



بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر هم‌جنس فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی AISI 310 به AISI 316 توسط جوشکاری قوسی تنگستن- گاز با جریان پالسی (PCGTAW)

مظفر سخن پرداز*

عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: Mozafar.sokhanpardaz@iau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۲ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

فولاد زنگ‌نزن آستنیتی

جوشکاری GTAW

اتصال غیرمشابه

گاز محافظ

فلز پرکننده

در این تحقیق فلزات غیر هم‌جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۰ و ۳۱۶ با استفاده از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز پالسی جوشکاری شدند. جوشکاری تحت حفاظت گازهای Ar و Ar-10%CO₂ و با استفاده از سه نوع فلز پرکننده ER309L، ER310 و ER316L بعنوان متغیرهای فرایند انجام شد و تأثیر نوع گاز محافظ و فلز پرکننده بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری شده مورد ارزیابی قرار گرفت. ریزساختار اتصالات جوشکاری شده توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی خواص مکانیکی جوش‌ها توسط آزمون کشش، ریزسختی سنجی و ضربه انجام شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که تغییر نوع فلز پر کننده باعث ایجاد تغییر در ریزساختار، به ویژه در مورفولوژی فریت می‌شود که فلز پرکننده ۳۱۶ باعث تولید فریت اسکلتی ستونی در ریز ساختار جوش‌ها شد و در ریزساختار مابقی جوش‌ها، فریت اسکلتی هم‌محور مشاهده شد. همچنین در نمونه های جوشکاری شده با گاز محافظ مخلوط به دلیل افزایش حرارت ورودی، فاز فریت درشت دانه‌تر در ریزساختار جوش‌ها دیده شد و انرژی ضربه کاهش یافت. در تمامی نمونه‌های جوشکاری شده پس از آزمون کشش، شکست در منطقه HAZ و فلز پایه رخ داد که نشان از استحکام کششی بالای فلز جوش در اتصال تمامی نمونه‌ها دارد. در آخر، با مقایسه نتایج به دست آمده، فلز پرکننده ER309 و گاز محافظ مخلوط آرگون و CO₂ مناسب ترین انتخاب برای اتصال غیر هم‌جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۰ و ۳۱۶ تشخیص داده شد.

Evaluation of the microstructure and mechanical properties of dissimilar welds between AISI310 and AISI316 austenitic stainless steels by pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW)

Mozafar Sokhanpardaz*

Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran

* Corresponding Author's Email: Mozafar.sokhanpardaz@iau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 1 February 2024

Accepted: 4 May 2024

Keywords:

Austenitic Stainless Steel
Gas Tungsten Arc Welding
Dissimilar Joint
Shielding Gas
Filler Metal

Abstract

In this research, dissimilar metals of austenitic stainless steel 310 and 316 were welded using Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding (PCGTAW) method. Welding was performed under the protection of Ar and Ar-10% CO₂ gases and using three filler metals ER309L, ER310 and ER316L as process variables, and the effect of different shielding gases and filler metals on the microstructure and mechanical properties of the welded samples were evaluated. The microstructure of welded joints was examined by optical microscope. Mechanical properties of joints were evaluated using tensile, microhardness and impact tests. The results obtained have shown that changing the type of filler metal causes a change in the microstructure, especially in the morphology of ferrite, and the filler metal 316 resulted in the formation of columnar skeletal ferrite in the microstructure of the welds and Coaxial skeletal ferrite was observed in the microstructure of the remaining welds as well. Also, in specimens welded with the mixed shielding gas, due to the increase in the input heat, coarse-grained ferrite phase was seen in the microstructure of the welds and the impact energy decreased. After the tensile test, the failure of all tested samples occurred in the HAZ area and the base metal, which shows the high tensile strength of the weld metal in all specimens. Finally, by comparing the obtained results, the ER309 filler metal and mixed shielding gas of Ar-10% CO₂, were identified as the most suitable option for joining dissimilar austenitic stainless steel 310 to 316.

