علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال اول، شماره ۱، پاییز و زمستان ۹۴، صفحه ۶۳-۵۰

جوشکاری فولادزنگ نزن سوپر دوفازی UNS S32750 با روش قوسی الکترود تنگستن گاز و ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی

محمد اهل سرمدی[۱]، مرتضی شمعانیان[۱]، حسین ادریس[۱]، امیر بهجت[۱]، محمدعلی مهتدی بناب[۲]، جرزی 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 نسخهٔ 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 میلی‌متر 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 فریتِ 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 دو فازی ، جوشکاری قوسی الکترود تنگستنی 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 Sarmadi[1], M. Shamanian[1], H.Edris[1], A.Behjat[1], M. A. Mohtadi Bonab[2], J. Szpunar[2]

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

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 intermetalic 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 فازی 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 تنشی می شود؛ اگر چه اثرات نامطلوبی مانند کاهش چقرمگی در دمای پایین را نیز به همراه دارد. ساختار این فولادها عمدتاًدارای ۱۹ تا ۲۶ در صد وزنی کروم، ۴ تا ۸ درصد نیکل و ۱/۵ تا ۴ درصد مولیبیدن است. همچنین وجود نیتروژن به عنوان یک عامل آستنیت زا نقش مهمی را در ریز ساختار این فولادها ایفا می کند[۱و۲].فولاد زنگ نزن سوپر دوفازی به گروهی از فولادهای زنگ نزن دو فازی گفته می شود که عدد PREN[1] آن بالاتر از ۴۰ باشد.فولاد UNS S32750یکی از پرکاربردترین فولادهای زنگ نزن سوپر دو فازی 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 مولیبیدن و بیش از ۰/۲ درصد نیتروژن(عامل آستنیت زا) است[۳].

کنترل حرارت ورودی[2] در جوشکاری این نوع فولادها برای دستیابی به ساختار مطلوب ضروری می باشد. حرارت ورودی بالا باعث تشکیل فازهای مضری نظیر سیگما[3] و چی[4] می گردد. همچنین حرارت ورودی بسیار پایین نیزموجب افزایش درصد فریت در ریزساختار می گردد و نیز باعث ایجاد فازهای نامطلوبی نظیر نیترید کروم(Cr2N)می شود[۴]. بنابراین می‌توان گفت که در مورد جوشکاری فولادهای دو فازی (درترکیب شیمیایی ثابت)، یکی از مؤثرترین متغیرهای کنترل کننده ی خواص اتصال حاصل،حرارت ورودی می‌باشد [۵،۲و۶].همچنین با توجه به اینکه اتصالات حاصل از انجام جوشکاری الکترود تنگستنی با گاز محافظ[5] برروی انواع فولادها خصوصا فولادهای دوفازی خواص مکانیکی و ریزساختاری مناسبی به همراه داشته است. بنابراین با توجه به پرکاربرد بودن فولاد سوپر دو فازی UNS S32750در 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 میلی‌متر

1 Pitting Resistance Equivalent Number
2 Heat Input
3 Sigma
4 Chi
5 Gas Tungsten Arc Welding

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

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 همان‌طور که پیش‌تر گفته شد با افزایش حرارت ورودی، میزان آستنیت ثانویه نیز افزایش یافته است.پروفیل سختی مقاطع جوش نشان داد که 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 سوپردو فازیUNS S32750 به فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 316L توسط امینی و همکاران بررسی گردید. برای یافتن تأثیر 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 میلی‌متر، موجب افزایش درصد آستنیت فلز جوش حاصل از ۶۰/۷۹ تا ۷۴/۴۷ درصد می شود. همچنین در این تحقیق تأثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری در دمای ۱۱۲۵ درجه سانتی‌گراد بر ریز ساختار مورد بررسی قرار گرفت که مشاهده شد تأثیر زیادی در حاصل ندارد، بنابراین انجام عملیات حرارتی با توجه به مشکلات تکنولوژیکی توصیه نمی گردد[۸].

در سایر تحقیقات همچون تاوارس و همکاران، اقلیمی و همکاران و سروو[1] 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[۱۱-۹].

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 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 S32750استفاده 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 سانتی‌متر و ضخامت ۳/۸ میلی‌متر بوده است. شرایط جوشکاری در جدول ۲ آورده شده است. برای انجام جوشکاری از فلز پرکننده دو فازیAWS ER ۲۵۹۴با قطر۲/۴ میلی‌متر با ترکیب شیمیایی که در جدول(۱) قابل مشاهده است، استفاده گردید. سپس قطعات در حالت جوشکاری 1Gو با آمپراژ و سرعت های گوناگون همان‌طور که در جدول(۳) مشاهده می‌شود 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 تأثیر میزان حرارت ورودی به قطعه، با خواص اتصال حاصل بررسی شده است[۱۳].

$$HI=\frac{\eta VI}{s} \qquad (۱)$$

که در این رابطه HI حرارت ورودی به قطعه در اثر جوشکاری (J/mm)،Vولتاژ دستگاه(بر حسب ولت)، I شدت جریان(برحسب آمپر)، S سرعت جوشکاری(برحسب 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

1 Cervo

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

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

عناصر	Mo	Ni	Cr	Mn	Si	C	N	W	Cu	P	S	Fe
فلز پایه(٪)	۴/۷۶	۶/۹۸	۲۶/۸۵	۰/۵۶	۰/۴۲	۰/۰۲۸	۰/۳	۰/۶۳	۰/۹۷	<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	الکترود	قطر الکترود
آرگون	۱۵ lit/min	۳۵°	GTAW	ثابت(CC)	منفی	تنگستنی	۲/۴ میلی متر

جدول۳- متغیرهای جوشکاری قوسی الکترود 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

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[1] شدند.

