



تأثیر فلز پرکننده بر رفتار مکانیکی اتصال جوش فولاد زنگ نزن به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز GTAW

مسلم محمدی سلیمانی^{۱*}، حسنا مصطفایی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی علوم و فنون خوارزمی، قشم، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: mmsoleymani@pnu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۳

پذیرش: ۹ مرداد ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

فلز پرکننده

رفتار مکانیکی

فولاد زنگ نزن ۳۱۶

جوشکاری GTAW

چکیده

اتصال جوش فولاد زنگ نزن SS-316 در صنایع نفت و گاز از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، جوشکاری فولاد زنگ نزن 316L با استفاده از روش قوسی تنگستن-گاز خنثی، با هدف ارزیابی رفتار مکانیکی فلزات پرکننده مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از سه فلز پرکننده ER309L، ER316L و ER309LMO استفاده گردید. ریز ساختار، آزمون کشش، سختی و مقاومت به ضربه اتصال جوش مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج ریز ساختار نواحی مختلف جوش نشان داد ساختار جوش سه نوع فلز پرکننده مشابه و دارای ساختار آستنیت و فریت دلتا می‌باشد و تفاوت اندکی در میزان توزیع فریت دلتا در زمینه آستنیتی وجود دارد. نتایج سختی‌سنجی نشان داد میانگین سختی فلز پرکننده ER309LMO (۲۰۵ ویکرز) بیشتر از میانگین سختی فلزات پرکننده ER316L (۱۹۷ ویکرز) و ER309 (۱۸۹ ویکرز) بود. همچنین سختی ناحیه متأثر از حرارت اتصال فولاد 316L در هر سه فلز پرکننده افزایش داشت. استحکام نهایی اتصال هر سه فلز پرکننده بالاتر از ۵۴۵ مگاپاسکال بود به طوری که نمونه کششی از محل فلز پایه دچار شکست شد. میانگین انرژی ضربه (۱۵۶ ژول) فلز جوش ER316L بیشتر از میانگین انرژی ضربه (۹۶ ژول) فلز جوش ER309L و میانگین انرژی ضربه (۵۸ ژول) فلز جوش ER309LMO بود و این کاهش انرژی ضربه دو فلز جوش ER309 ناشی از ریز ساختار فریت دلتا می‌باشد. استفاده از فلز پرکننده ER316L با طراحی اتصال V به علت بهبود انرژی ضربه، فلز پرکننده مناسب‌تری برای این اتصال می‌باشد.

The effect of filler metal on the mechanical behavior of stainless steel welded by GTAW welding

Moslem Mohammadi Soleymani^{1*}, Hosna Mostafaei²

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

2- MSc, Department of Mechanical Engineering, Kharazmi Institute of Higher Education of Sciences and Techniques, Qeshm, Iran

* Corresponding Author's Email: mmsoleymani@pnu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 18 May 2024

Accepted: 30 July 2024

Keywords:

Filler Metal

Mechanical Behavior

316-Stainless Steel

GTAW Welding

Abstract

Welding connection of 316L stainless steel has great importance in the oil and gas industry. In this research, welding of 316L stainless steel was investigated using GTAW with the aim of evaluation of the mechanical behaviour of filler metals. Three filler metals of ER309L, ER316L and ER309LMO were used for this purpose. The microstructure results of different regions of welding sections showed that welding structures of three types of filler metals are similar and have structure of Austenite and Ferrite delta. Also, there is a slight difference in the distribution amount of Ferrite delta in the Austenite background. Hardness evaluation results showed that the average hardness of filler metal of ER309LMO is higher than average hardness of filler metals of ER316L and ER309. Also, hardness of impacted region by connection heat of 316L steel in each of filler metals had been increased. The final strength of connection of all three filler metals was higher than 545 MPa. It was in such a way that sample of tensile test was failed and ruptured in the base metal location. The average of impact energy was (156J) for weld metal of ER316L which was higher than average of impact energy (96J) for weld metal of ER309L and average of impact energy (58J) for weld metal of ER309LMO. This reduction in impact energy in two weld metal of ER309 is due to microstructure of Ferrite delta. Using filler metal ER316L with V connection design is better for this connection due to improved impact energy.

Please cite this article using:

Mohammadi Soleymani M, Mostafaei H. The effect of filler metal on the mechanical behavior of stainless steel welded by GTAW welding. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jun 21;11(4):38-55. doi: 10.22034/IJME.2024.458059.1961 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

فولاد زنگ نزن آستنیتی، یکی از پرکاربردترین فولادها در صنعت است که به مقداری گسترده در کاربردهای مقاوم به خوردگی در محیط‌های آبی و همچنین در دماهای بالا به کار می‌رود. این فولاد در صنایع نفت و گاز، پالایشگاه و نیروگاه‌های تولید برق کاربرد فراوان دارد. مقاومت به اکسیداسیون در دمای بالا به خاطر مقدار بالای کروم این فولاد است [۱-۳]. وجود نیکل که عنصری آستنیت‌زا می‌باشد، باعث بالا رفتن خواص مقاوم به حرارت این آلیاژ شده است. در این آلیاژ مقاومت به حمله بین‌دانه‌ای در محیط‌های خورنده بهبود یافته است [۴]. مقاومت به خوردگی عمومی در فولادهای زنگ نزن به تعادل فریت/آستنیت و به عبارت بهتر به تغییر درصد آستنیت فلز جوش بستگی دارد. اصولاً در جوشکاری هدف آن است که با کنترل پارامترهای مختلف، جوشی حاصل شود که خواص آن از جمله خواص مکانیکی بهتر از فلز پایه باشد و انتخاب فلز پرکننده مناسب برای بهبود مقاومت فلز جوش از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۵-۷].

هنگامی که فلزات با یک فرایند جوشکاری ذوبی به هم متصل می‌شوند آلیاژسازی فلزات پایه و فلز پرکننده به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مباحث مطرح می‌شود، دلیل این امر را می‌توان به تفاوت رفتاری فلز جوش به دست آمده با هر یک از فلزات پایه در حین کارکرد نسبت داد. در جوشکاری فلزات، فلز پرکننده باید به‌آسانی با فلز پایه آلیاژ شود تا فلز جوشی به وجود آید که یک فاز شبکه‌ای ممتد و انعطاف‌پذیر داشته و ریزساختاری بدون حساسیت به ترک خوردن ذوبی و انجمادی حاصل شود. بنابراین در اتصالات جوشی انتخاب فلز پرکننده‌ای که بتواند اتصال مناسبی را برقرار کند از اهمیت بالایی برخوردار است [۸-۱۰].

جوشکاری قوسی تنگستن تحت محافظت گاز خنثی یک روش جوشکاری هم‌جوشی است که در اواخر دهه ۳۰ میلادی توسعه یافت. تیگ رایج‌ترین روش جوشکاری مورد استفاده برای لوله‌ها و تیوب‌های با یک ضخامت دیواره از ۰/۳ میلی‌متر به بالا می‌باشد. در روش تیگ از یک الکتروود غیر مصرف‌شده از تنگستن یا آلیاژ تنگستن استفاده می‌شود [۱۱، ۱۲].

بررسی تجربی اتصال فولاد زنگ نزن با روش جوشکاری TIG توسط راثو [۱۳] انجام شد. خواص مکانیکی و ریزساختار جوش‌های فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۰ با استفاده از گریدهای مختلف مفتول جوش فولاد زنگ نزن مورد بررسی قرار گرفت. آزمون کشش و خمش برای بهینه‌سازی پارامتر فرایند و یافتن حد پارامتر انجام شد. با جریان جوشکاری ۱۲۰ آمپر و مفتول جوش 309SS بیشترین نتیجه از آزمون کشش حاصل شد. در آزمون خمش با جریان جوشکاری ۱۲۰ آمپر و الکتروود 316SS بیشترین نتیجه کسب شد. جریان جوشکاری ۱۲۰ آمپر و الکتروود 309L استحکام کشش بیش از ۴۵۴/۶ مگاپاسکال را ایجاد کرد؛ اما جریان جوشکاری ۸۰ آمپر و الکتروود 316L حداقل استحکام کشش ۵۱/۷۹ مگاپاسکال را در نمونه‌ی مورد نظر ایجاد کرد. در آزمون خمش، جریان جوشکاری ۱۲۰ آمپر و الکتروود 316L حداکثر استحکام خمش ۶۴۶/۵۵ مگاپاسکال را ایجاد کرد اما همان جریان جوشکاری با الکتروود ۳۴۷ حداقل استحکام خمش ۲۱۱/۳۷ مگاپاسکال را در نمونه‌ی مورد نظر ایجاد کرد. سیم جوش 309L، استحکام کشش و خمش بهتری ایجاد کرد. نتایج آزمون اولتراسونیک عیوب نفوذ را نشان داد اما نتایج کلی مشخص کرد که عیوب تأثیر زیادی نداشته‌اند. تصاویر ریزساختاری نشان داد که 309L فاز ثانویه‌ی برجسته دارد چون تغییر درصد کروم مانع تبدیل فاز و سبب ورودی حرارت کنترل نشده می‌شود.

اتصال فولاد زنگ نزن ۳۰۴ با روش TIG بررسی شد [۱۴]. همچنین بهارات [۱۵] اثر پارامترهای جوشکاری مختلف را بر روی هندسه‌ی حوضچه‌ی 316SS توضیح داد. او آزمون‌های مختلفی را برای تعیین جریان، سرعت و شکاف ریشه انجام داد. روش تجزیه و تحلیل واریانس برای تعیین پارامترهای جریان، سرعت به کار رفت و مدل ریاضی با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب ایجاد شد. آزمون خمش و کشش انجام گرفت و مشاهده شد که سرعت و شیار ریشه بر انعطاف‌پذیری و کیفیت پیچش ماده تأثیر دارد.

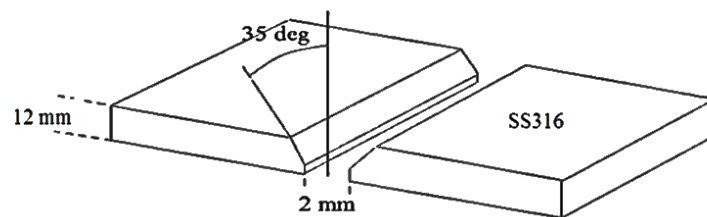
مسلمی و رذان [۱۶] از لوله‌های فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با قطر بیرونی ۷۳ میلی‌متر و ضخامت ۰/۷ میلی‌متر استفاده کردند. الکتروود تنگستن تحت گاز خنثی برای جوشکاری این اتصالات به کار رفت. بسیاری از تنظیمات رایج برای کسب ویژگی‌های اتصال بهینه و کمینه‌سازی هزینه به کار رفتند. خواص مکانیکی آلیاژهای جوشکاری شده از جمله استحکام کشش و سختی مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایش‌های متالوگرافی برای تعیین مناطق مختلف ذوب و هم‌جوشی انجام شدند. نتیجه‌گیری شد که افزایش جریان جوشکاری سبب افزایش ورودی حرارت در حوضچه‌ی جوشکاری، بزرگ‌تر شدن پهنا و عمق حوضچه‌ی جوشکاری، انباشت فاز سیگما در زمینه و کاهش درصد کاربید کروم در فولاد زنگ نزن ۳۱۶ می‌شود. جریان قوسی ۱۰۰ آمپر تعیین‌کننده است. جریان مناسب باعث کمترین عیوب و

بیشترین مقدار استحکام و سختی در ماده می‌شود. پارامترهای جوشکاری با الکتروود تنگستن تحت گاز خنثی مشخص شد که می‌تواند بهره‌وری و مقرون به صرفه بودن فرایند را افزایش دهد.

