، د) نمونه شماره ۴

بدست آمد. همان طور که اشاره شد با مقایسه نمونه ۱ و ۳ مشاهده شد کاهش حرارت ورودی باعث کاهش فاصله بازوهای دندربیتی و در نتیجه ریز شدن ساختار شده است؛ که در نهایت منجر به افزایش استحکام و انعطاف پذیری شده است. از طرف دیگر با مقایسه نمونه ها، خصوصاً نمونه های شماره ۱ و ۴ مشاهده شد یکی از متغیرهای مهم کنترل کننده استحکام، حرارت ورودی است؛ که در نتایج کار سایر محققین نیز همین نتیجه بدست آمده است [۸ و ۱۵]. افزایش حرارت ورودی نیز به دلیل افزایش اندازه دانه ها باعث کاهش استحکام تسلیم و کششی و همچنین کاهش انعطاف پذیری در نمونه شماره ۳ شده است.

نتایج حاصل از شکست نگاری بر روی نمونه های کشیده شده

فلزجوش افزایش می یابد. در منطقه متأثر از حرارت افزایش حرارت ورودی باعث کم شدن سرعت سرد شدن می گردد و استحاله تبدیل فریت به آستنیت فرصت پیشروی بیش تری پیدا می کند و درصد آستنیت در ریز ساختار افزایش می یابد. همچنین با افزایش حرارت ورودی عرض منطقه متأثر از حرارت نیز افزایش می یابد (جدول ۴) [۱۰ و ۱۲].

۲- خواص مکانیکی

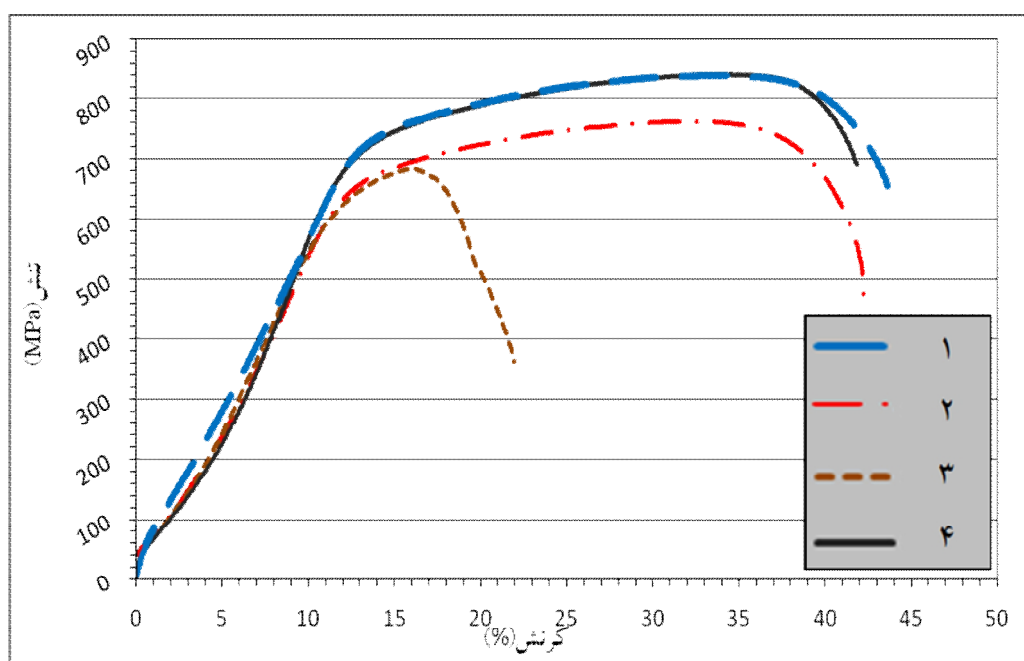
خواص مکانیکی توسط آزمون های کشش، شکست نگاری و سختی بررسی شد.