ترکیب محلول حکاکی:

70 mL H_2O + 30 mL HCl + 1 g $K_2S_2O_5$ + 1mL HF

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 سنباده زنی و پولیش انجام شد، در ادامه نمونه ها به مدت ۶ ساعت در دستگاه Vibromet 2 دارای محلول کلوئیدی سیلیکا با اندازه ذرات ۵۰ نانومتر پولیش نهایی شدند. در تهیه تصاویر EBSD از ولتاژ KV20، فاصله کاری[2] 15mm و اندازه گام[3] 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 فریت‌سنج[4] محاسبه شد و با درصدهای بدست آمده توسط نرم افزارهای آنالیز تصویری مقایسه شد.

نتایج وبحث

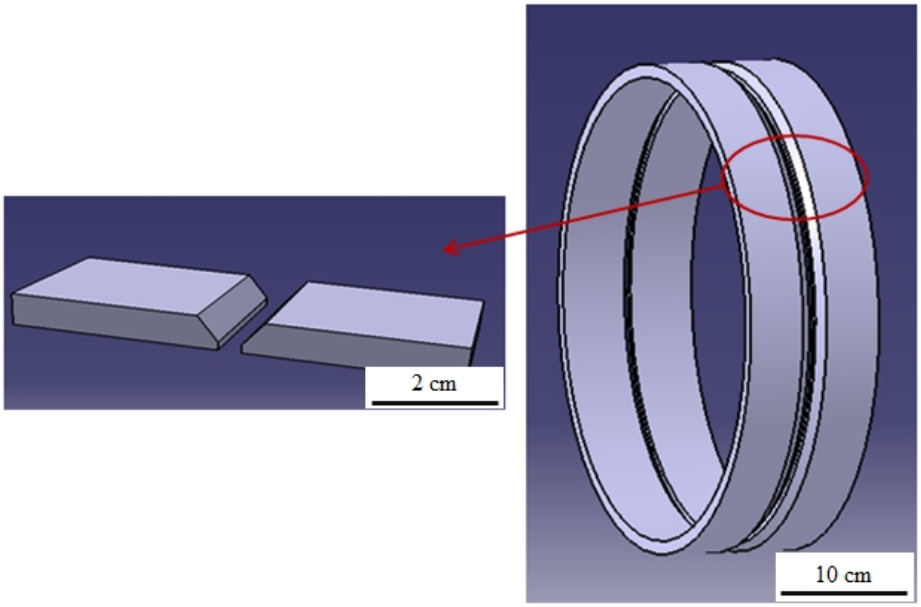
۱-ریزساختار

پس از انجام جوشکاری سه منطقه روی سطح مقطع جوش قابل

1 Etch

2 Working Distance
3 Step Size
4 Ferritoscope

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]



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 فولادUNS S32750مورد استفاده در این پژوهش از نوع کارشده 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. همانطور که درشکل(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 درفولاد S32750UNS نشان می‌دهد. 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 فازی[1] آنالیزEBSD این فولاد را نشان می دهد. همان‌طور 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 می‌باشد، بنابراین می توان گفت در فلز پایه تعادل یک به یک درصد حجمی فریت با آستنیت برقرار نمی باشد.