مطالعات زیادی در خصوص جوش فولاد زنگ نزن ۳۱۶ انجام شده [۱۷-۲۱] ولی در خصوص انتخاب پرکننده مناسب، پژوهش‌های کمی انجام گرفته است. در پژوهش ردی [۲۲] تلاش‌هایی برای بررسی جوش‌پذیری فولادهای AISI 316 و AISI 4140 با استفاده از فرایند جوشکاری قوس تنگستن تحت گاز محافظ (GTAW) با سیم جوش و یا بدون آن صورت گرفته است. الکتروود ER 309L برای اتصال این فلزات غیرمشابه به کار رفت. آزمون‌های سختی و کشش برای بررسی خواص مکانیکی آن‌ها انجام شد. در پژوهش حاضر با استفاده از فرایند جوشکاری GTAW ایجاد اتصال جوش فولاد زنگ نزن 316L با استفاده از سه نوع فلز پرکننده ER309L، ER316L و ER309LMo انجام شد. ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال جوش فولاد زنگ نزن 316L مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. ریزساختار میکروسکوپی اتصال با بررسی توسط میکروسکوپ نوری انجام شد. آزمایش‌های مختلف مکانیکی شامل آزمون کشش، سختی سنجی و آزمون ضربه در دمای محیط برای اتصال مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

ورق فولاد زنگ نزن 316L به ضخامت ۱۲ میلی‌متر و به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر برای این پژوهش انتخاب شد. جهت اتصال فلز پایه از سه فلز پرکننده ER309L، ER316L و ER309LMo استفاده شد. در تمامی موارد از سیم جوش‌های با قطر ۲/۴ میلی‌متر جهت پاس ریشه و پاس‌های بعدی استفاده گردید. جهت اتصال لب‌به‌لب با شیار V شکل ورق‌ها آماده‌سازی شدند. شکل ۱ شماتیک طرح اتصال جوش 316L را نشان می‌دهد.



شکل ۱ طرح اتصال جوش

جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با قطبیت منفی در چهار پاس انجام شد و از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹، با دبی ۲۰ لیتر در دقیقه و الکتروود تنگستن با قطر ۲/۴ میلی‌متر استفاده شد. سایر پارامترهای جوشکاری در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ پارامترهای جوشکاری استفاده‌شده برای اتصال

جریان (آمپر)	ولتاژ (ولت)	سرعت جوشکاری (mm/s)	قطبیت	قطر الکتروود
۸۵-۱۱۰	۱۰-۱۲	۰/۹-۱	DCEN	۲/۴

حرارت ورودی از رابطه ۱ محاسبه شد که در آن V ولتاژ، I جریان و S سرعت جوشکاری است.

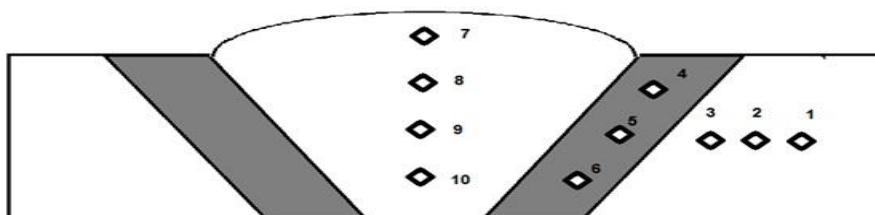
$$Heat\ Input = \eta (V.I/S) \quad (1)$$

در فرایند جوشکاری TIG مقدار η (ضریب بازده قوس) بین ۳۵ تا ۵۰ درصد متغیر بوده و معمولاً ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. با کنترل پارامترهای جوشکاری، حرارت ورودی در حدود 500 J/mm به دست آمد.

پس از جوشکاری محل اتصال جوش توسط آزمون مایع نافذ بررسی شد تا عدم حضور ترک تأیید شود. جهت اطمینان از سلامت جوش بر روی قطعه کار یک فیلم رادیوگرافی قرار گرفت و سپس پرتو اشعه ایکس به قطعه کار تابانده شد؛ هیچ‌گونه تفاوت کنتراستی در فیلم‌های رادیوگرافی مشاهده نشد که این امر نشان دهنده سالم بودن کلیه جوش‌ها و عدم حضور عیوبی از قبیل عیب سرباره حبس شده، عدم ذوب، ترک و تخلخل را تأیید می‌نماید.

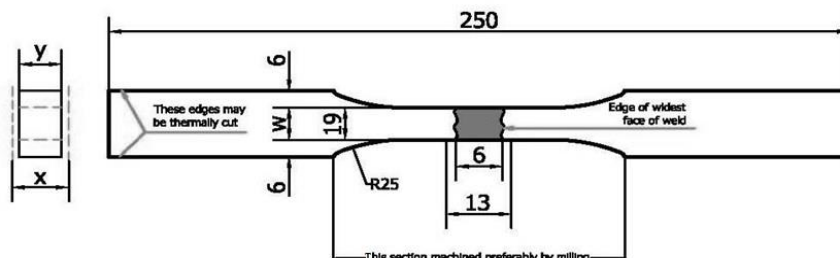
به منظور بررسی ریزساختار فلز پایه، منطقه تحت تأثیر حرارت HAZ و فلز جوش در نمونه‌های جوشکاری شده اتصال جوش 316L آماده‌سازی نمونه‌ها بر طبق استاندارد ASTM E3:01 انجام شد. محلول اچ مورد استفاده نایتال ۲ درصد طبق الزامات استاندارد ASTM E407:99 انتخاب شد. نواحی جوش شامل فلز پایه، فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت جوش توسط سنباده‌های ۸۰ تا ۲۰۰۰، سنباده‌کاری شدند و سپس عملیات پولیش‌کاری توسط پودر Al_2O_3 انجام شد. در پایان توسط محلول نایتال ۲ درصد حکاکی شده و با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت.

جهت بررسی تغییرات سختی در نواحی مختلف اتصال جوش فولاد 316، سختی از مقطع نمونه‌ها توسط دستگاه INNOVATEST NOVA 240 سختی‌سنج ویکرز با نیروی HV1(9.807N) بر طبق استاندارد (ISO 6507-1:2018) انجام شد. شکل ۲ شماتیک طرح اتصال و نقاط سختی سنجی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ شماتیک طرح اتصال و نقاط سختی سنجی

آزمون کشش به منظور مقایسه استحکام کششی و تسلیم نمونه‌های جوش در دمای محیط انجام شد. نمونه‌های کشش به صورت عمود بر خط جوش بریده شدند و آزمون کشش بر طبق استاندارد ASME SEX.IX(2017) انجام شد. برای هر اتصال، دو نمونه کشش عرضی در نظر گرفته شد. شماتیک و اندازه نمونه‌های کشش در شکل ۳ آورده شده است.

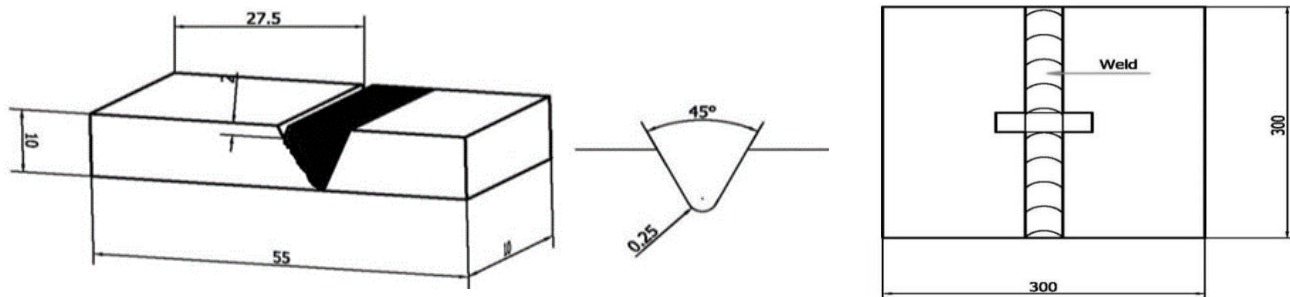


شکل ۳ تصویر شماتیک و اندازه نمونه‌های کشش عرضی جوش [۲۴]

بر طبق استاندارد ASME استحکام کششی حاصله از حداقل استحکام کششی تعیین شده برای فلز پایه نباید کمتر باشد. اگر نمونه آزمایش از فلز پایه، در محلی خارج از خط جوش گسیخته شود، آزمایش پذیرفته است. البته استحکام کششی نباید از ۹۵٪ حداقل استحکام کششی تعیین شده فلز پایه کمتر باشد [۲۴].

آزمون ضربه شاریبی در دمای محیط بر طبق استاندارد ASTM E23(2016) بر روی فلز پایه و فلز جوش انجام شد. تصویر شماتیک طرح اتصال و موقعیت نمونه‌های ضربه که شکاف آن‌ها در منطقه فلز پایه و جوش قرار دارد در شکل ۴ نشان داده شده است. شکاف نمونه‌های ضربه از عمق ۲ میلی‌متری از سطح ورق به صورت عمود بر خط جوش ایجاد شدند، ابعاد نمونه‌های ضربه در شکل ۴ آورده شده است. این آزمون به وسیله دستگاه SANTAM با مدل SIT-300 انجام شد. برای هر نمونه سه آزمون ضربه شاریبی انجام و میانگین انرژی جذب شده در سه آزمون، تعیین گردید. پس از انجام آزمون سطح مقطع شکست نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ SEM ساخت شرکت TE-SCAN مدل MIRA3 بررسی شد.

¹ Scanning Electron Microscope



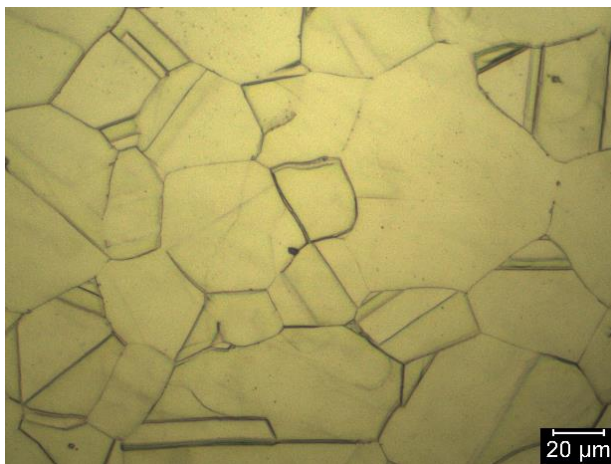
شکل ۴ موقعیت و ابعاد نمونه‌های ضربه مورد آزمایش [۲۴]

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج ریز ساختار

نتایج بررسی ریزساختار فلز پایه فولاد زنگ نزن 316L، منطقه تحت تأثیر حرارت و فلز جوش در نمونه‌های جوشکاری شده با فلز پرکننده ER316L، ER309LMO و ER309 توسط میکروسکوپ نوری در این بخش آورده شده است.

بررسی ریزساختار فلز پایه فولاد 316L توسط میکروسکوپ نوری در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، ریزساختار فولاد 316L دارای یک ساختار کاملاً آستنیتی به همراه نواحی دوقلوبی در فلز پایه می‌باشد. دوقلوبی‌های ناشی از عملیات آنیل را در برخی دانه‌ها می‌توان مشاهده کرد. این دوقلوبی‌ها در مرحله آنیل کردن و در اثر رشد جوانه‌های دوقلوبی که در حین تغییر فرم پلاستیک به وجود آمده‌اند، تشکیل می‌شوند. این نکته دلالت دارد که انجام عملیات آنیل موفقیت‌آمیز بوده چرا که هیچ‌گونه رسوب ثانویه و فازهای کاربیدی در زمینه آستنیتی رؤیت نمی‌شود.