الف) آزمون کشش

پس از انجام آزمایش کشش نتایج مطابق با جدول (۵) و شکل (۷)

جدول ۵- میزان استحکام تسلیم، استحکام کششی و مقدار ازدیاد طول برای نمونه های جوشکاری شده به روش GTAW

شماره نمونه	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	انعطاف پذیری	حرارت ورودی (kJ/mm)
۱	۸۳۸	۷۲۰	۲۰/۲	۱/۱
۲	۷۶۱	۶۴۰	۱۲/۰	۱/۰
۳	۶۸۲	۶۰۲	۱۰/۹	۱/۳
۴	۸۴۰	۷۱۸	۱۶/۸	۱/۱



شکل ۷- نمودار تنش کرنش مهندسی نمونه های جوشکاری شده به روش GTAW

ب) سختی

به طور کلی سختی فولادهای دو فازي تابع دو عامل مختلف است که به ترتیب عبارتند از:

- درصد فازهای فریت و آستنیت در ریز ساختار حضور فازهای ثانویه (به طور مثال فاز سیگما) [۱۶ و ۱۷].

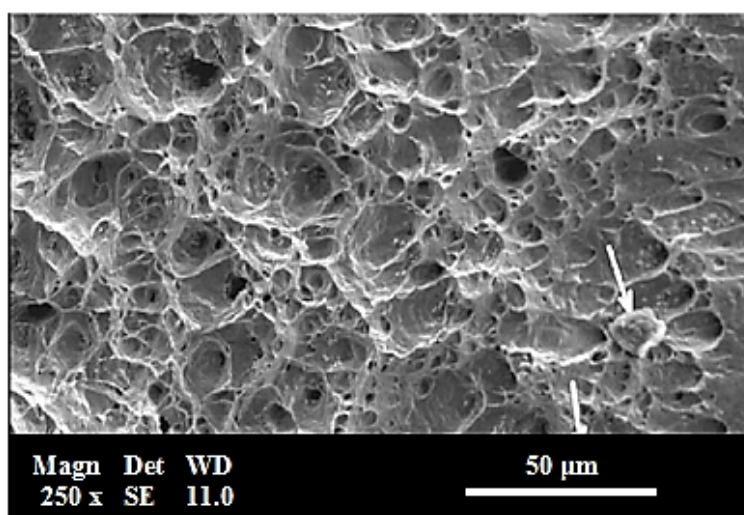
در مراجع مختلف عنوان شده است که به منظور عدم تشکیل فازهای ثانویه حین جوشکاری فولاد دوفازی UNS S32750 می بایست حرارت ورودی کمتر از ۱/۵ کیلوژول بر میلی متر در نظر گرفته شود [۸ و ۲].

بنابراین حرارت ورودی به گونه ای تنظیم شده که فازهای ثانویه تشکیل نگردد، بنابراین تنها عامل کنترل کننده سختی درصد فازهای فریت و آستنیت می باشند.

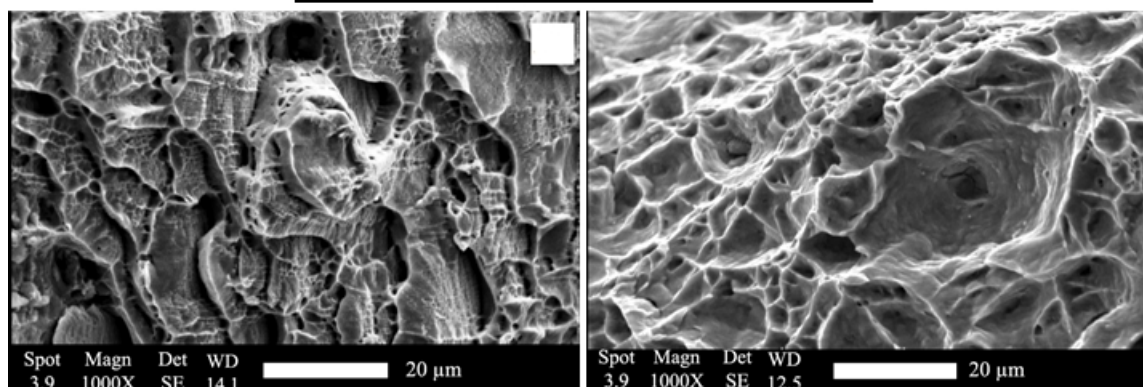
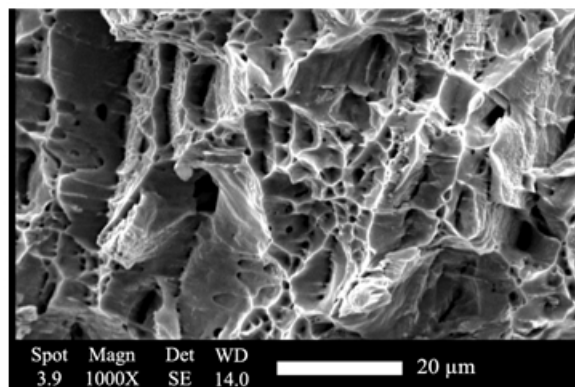
(در آزمون کشش) در شکل (۹ و ۸) قابل مشاهده می باشد. همان طور که مشاهده می شود شکل ها دارای دو قسمت دیمپل ها و صفحات تورقی (رخ برگي) می باشند. دیمپل ها نشان دهنده شکست نرم و صفحات رخ برگي نشان دهنده شکست ترد می باشند. نوع شکست نمونه ها به صورت مخلوط نرم و ترد می باشد (بیشتر تصویر را دیمپل ها تشکیل داده اند). ولی به طور کلی نمونه های جوشکاری شده به روش قوسی الکترود تنگستنی بیشتر به صورت نرم شکسته شده اند، که این نتیجه گیری در تحقیق تاواریس نیز دیده شده است [۱۴]. در جایی که حرارت ورودی یکسان بوده است تقریباً سطح شکست ها نیز باهم تطابق خوبی دارند (تصویر ب و ج شکل ۹).