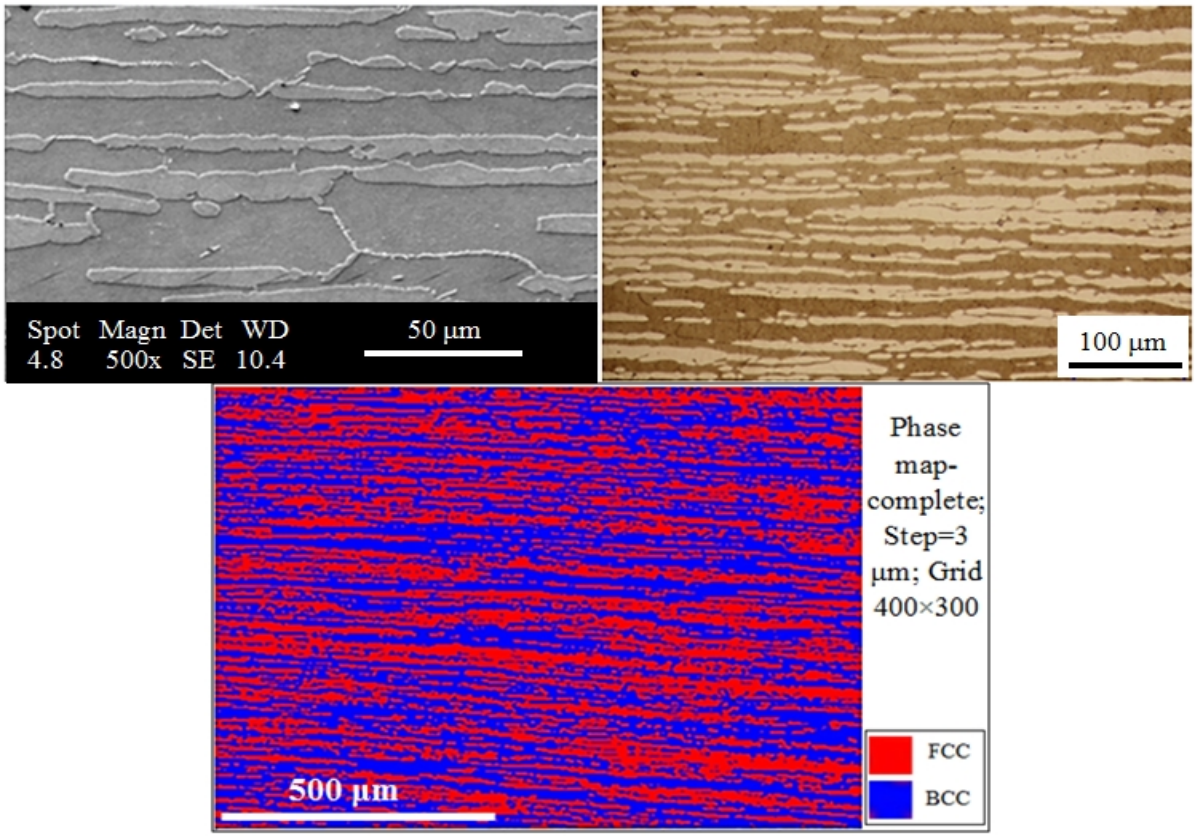
ب) منطقه ذوب

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 می‌زند که عبارتند از:

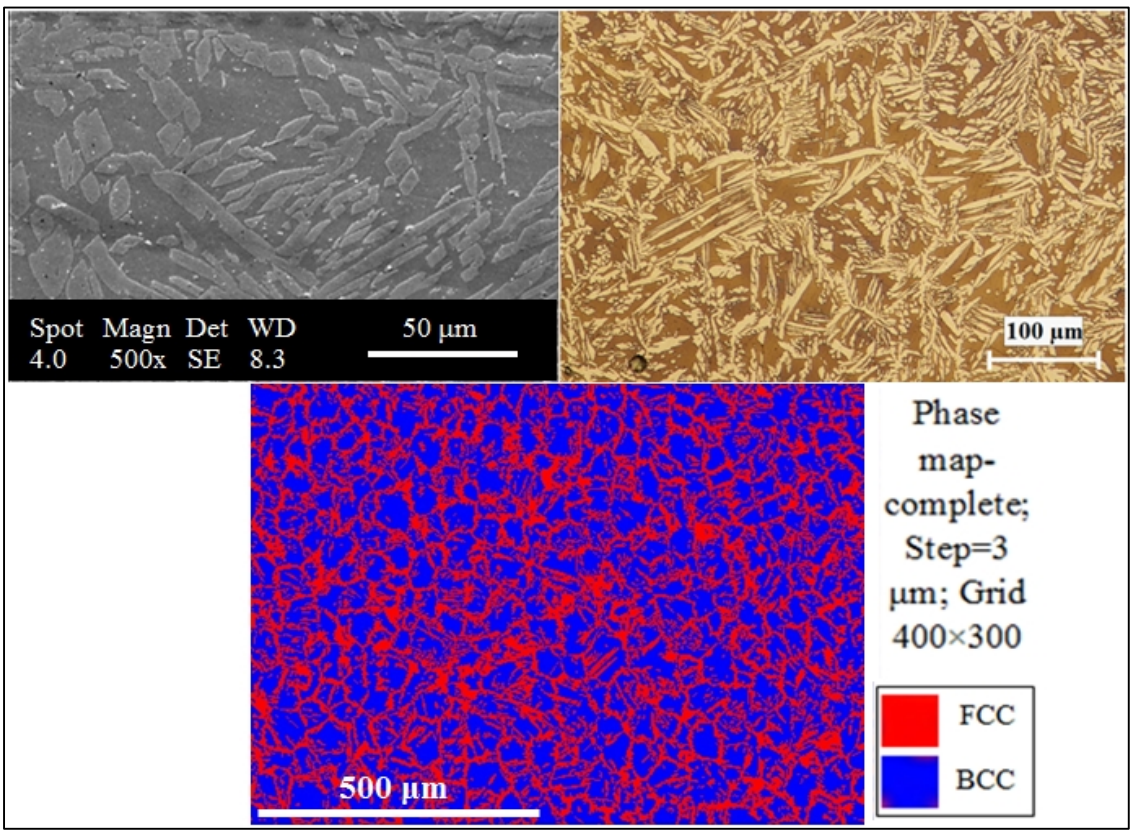
- به صورت چند شکلی در مرز دانه های فریت.
- به صورت ورقه های ویدمن اشتاتن.