شکل ۵ ریزساختار آستنیتی فولاد زنگ نزن 316L

نتایج آنالیز کوانتومتری فلز پایه اتصال و فلزات پرکننده که با روش کوانتومتری انجام شده در جدول ۲ ارائه شده است. در این تحقیق برای پیش‌بینی اجزای که ممکن است در ساختار وجود داشته باشد از نمودار شفلر استفاده می‌شود. مقادیر نیکل معادل (Ni_{eq}) و کروم معادل (Cr_{eq}) با استفاده از روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند.

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0.5\%Mn \quad (2)$$

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb + 2\%Ti \quad (3)$$

با توجه به نتایج آنالیز ترکیب شیمیایی فلز پایه و ترکیب شیمیایی فلزات پرکننده (جدول ۲) و استفاده از روابط ۲ و ۳ مقادیر نیکل و کروم معادل برای فلز پایه اتصال و فلزات پرکننده محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

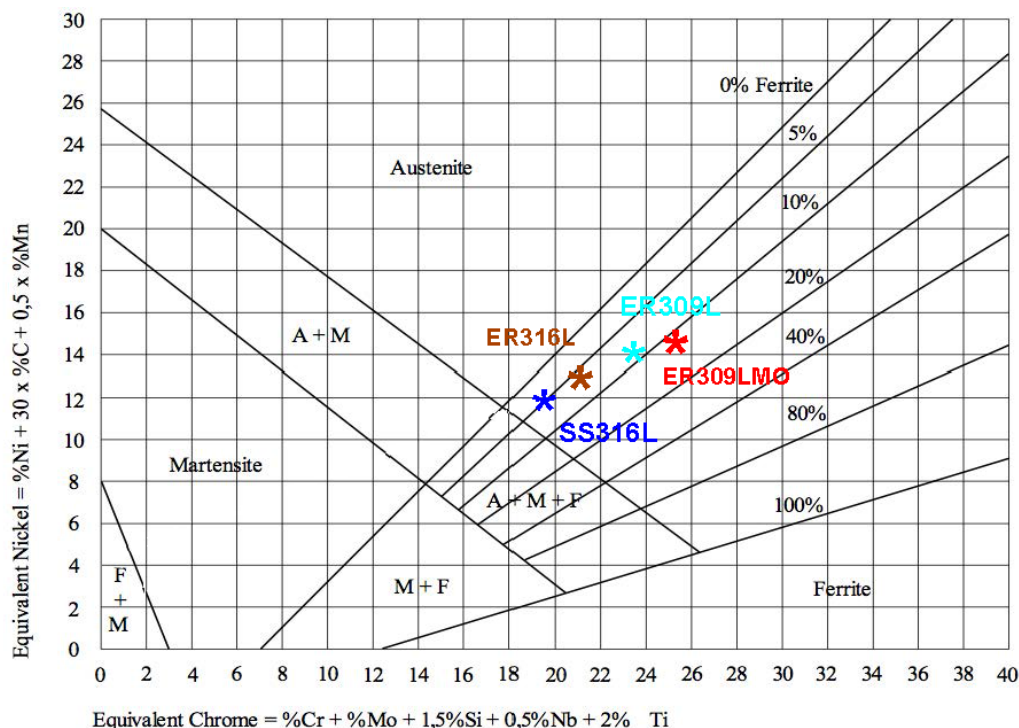
جدول ۲ ترکیب شیمیایی فلزات پایه و جوش (برحسب درصد وزنی)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti	Nb	فلز
۰/۰۲	۱/۲۵	۰/۴۷	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۱۶/۶۱	۲/۱۷	۱۰/۶۶	۰/۰۱	۰/۰۱	SS316L
۰/۰۰۶	۱/۶۴	۰/۳۰	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۲۲/۸۵	۰/۱۲	۱۳/۱۸	۰/۰۰۷	۰/۰۲	ER309L
۰/۰۰۶	۱/۶۴	۰/۳۱	۰/۰۱۵	۰/۰۰۵	۱۸/۱۷	۲/۳۴	۱۱/۸۹	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	ER316L
۰/۰۱۵	۰/۹۹	۰/۵۵	۰/۰۱۷	۰/۰۰۵	۲۱/۷۸	۲/۳۴	۱۳/۴۴	۰/۰۱۵	۰/۰۳۱	ER309LMO

جدول ۳ مقادیر نیکل و کروم معادل برای فلزات پایه و جوش

Cr _{eq}	Ni _{eq}	فلز
۱۹/۵۲	۱۱/۸۹	SS316L
۲۳/۴۴	۱۴/۱۸	ER309L
۲۱	۱۲/۸۹	ER316L
۲۴/۹۹	۱۴/۳۸	ER309LMO

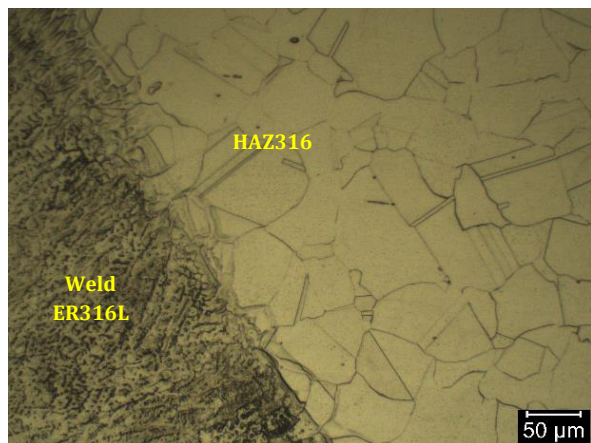
با توجه به نقاط مشخص شده بر روی شکل ۶ بر اساس مقادیر محاسبه شده، نیکل و کروم معادل فازهای ریزساختار در مورد سه فلز پرکننده ER309L، ER316L و ER309LMO در ناحیه A+F قرار می‌گیرد و ریزساختار فلز جوش مورد انتظار هر سه فلز پرکننده شامل زمینه آستنیتی و مقداری فریت دلتا که بیشترین فریت موجود در ریزساختار در فلز جوش ER309LMO مورد انتظار است و در مورد فلز پایه اتصال SS316L ریزساختار غالب آستنیتی همراه با مقادیر کمتر از ۵ درصد فریت می‌باشد.



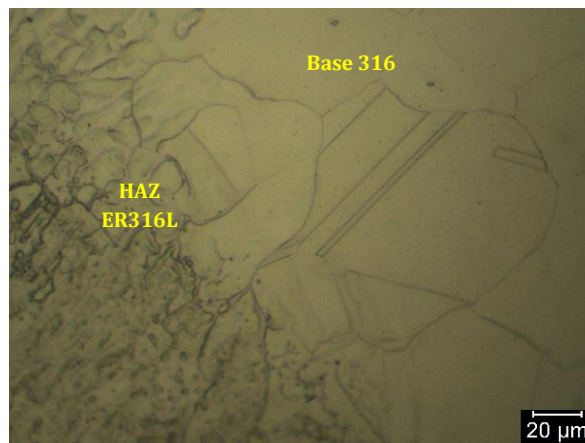
شکل ۶ نمودار شفلر مورد استفاده برای پیش‌بینی اجزای ساختار جوش

ریزساختار نواحی مختلف جوش فولاد زنگ نزن 316L با استفاده از فلزات پرکننده ER316L، ER309LMO و ER309L توسط میکروسکوپ نوری در شکل ۷ نشان داده شده است. تصاویر میکروسکوپ نوری از HAZ فولاد 316L با استفاده از فلز پرکننده ER316L در شکل ۷-الف و شکل ۷-ب نشان داده شده و ریزساختار آستنیتی در منطقه تلاقی فلز پایه و ناحیه تحت تأثیر حرارت است.

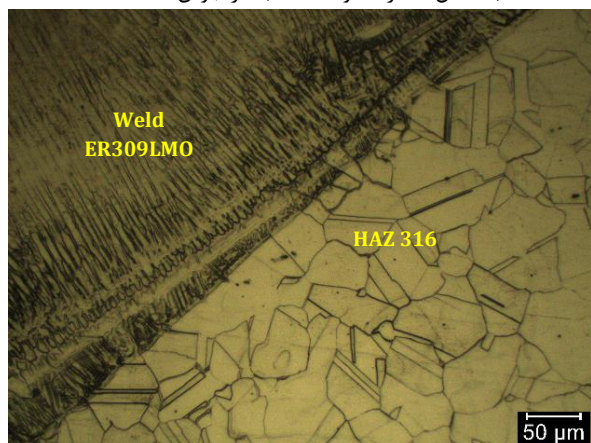
در ناحیه خط ذوب ۱ ساختار آستنیتی به همراه جزایر فریت دلتا می‌باشد. ریزساختار ناحیه تحت تأثیر حرارت در دو فلز پرکننده ER309LMO و ER309 (شکل ۷-ج و شکل ۷-ه) با نزدیک شدن به فصل مشترک با فلز جوش، رسوب فریت دلتا در زمینه آستنیتی را نشان می‌دهد. در حین سرد شدن تا دمای اتاق ساختار وارد منطقه‌ای دوفازی آستنیت + فریت می‌شود و قسمت اعظم فریت دلتای که در انجماد تشکیل شده در حین سرد شدن ناپایدار شده و به آستنیت تبدیل می‌شود. هسته دندریت‌ها که منجمد شده، غنی از کروم است و تا دمای اتاق به صورت فریت دلتا باقی مانده و این ریزساختار تا فصل مشترک با فلز جوش ادامه می‌یابد.



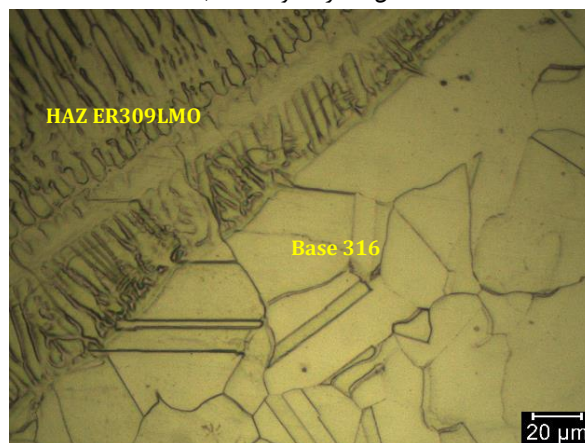
ب) فصل مشترک فولاد 316 با فلز جوش ER316L



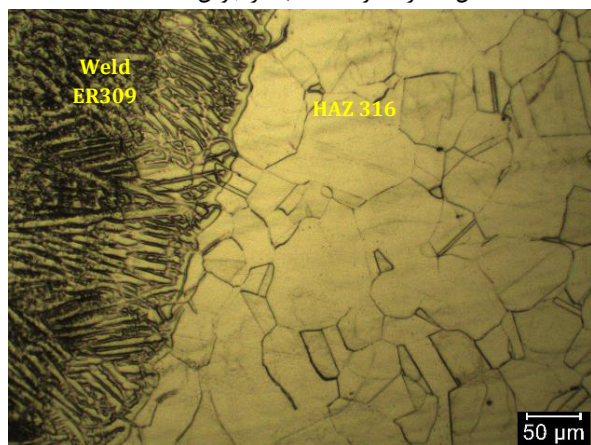
الف) فصل مشترک فولاد 316 با HAZ



د) فصل مشترک فولاد 316 با فلز جوش ER309LMO



ج) فصل مشترک فولاد 316 با HAZ



و) فصل مشترک فولاد 316 با فلز جوش ER309



ه) فصل مشترک فولاد 316 با HAZ

شکل ۷ ریزساختار ناحیه HAZ فولاد زنگ نزن 316L

¹ Fusion Line

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود ریزساختار ناحیه تحت تأثیر حرارت با حرکت به سمت مرکز این ناحیه اندکی ریزتر می‌گردد که با نزدیک شدن به فصل مشترک با فلز جوش درشت‌تر درآمده است. قسمت‌های نزدیک فلز پایه به علت تبلور مجدد شروع به جوانه‌زنی می‌کنند؛ ولی چون این منطقه حرارت کمتری نسبت به مناطق نزدیک به جوش دارد، فرصت رشد دانه‌ها به دست نمی‌آید؛ پس منطقه ریزدانه شکل می‌گیرد. از طرفی نزدیک به ناحیه جوش دما بالاتر می‌رود. به دلیل نفوذ بیشتر در دمای بالا در نتیجه دانه‌ها به رشد ادامه می‌دهند. در آخر دانه‌های نزدیک به جوش اندازه نسبی بزرگ‌تری نیز دارند. از آنجایی که رشد در جوش به‌صورت رونشینی است، در نتیجه اندازه‌ی دانه در HAZ تأثیر براندازه دانه‌ها در جوش نیز می‌گذارد. از طرفی حرارت ورودی بالاتر چون دمای HAZ را بالاتر می‌برد نفوذ افزایش یافته و دانه‌ها نیز درشت‌تر می‌شوند [۲۵].