جدول ۶- درصد حجمی فریت و آستنیت اندازه گیری شده توسط دستگاه فریت سنج در نواحی مختلف نمونه های جوشکاری شده.

شماره نمونه	آنالیز توسط فریت سنج		آنالیز توسط نرم افزار Clemex			
	درصد فریت		فلز پایه		منطقه ذوب	
	فلز پایه	منطقه ذوب	درصد فریت	درصد آستنیت	درصد فریت	درصد آستنیت
۱	۶۰/۳	۴۷/۵	۶۱/۳	۳۸/۷	۵۳/۸	۴۶/۲
۲	۶۲/۱	۴۸/۷	۶۰/۴	۳۹/۶	۵۵/۶	۴۴/۴
۳	۵۸/۶	۴۵/۱	۶۳/۲	۳۶/۸	۵۰/۹	۴۹/۱
۴	۶۱/۵	۴۸/۲	۵۹/۹	۴۰/۱	۵۳/۵	۴۶/۵

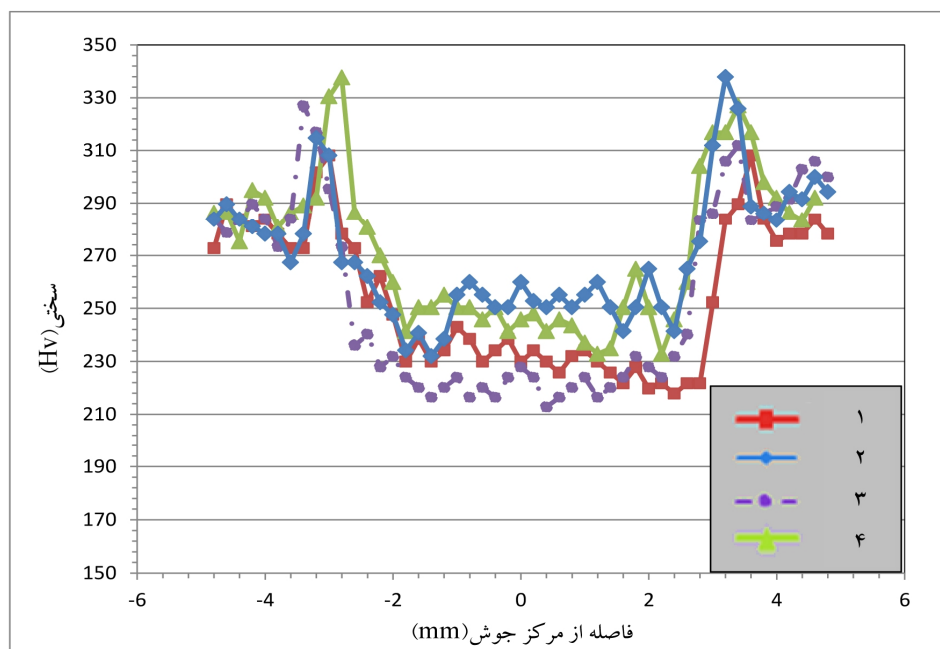


شکل ۸- تصویر سطح شکست نمونه فلز پایه (فولاد پایه (فولاد ۳۲۷۵۰) [V]