1 Phase map

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

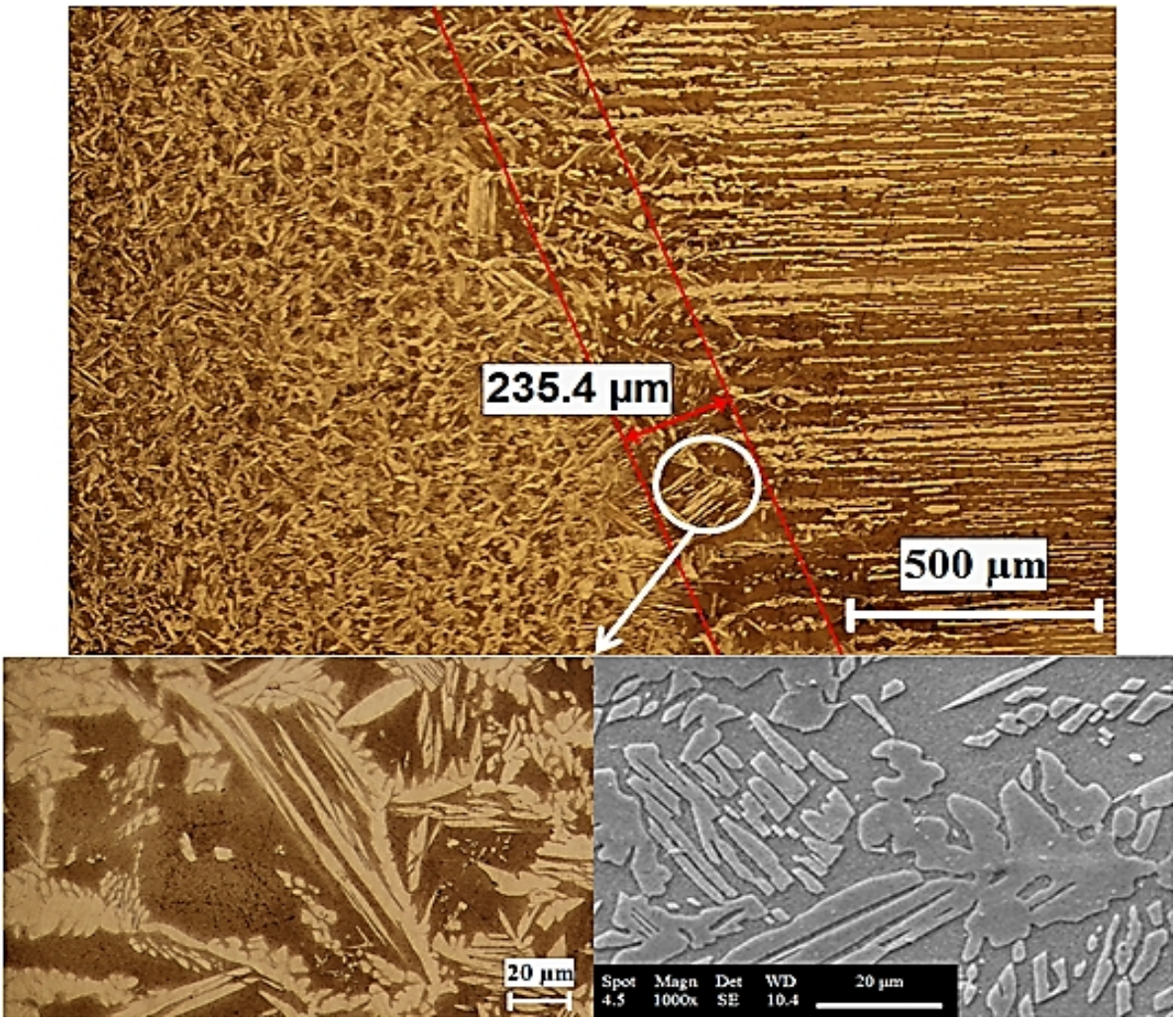


شکل ۲- الف) تصویر میکروسکوپ نوری فلز پایه(فولاد S32750)، ب)تصویر میکروسکوپ الکترونی فلز پایه با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر، ج) تصویر مربوط به نقشه فازی



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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]



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 انجاد 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]. همان‌طور 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.