همان‌طور که در شکل ۷-الف، شکل ۷-ج و شکل ۷-د مشاهده می‌شود با حرکت از فلز پایه به سمت خط ذوب جوش تا نزدیکی خط ذوب تغییر خاصی در دانه‌بندی ملاحظه نمی‌شود. درست در ناحیه مجاور خط ذوب، رشد دانه اتفاق افتاده است. علت رشد دانه در این مناطق، بالا رفتن دمای این نواحی در حین جوشکاری است. در زمان جوشکاری، حرارت زیادی از منطقه جوش به این مناطق وارد و سبب افزایش دمای آن می‌شود. با توجه به کم بودن ضریب انتقال حرارت و همچنین بالا بودن ظرفیت حرارتی فاز آستنیت موجود مدت‌زمانی طول می‌کشد تا مناطق اطراف جوش سرد شوند. بنابراین، این مناطق برای مدت زمانی در دمای بالا قرار می‌گیرند که نتیجه طبیعی این موضوع رشد دانه‌ها در مجاور خط ذوب جوش خواهد بود.

نتایج نشان می‌دهند که اختلاف زیادی بین مشخصات دانه‌بندی منطقه متأثر از حرارت نمونه‌های فلز پرکننده مختلف وجود ندارد. همچنین، به دلیل طولانی بودن زمان قرارگیری در دمای بالا، اختلاف ابعادی زیادی بین دانه‌های فلز پایه و منطقه متأثر از حرارت دیده نمی‌شود.

در خط ذوب، دانه‌های ذوب جزئی شده فلز پایه قابل تشخیص هستند. شکل ۷-ب، شکل ۷-د و شکل ۷-ه تصاویر میکروسکوپ نوری از خط ذوب نمونه‌های فلزات پرکننده مختلف را ارائه می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که در این منطقه رسوبی تشکیل نشده و تنها دانه‌های فلز پایه به‌صورت جزئی ذوب شده‌اند.

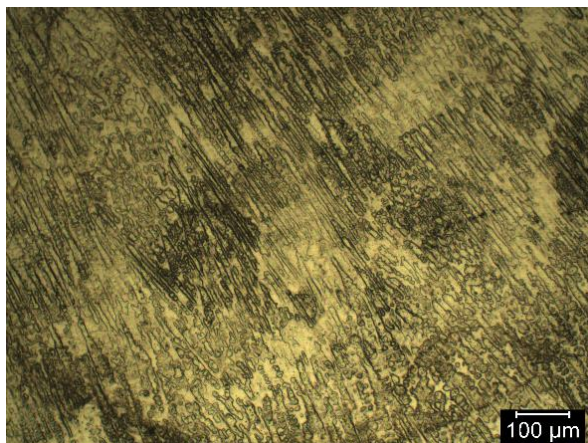
دانه‌های جزئی یا نیمه ذوب شده در خط ذوب به‌عنوان پایه جوانه‌زنی دانه‌های منطقه جوش عمل می‌کنند. به دلیل آن که فلز مذاب جوش در تماس مستقیم با این دانه‌های زمینه قرار دارد و به‌طور کامل این دانه‌ها را تر می‌کند، لذا بلورها از فلز مذاب و بر روی این دانه‌ها، بدون هیچ مشکلی جوانه می‌زنند. اتم‌ها از فلز مذاب مرتب شده و بدون تغییر در جهت‌های بلوری بر روی دانه‌های زمینه قرار می‌گیرند و جوانه‌زنی رخ می‌دهد. به این پدیده، پدیده رشد اپی‌تکسی می‌گویند [۲۶]. در این پدیده، دانه‌های فلز پایه در درون فلز جوش امتداد پیدا می‌کنند. شاید بارزترین نماد ظاهری رشد و جوانه‌زنی اپی‌تکسی، ادامه پیدا کردن مرزهای دانه فلز پایه به درون فلز جوش باشد. در حقیقت، در مجاورت خط ذوب، مرزهای دانه فلز جوش در امتداد مرزهای دانه فلز پایه است. این پدیده را به‌وضوح می‌توان در شکل ۷-ب، شکل ۷-د و شکل ۷-ه مشاهده کرد.

رشد اپی‌تکسی در خط ذوب جوش زمانی اتفاق می‌افتد که اولاً، ترکیب شیمیایی فلز پایه و فلز جوش تفاوت چندانی نداشته باشد و ثانیاً، ساختار بلوری فلز جوش و فلز پایه یکسان باشد؛ که البته اهمیت یکسان بودن ساختار بلوری بیش از اهمیت یکسان بودن ترکیب‌های شیمیایی می‌باشد [۲۶]. به‌طور کلی می‌توان گفت که در منطقه جوش دانه‌هایی با مورفولوژی‌های بسیار متنوع و ابعاد کاملاً متغیر وجود دارند. این امر مقایسه جوش‌های مختلف از نظر ساختاری را کاملاً دشوار می‌کند و ارائه معیارهای عددی برای مقایسه خصوصیات ساختاری جوش‌های مختلف مشکل است.

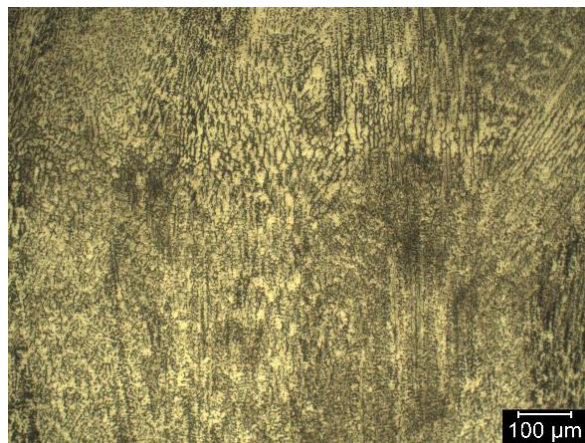
شکل ۸ ریزساختار فلز جوش در جوشکاری هر یک از فلزات پرکننده مصرفی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. تصویر میکروسکوپ نوری شکل ۸-الف ریزساختار فلز جوش ER316L نمایشگر آستنیت همراه با توزیع فاز فریت دلتا در زمینه آستنیت می‌باشد. این فلز جوش حاوی ۰/۵۳ درصد نیوبیوم است. نیوبیوم می‌تواند محدوده‌ی دمای انجماد را افزایش دهد. به‌عبارت‌دیگر، تحت انجماد را افزایش داده و باعث وسعت اندازه این منطقه خواهد شد. بدین ترتیب، ریزساختار معمولاً از سلولی به دندریتی ستونی، دندریتی هم‌محور تغییر می‌کند. ساختار دانه‌بندی فلز جوش مربوط به این فلز پرکننده با دانه‌بندی ریز و هم‌محور در شکل ۸ نشان داده شده است.

شکل ۸-ب نمونه فلز جوش ER309LMO ریزساختار در فلز جوش نمایانگر ساختار آستنیتی همراه با فاز فریت دلتا می‌باشد. ریزساختار مطابق انتظار آستنیتی بوده و از دانه‌هایی تشکیل شده است که تقریباً هم‌محور هستند. این حالت انجماد به‌صورت آستنیت

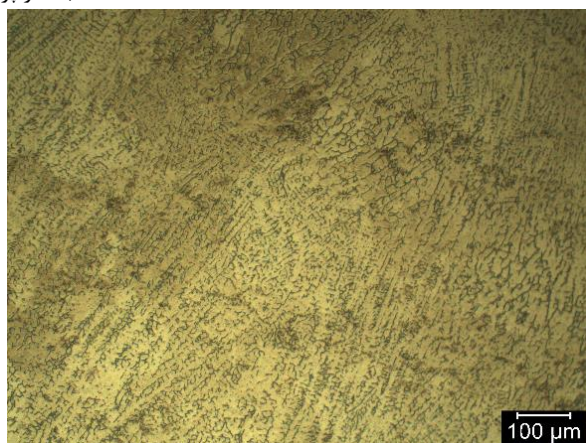
تک فاز نوع (A) بوده که به خاطر جدایش عناصر آلیاژی و عناصر ناخالصی در طی انجماد رخ داده است. در درون دانه‌ها ساختار دندریتی سلولی، ساختار غالب است. در این قسمت‌ها بازوهای دندریتی تا حدودی مشخص بوده و مناطق بین دندریتی بارنگ روشن متمایز هستند. ریز ساختار آستنیتی هم‌محور با ذرات درشت‌دانه به دلیل سرعت سرد شدن آهسته‌تر هستند.



ب) فلز پرکننده ER309LMO



الف) فلز پرکننده ER316L



ج) فلز پرکننده ER309

شکل ۸ ریزساختار فلزات جوش

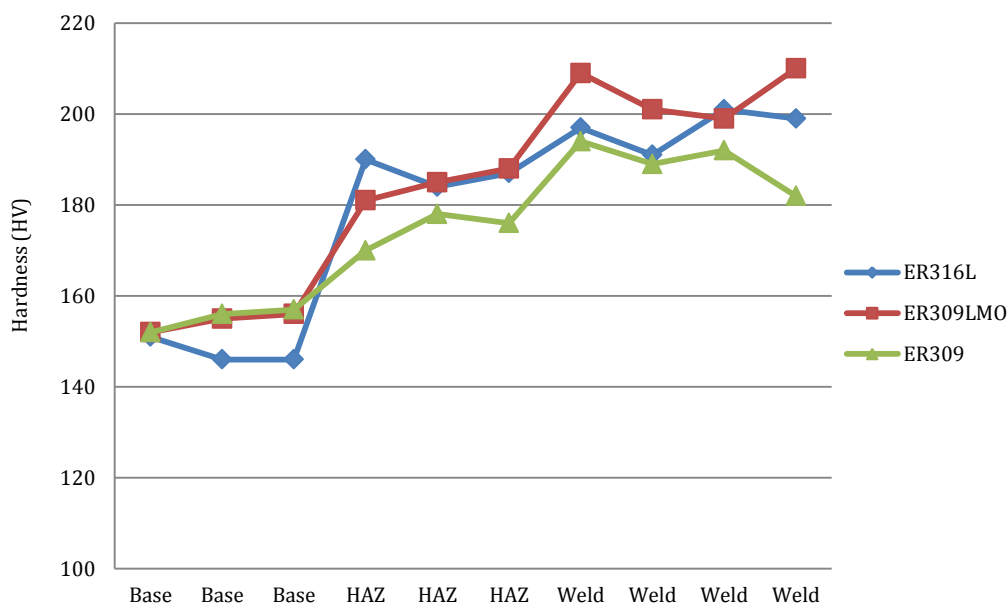
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، ریزساختار فلزات جوش ER309LMO, ER316L و ER309 به صورت ساختار آستنیتی به همراه جزایر فریت دلتا انجماد یافته که با توجه به ترکیب شیمیایی و نسبت کروم به نیکل معادل محاسبه شده در جدول ۳ قابل توجه می‌باشد. فریب‌ها در مکان هسته دندریتهای اولیه فریت قرار دارد. فلز جوش در حین انجماد به صورت فریت دلتا به همراه آستنیت در مکان‌های بین دندریتی منجمد می‌شود. بعد از اتمام انجماد و در حین سرد شدن تا دمای اتاق ساختار وارد منطقه‌ای دوفازی آستنیت + فریت می‌شود و قسمت اعظم فریت دلتای که در انجماد تشکیل شده در حین سرد شدن ناپایدار شده و به آستنیت تبدیل می‌شود. هسته دندریتهای منجمد شده غنی از کروم است تا دمای اتاق به صورت فریت دلتا باقی می‌ماند و ریزساختار با مورفولوژی آستنیت به همراه جزایر فریت دلتا همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، ایجاد می‌کند.