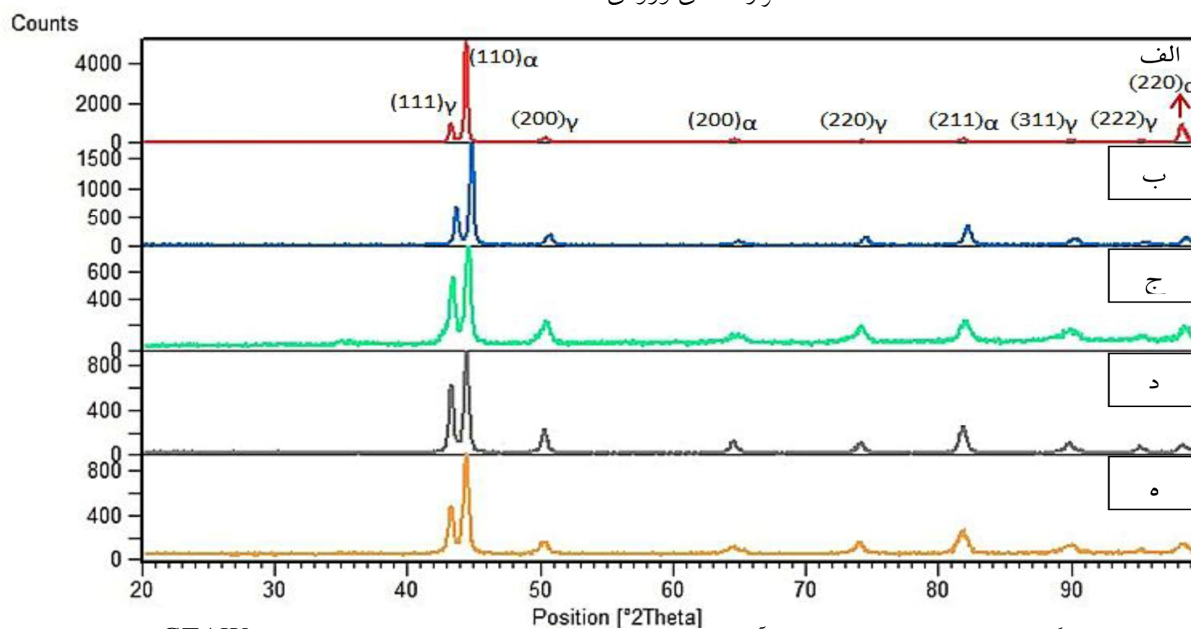
شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح شکست نمونه های اتصال یافته به روش GTAW (الف) نمونه شماره ۱،

(ب) نمونه شماره ۳، (ج) نمونه شماره ۴



شکل ۱۰- پروفیل سختی نمونه های فولاد S32750 جوشکاری شده به روش GTAW با

حرارت های ورودی مختلف



شکل ۱۱- الگوی پراش پرتوی ایکس بدست آمده برای فلز پایه و نمونه های جوشکاری شده به روش GTAW. (الف)

فلز پایه، (ب) نمونه شماره ۱، (ج) نمونه شماره ۲، (د) نمونه شماره ۳، (ه) نمونه شماره ۴

این کاهش به دلیل افزایش اندازه دانه ها پس از جوشکاری می باشد. با مقایسه نمونه شماره ۳ با سایر نمونه ها مشخص می شود که در نمونه ای که حرارت ورودی بالاتر بوده است سختی در منطقه ذوب کاهش بیشتری نسبت به سایر نمونه ها داشته است.