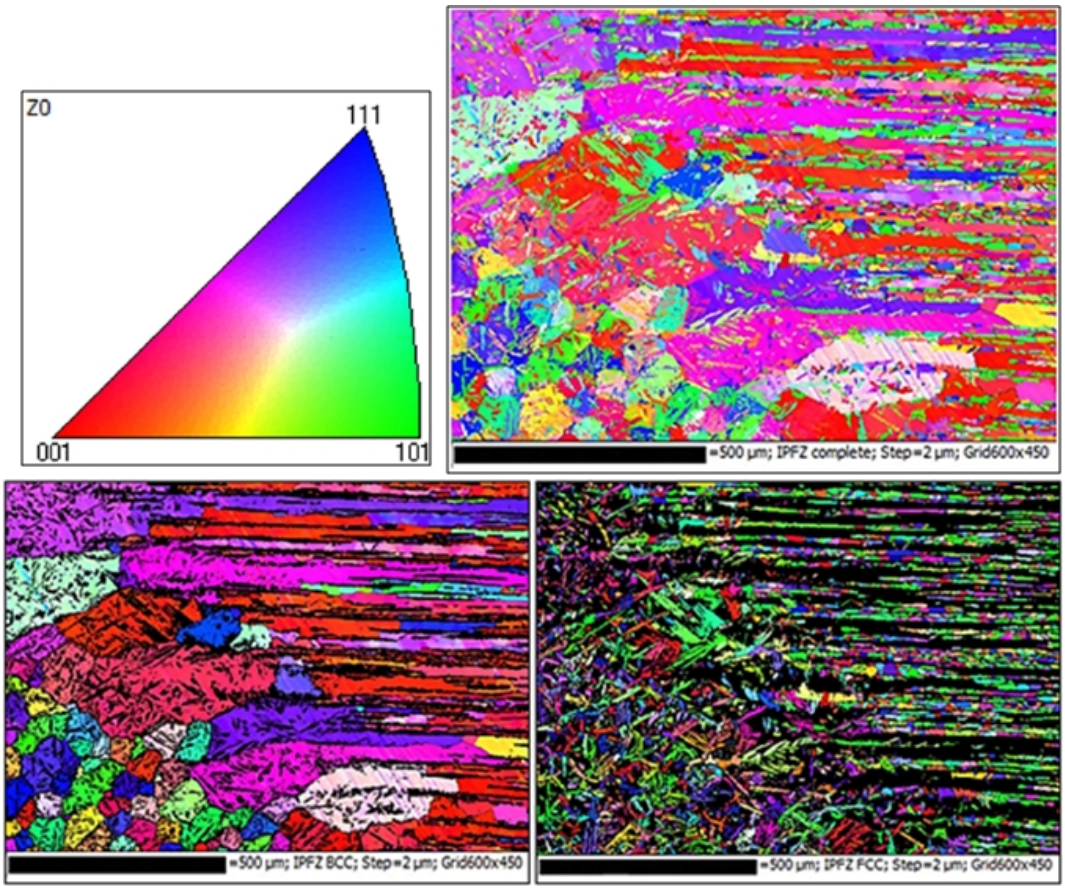
ج) منطقه متأثر از حرارت

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 می‌افتد که به ترتیب عبارتند از:

- حل شدن آستنیت در اثر حرارت ناشی از جوشکاری.
- رشد دانه‌های فریت دلتا.
- استحاله تبدیل فریت دلتا به آستنیت(در دمای ۸۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)[۱۲] .

همان‌طور که گفته شد در هنگام جوشکاری در منطقه متأثر از حرارت ابتدا ساختار به صورت کاملاً فریتی در می آید و در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]



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

ادامه به علت نرخ سرد شدن بالا(که در جوشکاری ذوبی ناچارا اتفاق می افتد) و عبور سریع از گستره دمایی تشکیل آستنیت، استحاله نفوذی فریت به آستنیت سریعا متوقف می شود و در این منطقه در مقایسه با فلز پایه و منطقه ذوب آستنیت کمتری تشکیل می گردد [۱۲و۷]. 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) نمی‌تواند 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 می‌آید و بنابراین نیتروژن به صورت نیترید کروم رسوب می کند.همچنین حرارت ورودی کم باعث می شود استحاله حالت جامدِ تبدیل فریت به آستنیت به کندی پیشرفت کند و در نتیجه درصد فریت در ساختار افزایش خواهد یافت[۳و۱۴].

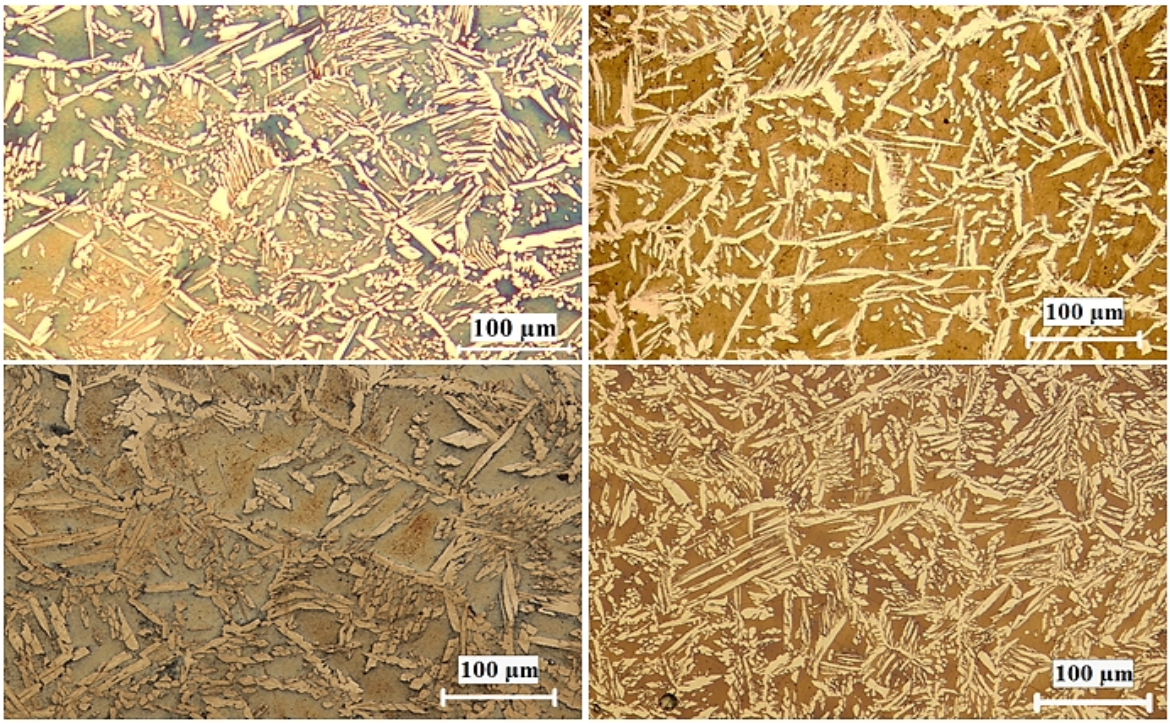
برای توضیح بهتر تأثیر حرارت ورودی از معادلات رزنتال استفاده می شود[۱۳]. بر طبق روابط رزنتال حرارت ورودی زیاد باعث می شود نرخ سرد شدن کاهش یابد. با کاهش نرخ سرد شدن زمان کافی برای استحاله فریت به آستنیت فراهم می‌شود، بنابراین مقدار آستنیت در ساختار نهایی افزایش می یابد.