۳-۲- نتایج سختی‌سنجی

در اتصال جوش فولاد زنگ نزن 316L برای ارزیابی سختی در مناطق مختلف قطعات به هم جوش‌خورده، شامل فلز پایه، HAZ و فلز جوش اندازه‌گیری سختی انجام شد. نتایج سختی‌سنجی ویکرز در مناطق مختلف جوش در نمونه جوشکاری شده با فلزات پرکننده ER309LMO, ER316L و ER309 در جدول ۴ و شکل ۹ با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۴ سختی ویکرز نواحی مختلف جوش در اتصال فولاد 316L

ER309	ER309LMO	ER316L	نمونه فلز پرکننده
۱۵۲	۱۵۲	۱۵۱	نقطه ۱ (فلز پایه)
۱۵۶	۱۵۵	۱۴۶	نقطه ۲ (فلز پایه)
۱۵۷	۱۵۶	۱۴۶	نقطه ۳ (فلز پایه)
۱۷۰	۱۸۱	۱۹۰	نقطه ۴ (ناحیه متأثر از حرارت)
۱۷۸	۱۸۵	۱۸۴	نقطه ۵ (ناحیه متأثر از حرارت)
۱۷۶	۱۸۸	۱۸۷	نقطه ۶ (ناحیه متأثر از حرارت)
۱۹۴	۲۰۹	۱۹۷	نقطه ۷ (فلز جوش)
۱۸۹	۲۰۱	۱۹۱	نقطه ۸ (فلز جوش)
۱۹۲	۱۹۹	۲۰۱	نقطه ۹ (فلز جوش)
۱۸۲	۲۱۰	۱۹۹	نقطه ۱۰ (فلز جوش)



شکل ۹ تغییرات سختی ویکرز سه نوع فلز پرکننده از سطح به عمق جوش

به منظور تعیین تغییرات سختی فلز جوش در پاس‌های مختلف جوشکاری، سختی از پاس رویه به سمت پاس ریشه اندازه‌گیری شد و پروفیل سختی مطابق شکل ۹ به دست آمد. پروفیل سختی معیار مناسبی از ریزساختار تشکیل شده در مناطق مختلف جوش است. سختی تابعی از ترکیب شیمیایی، درصد از فازهای ریزساختار تشکیل شده و تغییرات حرارتی فلز پایه و فلز جوش است. همان‌طور که از شکل مشخص است، بیشترین سختی فلز جوش مربوط به فلز پرکننده ER309LMO می‌باشد. سختی فلز جوش در هر دو نوع فلز پرکننده ER316L و ER309LMO در پاس میانی جوش مشابه می‌باشد. میانگین سختی فلز پرکننده ER309LMO (۲۰۵ ویکرز) بیشتر از میانگین سختی فلزات پرکننده ER316L (۱۹۷ ویکرز) و ER309 (۱۸۹ ویکرز) می‌باشد. سختی در هر سه نوع فلز پرکننده در ناحیه متأثر از حرارت افزایش داشته است؛ که می‌تواند ناشی از حضور کاربیدهای کروم و سیکل‌های جوشکاری اعمالی در این ناحیه باشد. همان‌طور که از شکل‌های ۷ و ۸ ریزساختار نواحی متأثر از حرارت و فلز جوش ساختار آستنیتی به همراه فریت به صورت دندریتی و هم‌محور مشاهده شد، نمونه جوش داده‌شده با فلز پرکننده ER309LMO سختی منطقه جوش، در مناطق خط مرکزی جوش از مناطق کناری و نواحی نزدیک به فصل مشترک جوش بیشتر از سختی دو فلز پرکننده دیگر است که علت این امر نیز ریزساختار همراه دانه‌های هم‌محور، در مرکز جوش می‌باشد.

همچنین به دلیل تأثیر حرارت جوشکاری در محدوده ناحیه متأثر از حرارت با گذر از فلز پایه و رسیدن به منطقه جوش افزایش سختی مشاهده شد که به علت درشت شدن دانه‌ها در منطقه متأثر از حرارت به سمت مرکز جوش، وجود فازهای بین فلزی و کاربیدهای عناصر موجود، ناشی از فلزات پرکننده، می‌تواند باعث افزایش سختی از ناحیه مرکز جوش به سمت فلز پایه باشد.

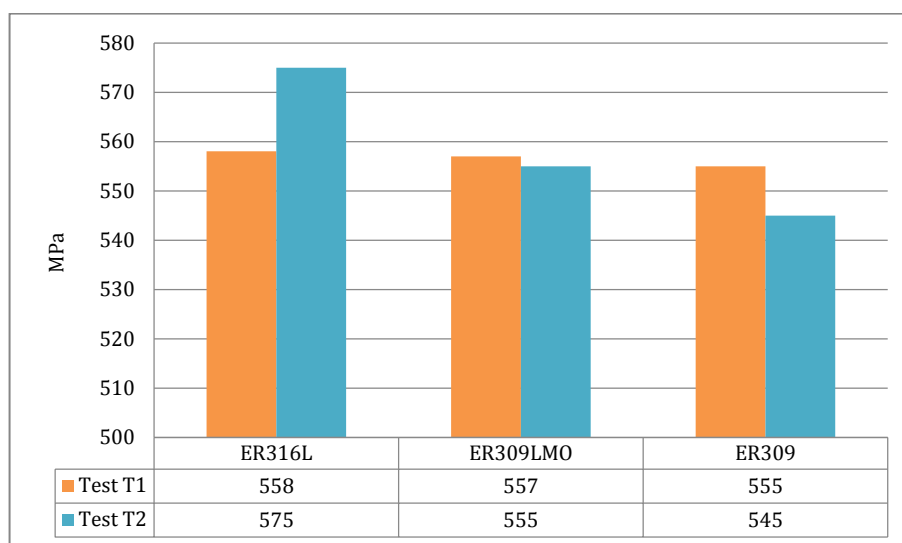
۳-۳- نتایج آزمون کشش

آزمون کشش به منظور بررسی خواص مکانیکی اتصال جوش فولاد SS 316L با فلزات پرکننده مختلف و مشخص شدن فلز جوش مناسب از نظر خواص مکانیکی مطلوب برای این اتصال انجام شد. نتایج آزمون کشش عرضی جوش نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از فلزات پرکننده ER316L, ER309LMO و ER309 در جدول ۵ ارائه شده است.

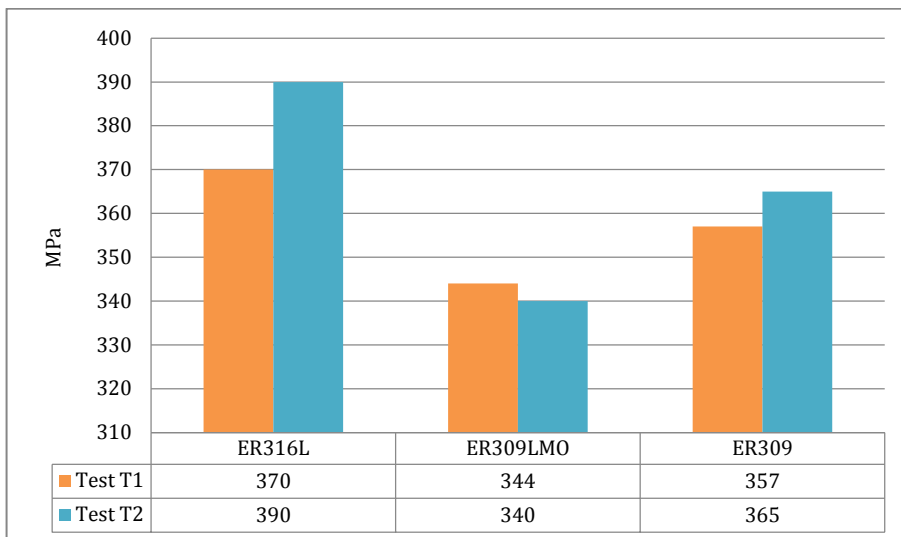
جدول ۵ نتایج آزمون کشش

نمونه آزمون کشش	منطقه شکست	استحکام نهایی (N/mm ²)	استحکام تسلیم (N/mm ²)	ضخامت × عرض (mm × mm)	سطح مقطع (mm ²)
ER316L-T1	Base	۵۵۸	۳۷۰	۱۹/۰۹ × ۱۸/۰۸	۳۴۵/۱۵
ER316L-T2	Base	۵۷۵	۳۹۰	۱۹/۱۰ × ۱۸/۱۱	۳۴۵/۷۱
ER309LMO-T1	Base	۵۵۷	۳۴۴	۱۹/۰۹ × ۱۸/۰۲	۳۴۴/۰۰
ER309LMO-T2	Base	۵۵۵	۳۴۰	۱۹/۱۶ × ۱۸/۰۵	۳۴۵/۸۴
ER309-T1	Base	۵۵۵	۳۵۷	۱۹/۱۴ × ۱۸/۲۰	۳۴۸/۳۵
ER309-T2	Base	۵۴۵	۳۶۵	۱۹/۱۶ × ۱۸/۲۰	۳۴۸/۷۱

طبق دستورالعمل ASME IX [۲۷] حداقل استحکام قابل قبول برای نمونه‌های عرضی نسبت به خط جوش، ۵ درصد پایین‌تر از استحکام فلز پایه است. بر طبق استاندارد با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون کشش هر سه نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ER309, ER309LMO, ER316L نشان می‌دهد استحکام جوش حاصل بالاتر از فلز پایه اتصال بوده است؛ به طوری که نمونه کششی از محل فلز پایه دچار شکست شده است. می‌توان نتیجه گرفت کیفیت جوش ایجاد شده از نظر سلامت جوش کاملاً مورد تأیید بوده و هیچ‌گونه عیب تأثیرگذار بر روی خواص مکانیکی جوش در نمونه وجود ندارد. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه استحکام کششی و تسلیم هر سه اتصال نشان داده شده است.



شکل ۱۰ مقایسه استحکام نهایی نمونه‌های جوشکاری شده با سه نوع فلز پرکننده



شکل ۱۱ مقایسه استحکام تسلیم نمونه‌های جوشکاری شده با سه نوع فلز پرکننده

انجام آزمون کشش بر روی نمونه‌های با سه نوع فلز پرکننده مختلف مشخص کرد که نمونه فلز پرکننده ER316L بالاترین مقدار استحکام تسلیم و کششی را دارد و کمترین استحکام تسلیم و کششی مربوط به نمونه فلز پرکننده ER309 می‌باشد.