به علت بالا بودن نرخ سرد شدن در منطقه متأثر از حرارت، مقدار آستنیت این منطقه کمتر از آستنیت منطقه جوش و فلز پایه است؛ بنابراین عدد سختی منطقه متأثر از حرارت بالاتر از سختی فلز پایه و منطقه ذوب می باشد. همچنین در همه نمونه ها در ناحیه ذوب مقطع جوش سختی کاهش یافته است،

ج) فازبازی کمی با استفاده از نرم افزار Clemex

با توجه به عکس های گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری و با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری clemex درصد فریت و آستنیت در مناطق مختلف اندازه گیری شد، که نتایج آن در جدول (۶) آورده شده است. نتایج موجود در جدول (۶) نشان می دهد که درصد فازهای فریت و آستنیت بدست آمده توسط نرم افزار با درصد های بدست آمده توسط فریت سنج تقریباً تطابق مناسبی دارد.

از طرفی در هر دو روش میزان فریت فلز جوش در نمونه شماره ۳ کمتر از سایر نمونه ها می باشد، که به دلیل بالا بودن حرارت ورودی در این نمونه می باشد. همچنین درصد فریت نمونه های شماره ۱ و ۴ در هر دو روش تقریباً با هم برابر است که این نشان دهنده این مطلب می باشد که یکی از متغیرهای مهم کنترل کننده درصد حجمی فریت و آستنیت حرارت ورودی است [۱۶-۱۴].

نتیجه گیری

پس از انجام جوشکاری دانه های آستنیت در منطقه ذوب از حالت کشیده و موازی به دندریتی تغییر شکل داده اند. در مقطع جوشکاری سختی در منطقه ذوب نسبت به فلز پایه از حدود ۲۸۵ ویکرز به ۲۵۰ ویکرز کاهش یافته است. در منطقه متأثر از حرارت به دلیل نفوذ احتمالی کاربید کروم درون فریت و کاهش درصد آستنیت سختی تا ۳۴۰ ویکرز افزایش یافته است.

با مقایسه نمونه های جوشکاری شده می توان دریافت که افزایش حرارت ورودی از ۱ تا ۱/۳ کیلوژول در هنگام جوشکاری منجر به افزایش اندازه دانه ها از ۲۵ به ۳۷ میکرومتر و همچنین افزایش درصد آستنیت از ۴۵ تا ۵۰ درصد شده است.

از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نتیجه می شود که نوع شکست نمونه ها به صورت مخلوط نرم و ترد بوده است (حضور دیپل ها و صفحات رخ برگی به صورت همزمان در یک سطح شکست باعث این نتیجه گیری شده است).

با دقت در نمودار شکل (۱۰) مشخص می شود که سختی نمونه شماره ۲ در مقطع جوش بیش تر از سایر نمونه ها می باشد که به دلیل پایین بودن حرارت ورودی در این نمونه نسبت به سایر نمونه ها می باشد. با توجه به نمودار شکل (۱۰) می توان گفت متوسط عدد سختی در ناحیه ذوب فولاد با افزایش حرارت ورودی کاهش یافته است، که این نتیجه مطابق با نتایج تحقیقات سایر محققین در این زمینه می باشد [۷ و ۱۴].

۳) فازبازی

الف) فازبازی کیفی توسط پراش پرتوی ایکس

الگوی پراش پرتوی ایکس به دست آمده برای نمونه های جوشکاری شده و فلز پایه مطابق با شکل (۱۱) می باشد. همانطور که دیده می شود فازهای تشکیل دهنده پس از جوشکاری همانند قبل از جوشکاری فریت و آستنیت می باشند، این نتیجه گیری در تحقیق تاواریس نیز آمده است [۱۴].