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

جدول۴- 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	۲۲۰±۱۷
۲	۱/۰	۴۵/۲	۲۰۳±۱۰
۳	۱/۳	۵۰/۵	۲۳۵±۲۱
۴	۱/۱	۴۶/۸	۲۱۲±۱۸



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

فلزجوش افزایش می یابد.در منطقه متـأثر از حـرارت افـزایش حرارت ورودی باعث کم شدن سرعت سرد شدن مـی‌گـردد و استحاله تبدیل فریت به آستنیت فرصت پیشروی بیش تری پیدا مـی کنـد و درصـد آسـتنیت در ریـز سـاختار افـزایش می‌یابد.همچنین با افزایش حرارت ورودی عرض منطقه متأثر از حرارت نیز افزایش می یابد(جدول ۴)[۱۰و۱۲].

۲- خواص مکانیکی

خواص مکانیکی توسط آزمون های کشش، شکسـت نگـاری و سختی بررسی شد.

الف) آزمون کشش

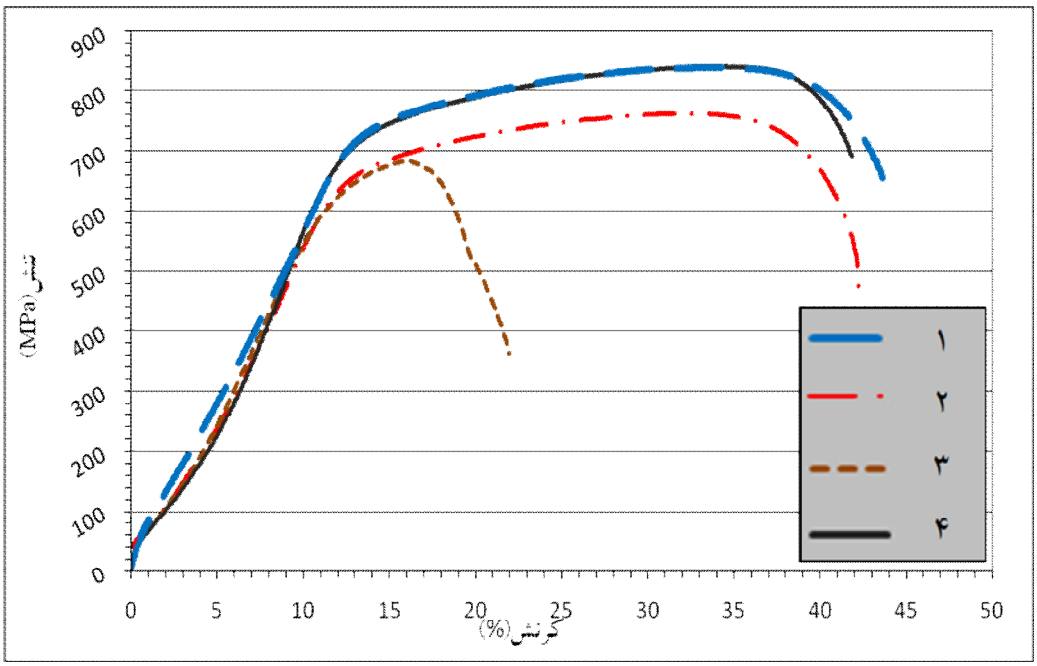
پس از انجام آزمایش کشش نتایج مطابق باجـدول(۵) و شـکل(۷) بدست آمد. همان‌طور کـه اشـاره شـد بـا مقایسـه نمونـه ۱و ۳ مشاهده شدکاهش حرارت ورودی باعث کاهش فاصله بازوهای دندریتی و در نتیجه ریز شدن ساختار شده است؛ که در نهایـت منجر به افزایش استحکام و انعطاف پذیری شده است. از طرف دیگر با مقایسه نمونه هـا، خصوصـا نمونـه هـای شـماره ۱و ۴ مشاهده شد یکـی از متغیرهـای مهـم کنتـرل کننـده اسـتحکام، حرارت ورودی است؛ که در نتایج کار سایر محققین نیز همـین نتیجه بدست آمده است[۸و۷و۱۵] . افزایش حرارت ورودی نیز به دلیل افزایش اندازه دانه ها باعث کـاهش اسـتحکام تسـلیم و کششی و همچنین کاهش انعطاف پـذیری در نمونـه شـماره ۳ شده است.

نتایج حاصل از شکست نگاری بر روی نمونه های کشیده شده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

جدول۵- 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 روشGTAW

(در آزمون کشش) در شکل(۸و۹) قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می شود شکل ها دارای دو قسمت دیمپل ها و صفحات تورقی(رخ برگی) می باشند. دیمپل ها نشان دهنده شکست نرم و صفحات رخ برگی نشان دهنده شکست ترد می باشند. نوع شکست نمونه ها به صورت مخلوط نرم و ترد می‌باشد (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 شده‌اند، که این نتیجه گیری در تحقیق تاوارس نیز دیده شده است[۱۴]. در جایی که حرارت ورودی یکسان بوده است تقریبا سطح شکست ها نیز باهم تطابق خوبی دارند (تصویر ب و ج شکل۹).

ب) سختی

به طور کلی سختی فولادهای دو فازی 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)[۱۶و۱۷].