۳-۴- نتایج آزمون ضربه

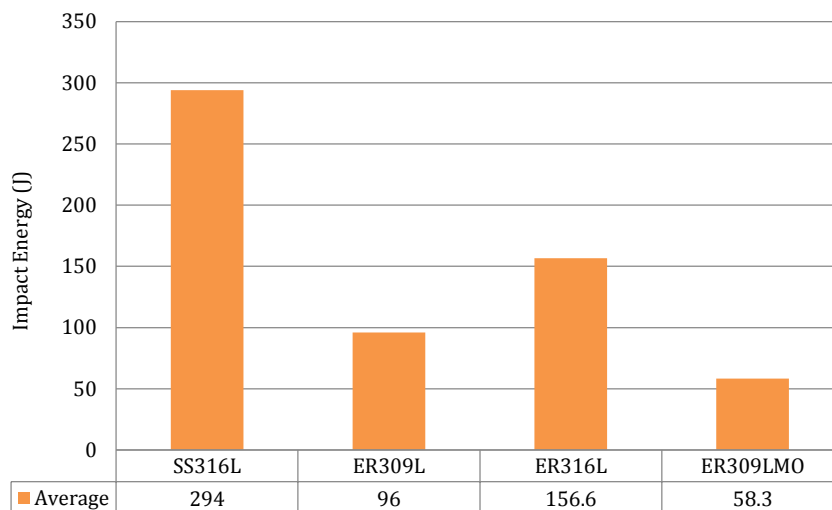
آزمون ضربه در دمای محیط بر روی فلزات پایه و فلز جوش به‌منظور بررسی فلز جوش مناسب اتصال 316L برای نمونه‌های ER309L، ER316L و ER309LMO انجام شد. نتایج آزمون ضربه نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده مختلف در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶ نتایج آزمون ضربه نمونه‌ها در دمای محیط

نمونه	محل شکاف	انرژی ضربه (J)	میانگین انرژی ضربه (J)
SS316L	Base	۲۹۴	۲۹۴
		۲۹۴	
ER309L	Weld	۵۴	۹۶
		۹۹	
		۱۳۵	
ER316L	Weld	۱۶۴	۱۵۶/۶
		۱۵۱	
		۱۵۵	
ER309LMO	Weld	۵۴	۵۸/۳
		۵۵	
		۶۶	

با توجه به نتایج آزمون ضربه نشان داده شده در جدول ۶ و شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که نمونه جوشکاری با فلز پرکننده ER316L در مقایسه با نمونه‌های جوشکاری شده ER309 دارای انرژی ضربه بیشتری است و این کاهش انرژی ضربه فلز جوش در اتصال فولاد SS316L با استفاده از فلز پرکننده ER309LMO می‌تواند ناشی از ریزساختار فریت دلتا باشد که این موضوع در تصاویر ریزساختار مربوط به فلز جوش ER309LMO شبکه به هم پیوسته فاز فریت دلتا نیز قابل مشاهده می‌باشد؛ همچنین با توجه به نمودار

شغلر رسم شده برای مقادیر نیکل و کروم معادل سه فلز پرکننده، مشاهده می‌شود که فلز پرکننده ER309LMO نسبت به دو فلز جوش دیگر در قسمتی قرار می‌گیرد که دارای درصد بیشتر فریت دلتا همراه با زمینه آستنیتی می‌باشد. برخی محققان معتقدند که فریت دلتا اثر مخربی بر خواص ضربه ماده خواهد گذاشت که دلیل اصلی آن را عدم پیوستگی بین فریت دلتا و زمینه اطراف ذکر کرده‌اند [۲۸، ۲۹].



شکل ۱۲ میانگین انرژی ضربه فلز پایه و نمونه‌های جوشکاری شده

ونگ و همکاران [۳۰] نشان داده‌اند که حضور فریت دلتا باعث کاهش انرژی ضربه و افزایش دمای تبدیل نرمی به تدری می‌شود. بنابراین در اتصال فولاد SS316L فلز پرکننده مناسب از نظر میزان انرژی ضربه ER316L می‌باشد. به دلیل اینکه فلز پرکننده ER309L و فلز پرکننده ER309LMO باعث کاهش انرژی ضربه فلز جوش می‌شوند و در کاربردهای که مقاومت به ضربه مطرح است، استفاده از این فلز پرکننده‌ها مناسب نمی‌باشد.

در این تحقیق همچنین سطح مقطع شکست نمونه‌های ضربه فلزات پرکننده به وسیله یک میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به سطوح شکست فلز جوش ER309L، ER316L و ER309LMO در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. انواع مورفولوژی‌های سطوح شکست در مشاهدات شکست نگاری شناسایی گردیدند. این مورفولوژی‌ها در دو دسته دیمپلی نرم و موزاییکی ترد، قابل طبقه‌بندی هستند. مورفولوژی دیمپلی نرم که معرف مکانیزم شکست اتصال حفره‌ها و حاکی از وقوع شکست نرم یا داکتیل از طریق جوانه‌زنی و به هم پیوستن حفره‌ها می‌باشد [۳۱].

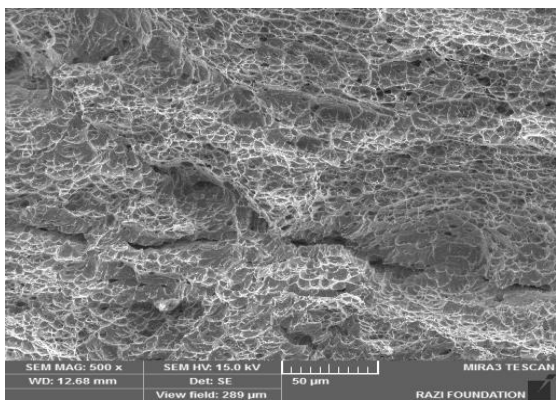
با مشاهده شکل‌های ۱۳ در سرتاسر سطوح شکست فلز جوش، هیچ‌گونه شواهدی دال بر تغییر مکانیزم شکست و یا ایجاد مسیرهای ترجیحی رشد ترک در امتداد مرزهای دانه یا مرزهای بین فازی مشاهده نمی‌شود. در این شرایط سطح شکست نوعی مورفولوژی دیمپلی را در نمونه فلز پرکننده ER309L نشان می‌دهد. حفرات و دیمپل‌ها نیز در ساختار به چشم می‌خورند، هرچند که منشأ به وجود آمدن حفرات در ساختار رسوبات موجود در زمینه است. نقاط A و B رسوبات موجود در ساختار در طیف EDS حاوی عناصر منگنز، نیکل، کروم و اکسیژن می‌باشد.

شکل ۱۴، سطح شکست نوعی مورفولوژی دیمپلی را در نمونه فلز پرکننده ER316L نشان می‌دهد. حفرات و دیمپل‌ها نیز در ساختار به چشم می‌خورند. حضور دیمپل‌های درشت در سطح شکست، نشان‌دهنده شکست کاملاً نرم است، هرچند که منشأ به وجود آمدن حفرات در ساختار رسوبات موجود در زمینه است. نقاط A، B و C رسوبات موجود در ساختار در طیف EDS حاوی عناصر اکسیژن، منگنز، کروم و نیکل می‌باشد.

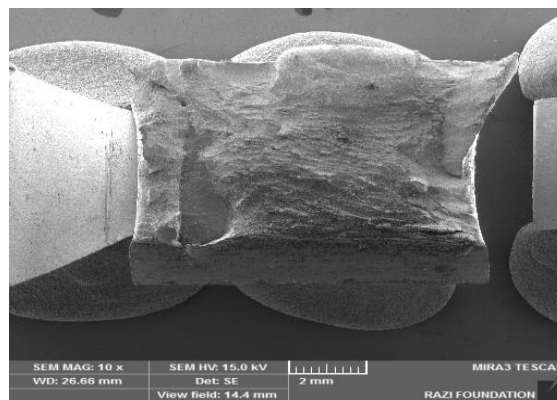
شکل ۱۵ سطح شکست نوعی مورفولوژی موزاییکی ترد را نمایش می‌دهد که متشکل از بخش کوچک آستنیت است که صاف و تقریباً فاقد علائم تغییر شکل هستند. مورفولوژی موزاییکی سطح شکست عبارت است از نوعی مورفولوژی ترد همراه با جذب انرژی بسیار ناچیز در مقایسه با مورفولوژی دیمپلی نرم (شکل ۱۵-ج و شکل ۱۵-د). در این مورفولوژی، ذرات کوچک به‌عنوان مراکز

جوانه‌زی حفره‌ها بر روی سطح شکست به‌وضوح قابل تشخیص هستند. در طیف EDS نقاط A و B این ذرات حاوی مقادیر بالای از اکسیژن می‌باشند که بررسی‌های فوق نشان‌گر تأثیرات بارز فاز فریت دلتا در تغییر حالت شکست از شکست نرم به شکست ترد و لذا کاهش انرژی ضربه شاریپی است. این تغییر حالت شکست اساساً معلول تمرکز تنش ناشی از حرکت و تجمع نابه‌جایی‌ها در پشت موانعی نظیر فاز فریت دلتا و فعال شدن صفحات شبه کلیواژ در زمینه آستنیتی می‌باشد، به‌طوری‌که صفحه اصلی ترک منطبق بر صفحات شبه کلیواژ در دانه‌های مختلف آستنیت قرار می‌گیرد.

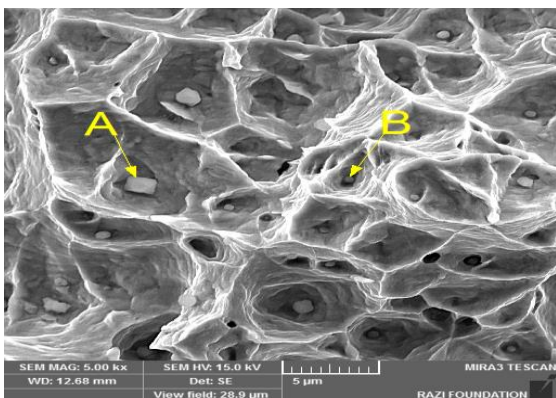
قسمت‌بندی فاز آستنیت توسط شبکه فاز فریت دلتا موجب ممانعت از انقباض آزاد بخش‌های مجزای آستنیت در طی شکست ضربه می‌گردد. اشاعه سریع ترک از فاز فریت دلتا به داخل تکه‌های مجزای فاز آستنیت که تغییر شکل چندانی نیافته، توأم بر جذب انرژی کم و برجای ماندن سطح شکستی با مورفولوژی موزاییکی می‌شود.