ب) فازبازی کمی به کمک فریت سنج

پس از یافتن درصد فریت در نمونه های اتصال یافته به روش GTAW با فریت سنج نتایج مطابق با جدول (۶) مشاهده شد. در همه نمونه ها درصد حجمی فریت در حدود ۵۰ درصد می باشد و این نشان دهنده آن است که تقریباً درصد اسمی فریت و آستنیت باهم برابر است که نتیجه مطلوبی می باشد. با مقایسه نمونه های شماره ۲ و ۳ مشاهده می شود با افزایش حرارت ورودی میزان کاهش فریت نیز افزایش یافته است. افزایش حرارت ورودی موجب کاهش نرخ سرد شدن شده است. در نتیجه زمان کافی برای پیشرفت استحاله حالت جامد تبدیل فریت به آستنیت فراهم شده است، و در نهایت میزان فریت در ساختار نهایی کاهش بیش تری یافته است. همچنین با مقایسه نمونه شماره ۱ و ۴ که جوشکاری در یک حرارت ورودی انجام شده است مشاهده می شود که درصد فریت بسیار نزدیک به هم دارند. بنابراین می توان گفت یکی از متغیرهای مهم کنترل کننده درصد فازهای حاصل از جوشکاری حرارت ورودی می باشد.

مراجع

- of super duplex stainless steel claddings produced by the gas tungsten arc welding process", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 244, pp. 45-51, 2014.
10. Cervo, R., Ferro, P., Tiziani, A., Zucchi, F., "Annealing temperature effects on super duplex stainless steel UNS S32750 welded joints. II: pitting corrosion resistance evaluation", *Journal of Material Science*, Vol. 45, pp. 4378-4389, 2010.
11. Eghlimi, A., Shamanian, M., Eskandarian, M., Zabolian, A., Szpunar, A., "Characterization of microstructure and texture across dissimilar superduplex/austenitic stainless steel weldment joint by super duplex filler metal", *Materials Characterization*, Vol. 106, pp. 27-35, 2015.
12. Hemmer, H., Grong, Q., Klokkehaug, S., "A process model for the heat-affected zone microstructure evolution in duplex stainless steel weldments", *welding Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 31, pp. 1035-1048, 2000.
۱۳. سیندو کو، شمعانیان و اشرفی (مترجمین)، متالورژی جوشکاری، انتشارات جهاد دانشگاهی، ۱۳۸۵.
14. Tavares, S., Pardal, J., Lima, L., Bastos, N., Nascimento, A., Souza, L., "Characterization of microstructure, chemical composition, corrosion resistance and toughness of a multipass weld joint of super duplex stainless steel UNS S32750", *Materials Characterization*, Vol. 58, pp. 610-616, 2007.
15. Varol, I., *Microstructure/property relationships in the weld heat-affected zone of duplex stainless steels*, PhD Thesis, Ohio state university, 1992.
16. Sharifi, S.H. *Microstructure of super duplex stainless steel*, Ph.D Thesis, university of Cambridge, 1993.
17. Escriba, D.M., Materna-Morrisb, E. Plaut, R.L. Padilla, A.F., "Chi-phase precipitation in a duplex stainless steel" *Material characterization*, Vol 60, pp. 1214- 1219. 2009.
1. Lippold, J.C., Kotecki, D.J., ZHU, *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, Vol. 13, 1999.
2. Petterson, C.O., Fager, S.A., "Welding practice for the Sandvik duplex stainless steels SAF 2304, SAF 2205 and SAF 2507", AB Sandvik steel Sweden, 1995.
3. Fager, S.A., Odegard, L., "Welding of the Super Duplex Stainless Steel Sandvik SAF2507 (UNS S32750)", *Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference*, 1993.
4. Muthupandi, V., BalaSrinivasan, P., Seshadri, S.K., Sundaresan S., "Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 358, pp. 9-16, 2003.
5. Cervo, R., "Annealing temperature effect on super duplex stainless steel UNS S32750 welded joint", *Material science and engineering*, Vol. 45, pp. 4369-4377, 2010.
6. Chavdarov, P., "Electron Beam Welding of Super duplex Stainless Steel UNS S32750", *Stainless Steel World 2007 Conference*, Netherlands, 2007.
۷. صادقیان، م.، "جوشکاری غیر مشابه فولاد زنگ نزن دو فاز ۳۲۷۵۰ به فولاد کم آلیاژ استحکام بالا و ارزیابی خواص اتصال" *دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد*، ۱۳۹۱.
۸. امینی، م.، "جوشکاری غیر مشابه فولاد زنگ نزن سوپر دو فاز UNS S32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 316L و ارزیابی ریز ساختار و رفتار خوردگی" *دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد*، ۱۳۹۱.
9. Eghlimi, A., Shamanian, M., Raeissi, K., "Effect of current type on microstructure and corrosion resistance