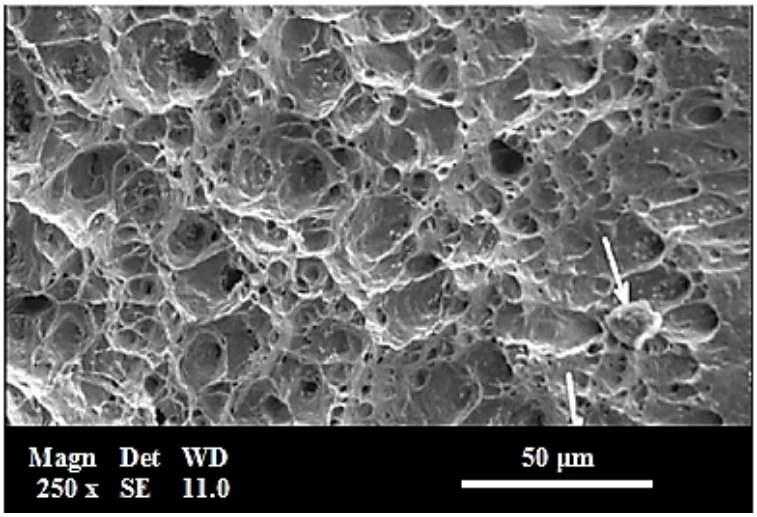
در مراجع مختلف عنوان شده است که به منظور عدم تشکیل فازهای ثانویه حین جوشکاری فولاد دوفازی UNS S32750 می بایست حرارت ورودی کمتر از ۱/۵ کیلوژول بر میلی متر در نظر گرفته شود[۲و۸].

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.

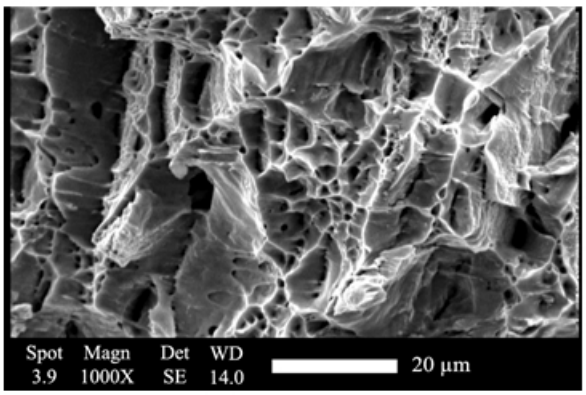
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

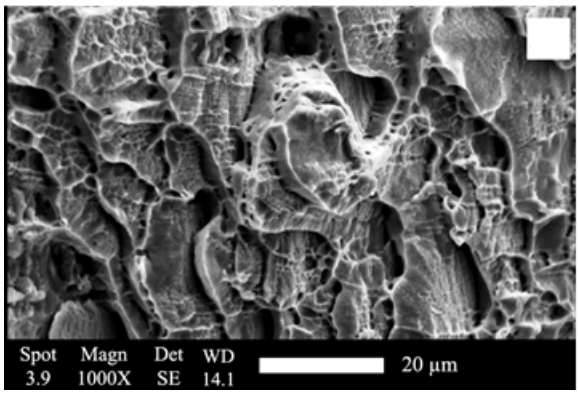
جدول۶-درصد حجمی فریت و آستنیت اندازه گیری شده توسط دستگاه فریت سنج در نواحی مختلف نمونه های جوشکاری شده.

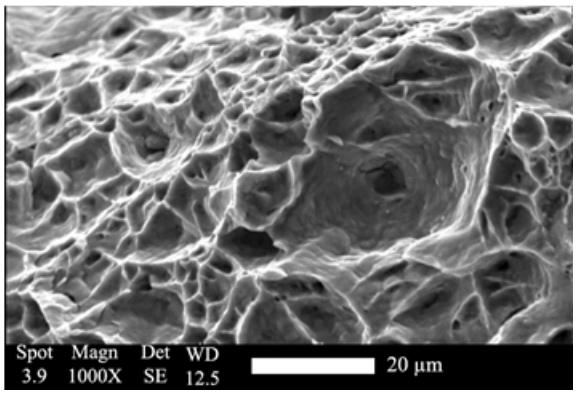
شماره نمونه	آنالیز توسط فریت سنج		آنالیز توسط نرم افزار *Clemex*				حرارت ورودی(Kj)
	درصد فریت		فلزپایه		منطقه ذوب		
	فلز پایه	منطقه ذوب	درصد فریت	درصد آستنیت	درصد فریت	درصد آستنیت	
۱	۶۰/۳	۴۷/۵	۶۱/۳	۳۸/۷	۵۳/۸	۴۶/۲	۱/۱
۲	۶۲/۱	۴۸/۷	۶۰/۴	۳۹/۶	۵۵/۶	۴۴/۴	۱/۰
۳	۵۸/۶	۴۵/۱	۶۳/۲	۳۶/۸	۵۰/۹	۴۹/۱	۱/۳
۴	۶۱/۵	۴۸/۲	۵۹/۹	۴۰/۱	۵۳/۵	۴۶/۵	۱/۱



شکل ۸- تصویر سطح شکست نمونه فلز پایه (فولاد پایه (فولاد ۳۲۷۵۰) [۷]