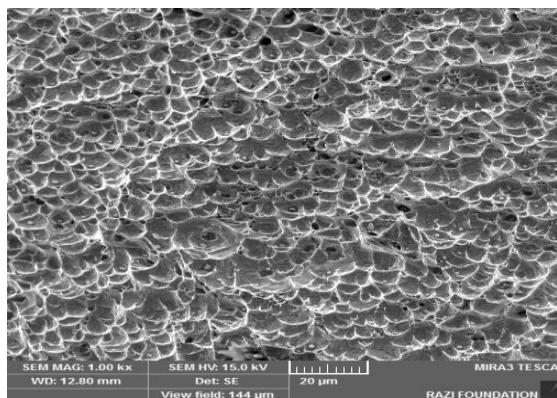
(ب)



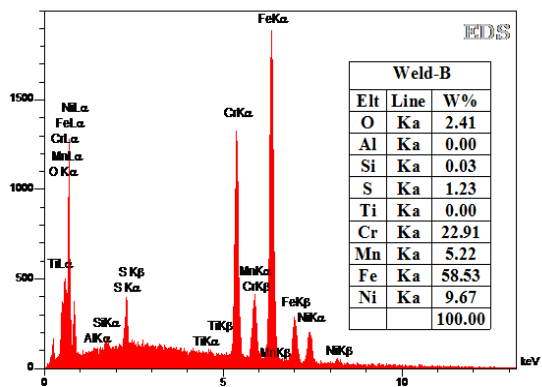
(الف)



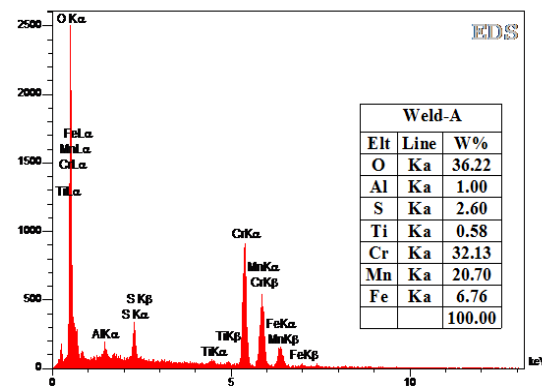
(د)



(ج)

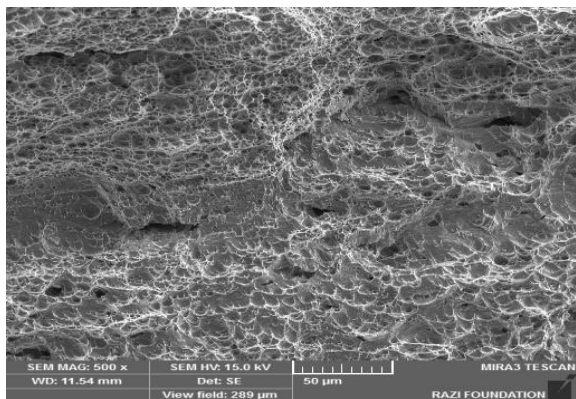


(و)

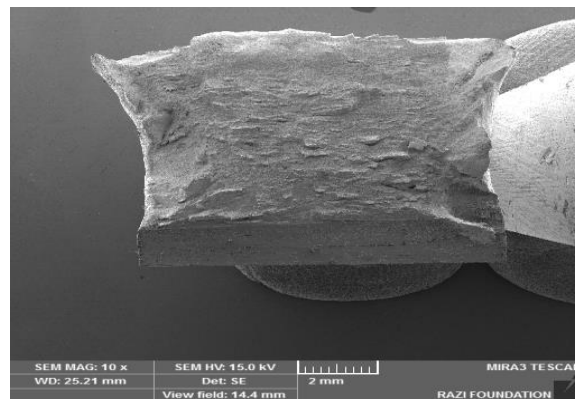


(ه)

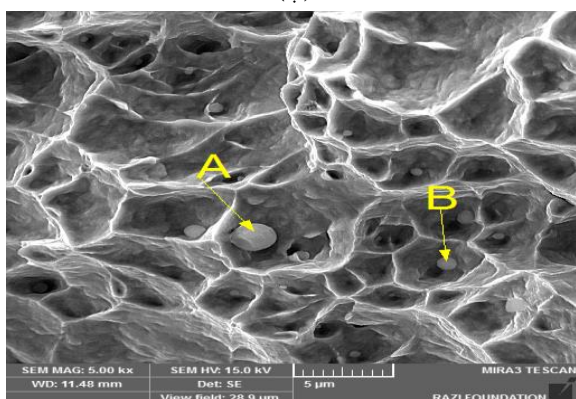
شکل ۱۳ تصاویر SEM از مقاطع شکست نمونه ضربه ER309L (الف) مورفولوژی دیملی سطح شکست، (ب) حفرات و دیمل‌ها در ساختار، (ج) حفرات و دیمل‌ها در نمای نزدیک‌تر، (د) محل رسوبات نقاط A و B، (ه) طیف EDS نقطه A، (و) طیف EDS نقطه B



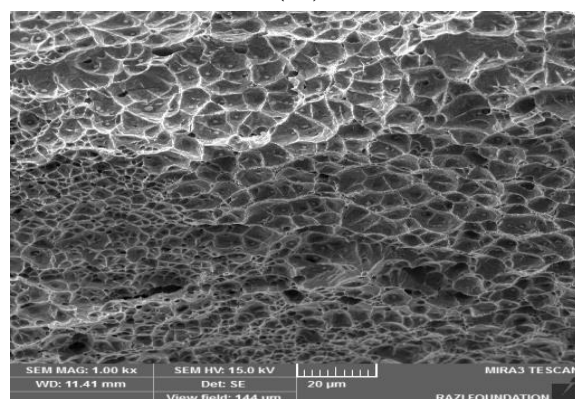
(ب)



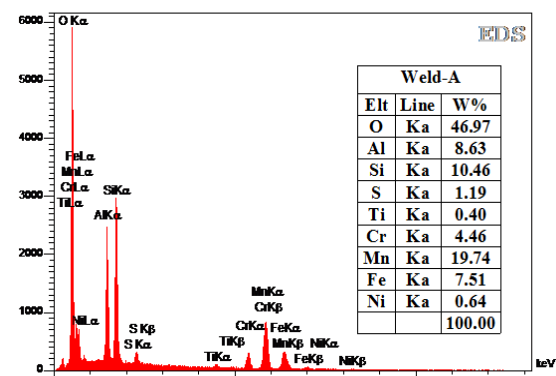
(ف)



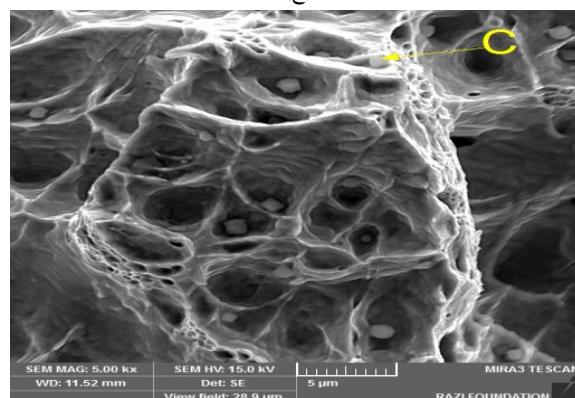
(د)



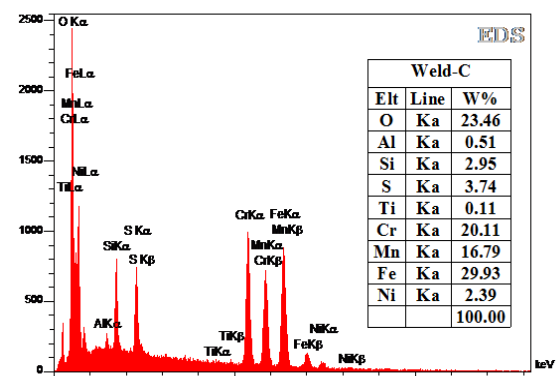
(ج)



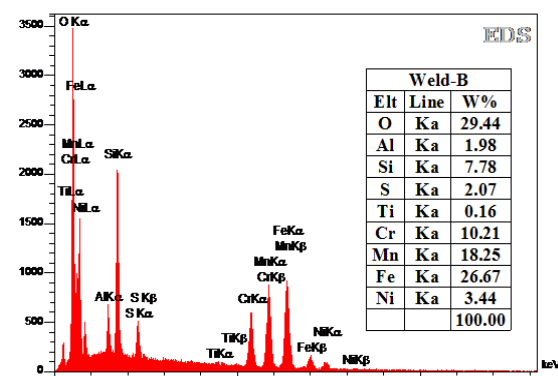
(و)



(ه)

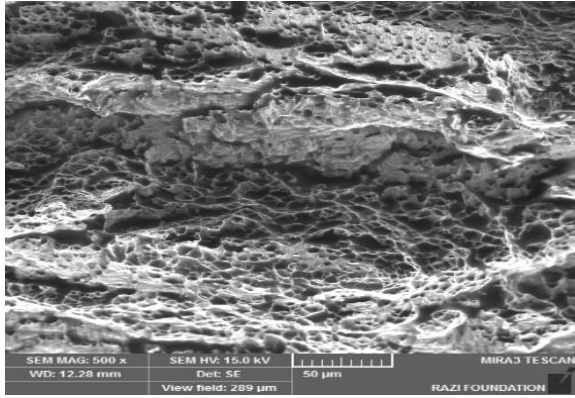


(ح)

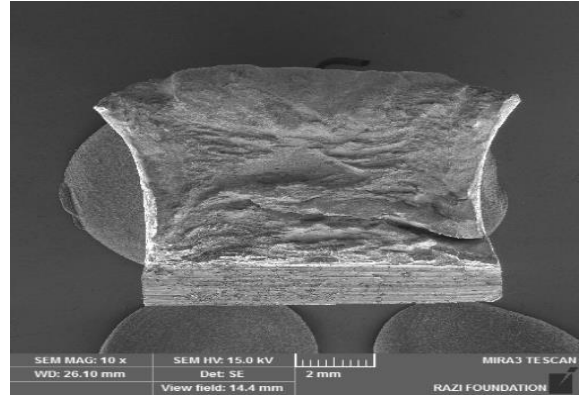


(ز)

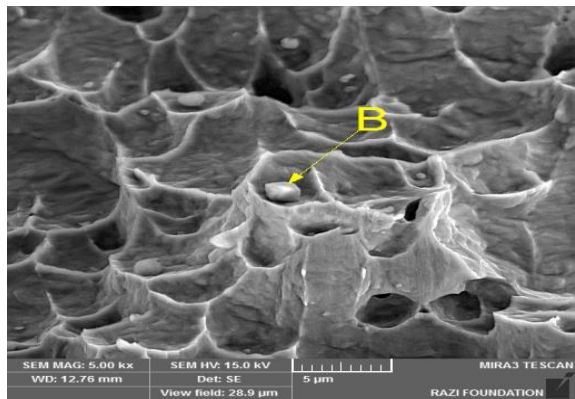
شکل ۱۴ تصاویر SEM از مقاطع شکست نمونه ضربه ER316L (الف) مورفولوژی دیملی سطح شکست، (ب) حفرات و دیملها در ساختار، (ج) حفرات و دیملها در نمای نزدیکتر، (د) محل رسوبات نقاط A و B، (ه) محل رسوب نقطه C، (و) طیف EDS نقطه A، (ز) طیف EDS نقطه B و (ح) طیف EDS نقطه C



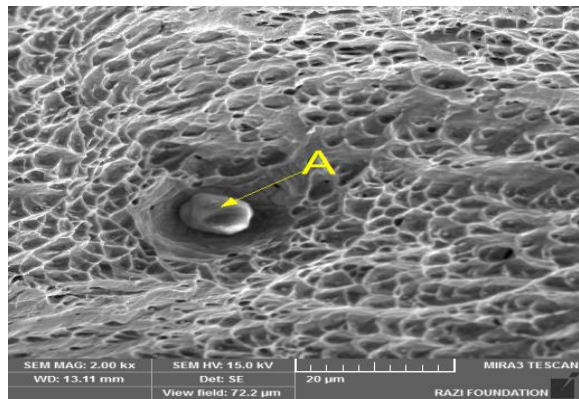
(ب)



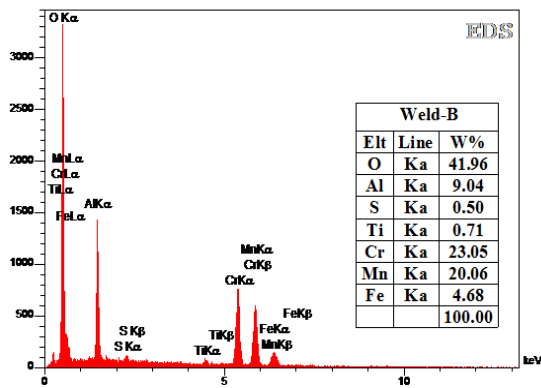
(الف)



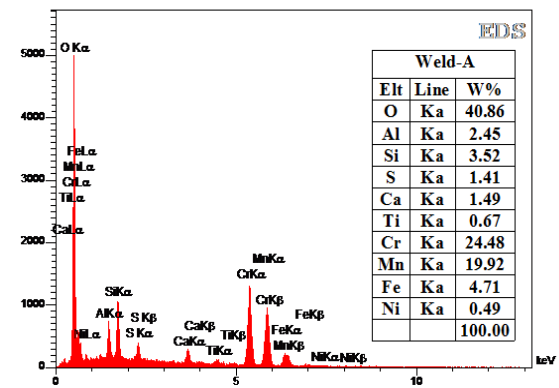
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۱۵ تصاویر SEM از مقاطع شکست نمونه ضربه ER309LMO (الف) مورفولوژی موزاییکی سطح شکست، (ب) بخش‌های کوچک آستنیت که تقریباً صاف و فاقد علائم تغییر شکل هستند، (ج) محل رسوب نقطه A، (د) محل رسوب نقطه B، (ه) طیف EDS نقطه A، (و) طیف EDS نقطه B

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ریزساختار و رفتار مکانیکی اتصال جوش فولاد زنگ نزن 316L با سه نوع فلز پرکننده مختلف بررسی گردید و نتایج ذیل به دست آمد:

- ریزساختار فلز پایه اتصال جوش فولاد 316L دارای یک ساختار کاملاً آستنیتی به همراه نواحی دوقلویی در فلز پایه می‌باشد.
- ریزساختار جوش اتصال فولاد 316L در فلزات پرکننده ER309LMO, ER316L و ER309 آستنیتی همراه با توزیع فاز فریت دلتا است. طبق بررسی نمودار شغلر فلزات پرکننده ER316L و ER309 در محدوده آستنیت با ۵ تا ۱۰ درصد فریت و فلز پرکننده ER309LMO درصد فریت بیشتر را دارا می‌باشد.