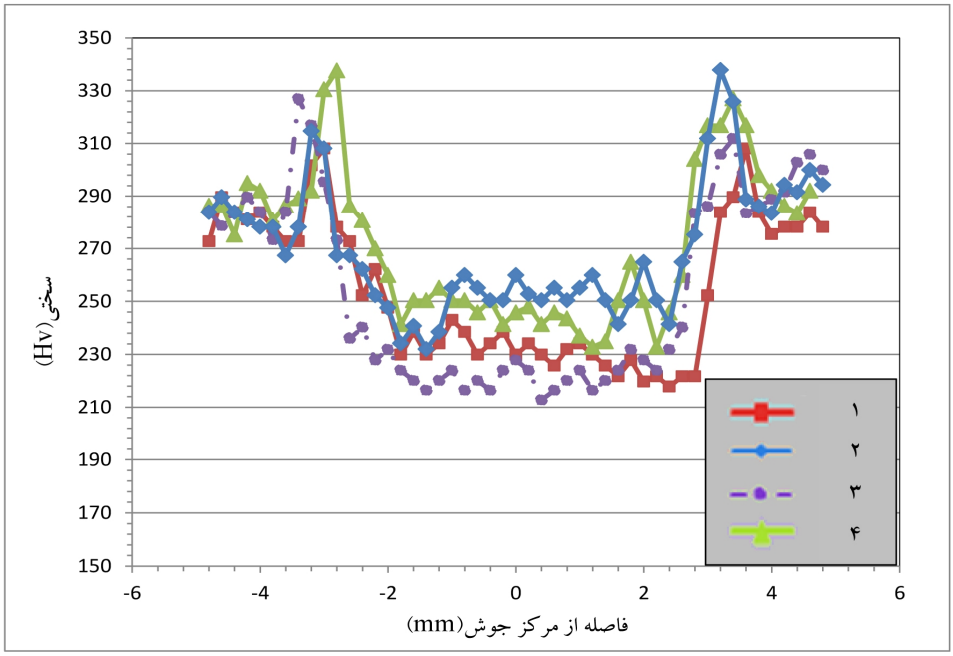




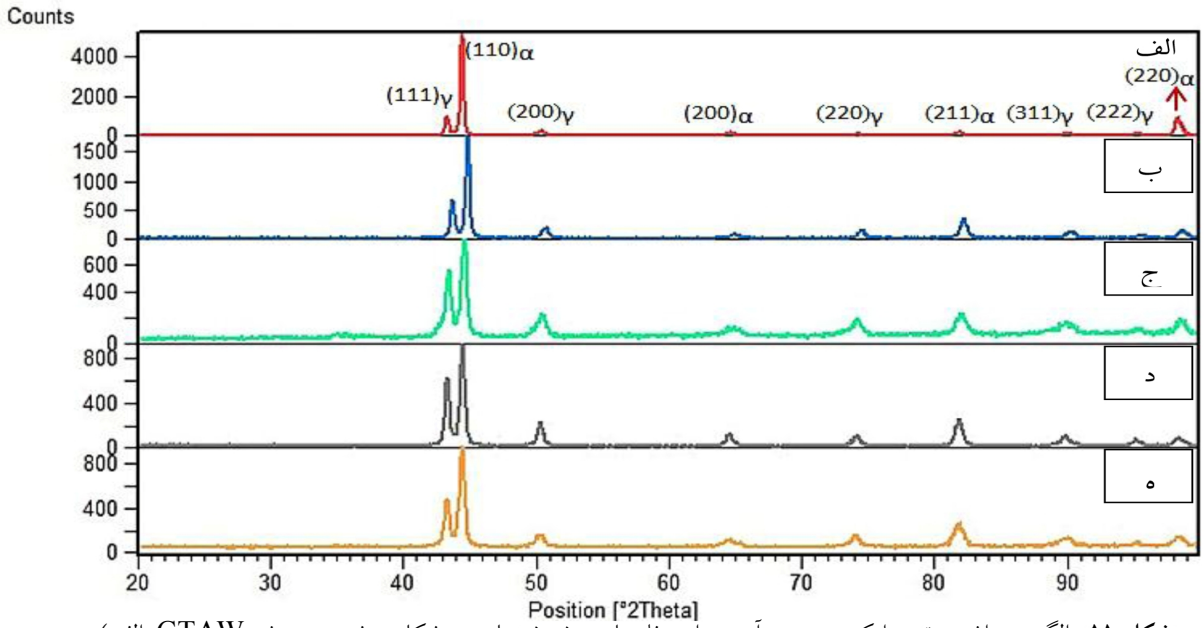


شکل۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح شکست نمونه‌های اتصال یافته به روش GTAW،الف) نمونه شماره ۱، ب) نمونه شماره ۳، ج) نمونه شماره ۴

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]



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

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 نمونه‌ها در ناحیه ذوبِ مقطع جوش سختی کاهش یافته است، 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

با دقت در نمودار شکل(۱۰)مشخص می شود که سختی نمونه شماره ۲ در مقطع جوش بیش تر از سایر نمونه ها می‌باشد که به دلیل پایین بودن حرارت ورودی در این نمونه نسبت به سایر نمونه ها می باشد. با توجه به نمودار شکل(۱۰) می‌توان 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 می‌باشد[۷و۸و۱۴].

۳) فازیابی

الف) فازیابی 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 تاوارس نیز آمده است[۱۴].

ب) فازیابی 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 تقریبا 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 موجبِ 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 می‌باشد.

ج) فازیابی کمی با استفاده از نرم افزارClemex

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 درجدول (۶) نشان می‌دهد که درصد فازهای فریت و آستنیت بدست آمده توسط نرم افزار با درصدهای بدست آمده توسط فریت سنج تقریبا 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 تقریبا 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 دانه‌های 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 دانه‌هااز ۲۵ به ۳۷ میکرومتر و همچنین افزایش درصد آستنیت از ۴۵ تا ۵۰ درصد شده است.

از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نتیجه می‌شود که نوع شکست نمونه‌ها به صورت مخلوط نرم و ترد بوده است(حضور دیمپل ها و صفحات رخ برگی به صورت همزمان در یک سطح شکست باعث این نتیجه‌گیری شده است).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

مراجع

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 andproperties 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 فازی 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 فازی 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 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 UNSS32750 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",weldingMetallurgical 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]