- میانگین سختی فلز پرکننده ER309LMO (۲۰۵ ویکرز) بیشتر از میانگین سختی فلزات پرکننده ER316L (۱۹۷ ویکرز) و ER309 (۱۸۹ ویکرز) است. سختی در هر سه نوع فلز پرکننده در ناحیه متأثر از حرارت افزایش داشته است که می‌تواند ناشی از حضور کاربیدهای کروم در این ناحیه باشد.
- نتایج آزمون کشش هر سه نمونه جوشکاری شده فلز جوش ER309LMO, ER316L و ER309 نشان می‌دهد که استحکام جوش حاصل بالاتر از فلز پایه است. استحکام نهایی اتصال هر سه فلز پرکننده بالاتر از ۵۴۵ مگاپاسکال بود به طوری که نمونه کششی از محل فلز پایه دچار شکست شد.
- نمونه جوشکاری ER316L در مقایسه با دو نمونه جوشکاری شده ER309 دارای انرژی ضربه بیشتری است و این کاهش انرژی ضربه فلز جوش در اتصال فولاد SS316L با استفاده از فلز پرکننده ER309LMO می‌تواند ناشی از ریزساختار فریت دلتا باشد. بنابراین در این اتصال استفاده از فلز پرکننده ER316L به علت بهبود انرژی ضربه، فلز پرکننده مناسب‌تری می‌باشد.
- فلز جوش فلز پرکننده ER309LMO دارای سطح شکست موزاییکی نوعی مورفولوژی ترد که همراه با جذب انرژی بسیار ناچیز در مقایسه با مورفولوژی دیمپلی نرم فلز جوش ER316L است، می‌باشد.

References

- [1] Mizabi Asl ME, Belbasi M, Mofid MA. Effect of Temper and Quench Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of AISI 4130 to AISI 4340 Steel Joint with GTAW Process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Mar 21. doi: 10.22034/ijme.2024.423695.1876
- [2] Marashi P, Pouranvari M, Amirabdollahian S, Abedi A, Goodarzi M. Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steels. Materials science and engineering: A. 2008 May 15;480(1-2):175-80. doi: 10.1016/j.msea.2007.07.007
- [3] Hosseini HS, Shamanian M, Kermanpur A. Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds. Materials characterization. 2011 Apr 1;62(4):425-31. doi: 10.1016/j.matchar.2011.02.003
- [4] Varmaziar S, Atapour M, Hedberg Y. Effect of filler metal on microstructure and corrosion behavior of welded AISI 316L using GTAW process. Journal of Welding Science and Technology of Iran. 2022 Aug 10;8(1):123-36. doi: 20.1001.1.2476583.1401.8.1.11.9
- [5] Thomas N, Mathew A, George K, Thomas N, Thampi S, Biradar A, Rijesh M. Microstructural and mechanical properties evaluation of tungsten inert gas-welded 316 stainless steel and pure copper joint. Metallography, Microstructure, and Analysis. 2020 Oct;9:678-84. doi: 10.1007/s13632-020-00682-x
- [6] Hedaiat F, Dehmlaei R, Khorasanian M, Lotfi B. Long-term oxidation behaviour and thermal stability of heat-resistant stainless steel claddings deposited on AISI 316 stainless steel by the GTAW process. Surface and Coatings Technology. 2021 Oct 25;424:127605. doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127605
- [7] Serindağ HT, Çam G. Multi-pass butt welding of thick AISI 316L plates by gas tungsten arc welding: Microstructural and mechanical characterization. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2022 Dec 1;200:104842. doi: 10.1016/j.ijpvp.2022.104842
- [8] Açar İ, Gülenç B. Effect of shielding gas combination on microstructure and mechanical properties of MIG welded stainless steel 316. Materials Testing. 2021 Feb 10;63(1):97-101. doi: 10.1515/mt-2020-0014
- [9] Mirzaloo M, Modabberifar M, Taheri M, Alighoorchi I, Karian A. Experimental investigation of the effects of laser parameters on the strength and size of the weld nugget in laser spot welding of stainless steel sheet 316. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021 Jul 23;8(5):23-9. [In Persian]
- [10] Oktadinata H, Triantoro T, Gumilar A, Jatmiko UR. Microstructure and Hardness Properties of AISI 321 Stainless Steel Welded Joints with Different Filler Metal. Key Engineering Materials. 2023 Sep 7;951:3-9. doi: 10.4028/p-GOU7ql
- [11] Sirohi S, Pandey SM, Świerczyńska A, Rogalski G, Kumar N, Landowski M, Fydrych D, Pandey C. Microstructure and mechanical properties of combined GTAW and SMAW dissimilar welded joints between Inconel 718 and 304L austenitic stainless steel. Metals. 2022 Dec 21;13(1):14. doi: 10.3390/met13010014
- [12] Assefa AT, Ahmed GM, Alamri S, Edacherian A, Jiru MG, Pandey V, Hossain N. Experimental investigation and parametric optimization of the tungsten inert gas welding process parameters of dissimilar metals. Materials. 2022 Jun 23;15(13):4426. doi: 10.3390/ma15134426
- [13] Rao VA, Deivanathan R. Experimental investigation for welding aspects of stainless steel 310 for the process of TIG welding. Procedia Engineering. 2014 Jan 1;97:902-8. doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.365
- [14] Mahajan A, Singh H, Kumar S, Kumar S. Mechanical properties assessment of TIG welded SS 304 joints. Materials Today: Proceedings. 2022 Jan 1;56:3073-7. doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.133

- [15] Bharath P, Sridhar VG. Optimization of 316 stainless steel weld joint characteristics using Taguchi technique. *Procedia Engineering*. 2014 Jan 1;97:881-91. doi: [10.1016/j.proeng.2014.12.363](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.363)
- [16] Moslemi N, Redzuan N, Ahmad N, Hor TN. Effect of current on characteristic for 316 stainless steel welded joint including microstructure and mechanical properties. *Procedia CIRP*. 2015 Jan 1;26:560-4. doi: [10.1016/j.procir.2015.01.010](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.010)
- [17] Essam A, Ramy A, EL-Nikhaily A, Essa AR. Effect of heat input and filler metals on weld strength of gas tungsten arc welding of AISI 316 weldments. *China Welding*. 2020 Mar 1;29(1):8-16. doi: [10.12073/j.cw.20200107001](https://doi.org/10.12073/j.cw.20200107001)
- [18] Ostovan F, Shafiei E, Toozandehjani M, Mohamed IF, Soltani M. On the role of molybdenum on the microstructural, mechanical and corrosion properties of the GTAW AISI 316 stainless steel welds. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021 Jul 1;13:2115-25. doi: [10.1016/j.jmrt.2021.05.095](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.095)
- [19] Yadav A, Srivastava M, Jain PK, Rathee S. Investigation of bead morphology and mechanical behaviour for metal inert gas welding-based WAAM in pulsed mode metal transfer on 316LSi stainless steel. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2024 Mar 3;38(5):738-69. doi: [10.1080/01694243.2023.2241642](https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2241642)
- [20] Noga P, Skrzekut T, Wędrychowicz M, Węglowski MS, Wiewióra M. The Influence of Various Welding Methods on the Microstructure and Mechanical Properties of 316Ti Steel. *Materials*. 2024 Apr 6;17(7):1681. doi: [10.3390/ma17071681](https://doi.org/10.3390/ma17071681)
- [21] Aravindkumar D, Thirumalai R. Investigations on microstructural characteristics and mechanical properties of 316 L stainless steel welded joints using nickel coated filler material by gas tungsten arc welding. *Materials Research Express*. 2021 Apr 13;8(4):046513. doi: [10.1088/2053-1591/abf3e7](https://doi.org/10.1088/2053-1591/abf3e7)
- [22] Reddy MP, William AA, Prashanth MM, Kumar SS, Ramkumar KD, Arivazhagan N, Narayanan S. Assessment of mechanical properties of AISI 4140 and AISI 316 dissimilar weldments. *Procedia Engineering*. 2014 Jan 1;75:29-33. doi: [10.1016/j.proeng.2013.11.006](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.11.006)
- [23] Mridha S, Idriss AM, Baker TN. Incorporation of TiC particulates on AISI 4340 low alloy steel surfaces via tungsten inert gas arc melting. *Advanced Materials Research*. 2012 Mar 8;445:655-60. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.445.655](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.445.655)
- [24] de Albuquerque VH, de Macedo Silva E, Leite JP, de Moura EP, de Araújo Freitas VL, Tavares JM. Spinodal decomposition mechanism study on the duplex stainless steel UNS S31803 using ultrasonic speed measurements. *Materials & Design*. 2010 Apr 1;31(4):2147-50. doi: [10.1016/j.matdes.2009.11.010](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.010)
- [25] Kiran DV, Basu B, De A. Influence of process variables on weld bead quality in two wire tandem submerged arc welding of HSLA steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012 Oct 1;212(10):2041-50. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2012.05.008](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.008)
- [26] Łabanowski J. Mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar stainless steel welds. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2007;28(1):27-33.
- [27] Stoica V, Ahmed R, Itsukaichi T. Influence of heat-treatment on the sliding wear of thermal spray cermet coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2005 Sep 1;199(1):7-21. doi: [10.1016/j.surfcoat.2005.03.026](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.03.026)
- [28] Bashu SA, Singh K, Rawat MS. Effect of heat treatment on mechanical properties and fracture behaviour of a 12CrMoV steel. *Materials Science and Engineering: A*. 1990 Jul 1;127(1):7-15. doi: [10.1016/0921-5093\(90\)90184-5](https://doi.org/10.1016/0921-5093(90)90184-5)
- [29] Carrouge D, Bhadeshia HK, Woollin P. Effect of δ -ferrite on impact properties of supermartensitic stainless steel heat affected zones. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2004 Oct 1;9(5):377-89. doi: [10.1179/136217104225021823](https://doi.org/10.1179/136217104225021823)
- [30] Wang P, Lu SP, Xiao NM, Li DZ, Li YY. Effect of delta ferrite on impact properties of low carbon 13Cr-4Ni martensitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2010 May 25;527(13-14):3210-6. doi: [10.1016/j.msea.2010.01.085](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.085)
- [31] Mills WJ. Fracture toughness of type 304 and 316 stainless steels and their welds. *International Materials Reviews*. 1997 Jan;42(2):45-82. doi: [10.1179/imr.1997.42.2.45](https://doi.org/10.1179/imr.1997.42.2.45)