Please cite this article using:

Sokhanpardaz M. Evaluation of the microstructure and mechanical properties of dissimilar welds between AISI310 and AISI316 austenitic stainless steels by pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW). Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Apr 20;11(2):1-19. doi: 10.22034/IJME.2024.441060.1927 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی معمولاً در صنایع گاز، نفت، پتروشیمی، هسته‌ای و خودروسازی به دلیل شکل‌پذیری عالی، مقاوم در برابر خوردگی و پایداری این خواص در دماهای بالا استفاده می‌شوند. به دلیل کاربرد فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در صنایع ذکر شده، اتصال غیرهم جنس این فولادها، از جمله اتصال غیرهم جنس فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۰ و ۳۱۶ مورد توجه بوده و کاربردهای زیادی دارد. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی گسترده‌ترین و به طور قابل توجهی، بزرگترین گروه فولادهای زنگ‌نزن مورد استفاده در صنایع هستند. در میان این فولادها، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ به دلیل خواص مهندسی مطلوب مانند جوش‌پذیری خوب، مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای مناسب، عملکرد قابل قبول در دمای بالا و مقاومت در برابر اکسیداسیون در دمای پایین به طور خاص مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فولادها همچنین به دلیل پایداری در محیط‌های اسیدی، مقاومت خوب در برابر خوردگی تنشی سولفیدی^۱ و تشکیل لایه غیرفعال در محیط‌های بسیار خورنده، به طور گسترده در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و حتی هسته‌ای استفاده می‌شوند. اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به طور گسترده در صنایع هسته‌ای، نظامی، دریایی و مخازن تحت فشار استفاده می‌شود. کاربرد اصلی این اتصالات جوشکاری در مواردی است که نیاز به خواص مکانیکی یا راندمان بالا باشد. فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ اغلب در نیروگاه‌ها و لوله‌های حاوی بخارات داغ استفاده می‌شود.

از طرفی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۰ به دلیل داشتن نیکل و کروم بالا در دماهای بالا استفاده می‌شود. فولاد ۳۱۰ در کاربردهایی استفاده می‌شود که در آن توالی‌های سرمایه‌ش-گرمایش متعدد و متناوب وجود دارد، زیرا لایه رسوبی غیرفعال، یک پوشش بسیار چسبنده بر روی سطح فولاد تشکیل می‌دهد [۱، ۲]. مقاومت بسیار خوب آن‌ها در برابر خوردگی در بسیاری از محیط‌های خورنده به دلیل وجود یک لایه غیرفعال سطحی است که عمدتاً از اکسید کروم تشکیل شده است که در صورت آسیب خود را ترمیم می‌کند و از آلیاژ در برابر محیط اطراف محافظت می‌کند. ساختار FCC^۲ این آلیاژها به دلیل وجود عناصر تثبیت کننده‌ی آستنیت مانند نیکل، منگنز و نیتروژن حفظ می‌شود. مقادیر نسبتاً بالایی از نیکل (معمولاً ۸ درصد وزنی یا بیشتر) در فولادهای زنگ‌نزن سری AISI300 وجود دارد که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. نیکل تا حدی با منگنز و نیتروژن در فولادهای زنگ‌نزن سری AISI200 که استحکام بالاتری داشته و ارزان‌تر هستند، جایگزین می‌شود. با این حال، این آلیاژها ممکن است مقاومت در برابر خوردگی کمتری نسبت به فولادهای سری AISI300 نشان دهند، زیرا مقدار کروم کمتری دارند [۳].

از نظر کاربرد و میزان تولید سالانه، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی بزرگ‌ترین گروه در خانواده فولادهای زنگ‌نزن هستند. پرکاربردترین آن‌ها در سری AISI300، سیستمی از آلیاژهای Fe-Cr-Ni هستند. در این سری، نوع ۳۰۱ (17%Cr-7%Ni) به دلیل تبدیل مارتنزیتی ناشی از تغییر شکل، دارای قابلیت ساخت خوب و توانایی استحکام بخشی از طریق کار سرد است. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۲ و ۳۰۴ دارای مقادیر بالاتری عناصر آلیاژی هستند. آلیاژ پایه این گروه یعنی ۳۰۴، حاوی ۱۸ درصد کروم و ۸ درصد نیکل است که معمولاً با عنوان فولاد ۸-۱۸ نیز شناخته می‌شود. نوع ۳۰۴ به طور گسترده در طیف وسیعی از کاربردها به ویژه مواردی که شامل دمای بالا هستند، استفاده می‌شود. نیکل باعث می‌شود فولاد زنگ‌نزن ۳۰۵ حتی پایدارتر از نوع ۳۰۴ شود. همچنین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۹، ۳۱۰ و ۳۱۴ برای کار در دماهای بالا سازگار هستند. فولادهای زنگ‌نزن ۳۱۶ و ۳۱۷ به خاطر مقادیر بالای عناصر آلیاژی، دارای مقاومت به خوردگی خوب و استحکام در دمای بالا می‌باشند [۴].

جوشکاری فلزات غیرمشابه به ویژه مواد فولادی غیرمشابه به دلیل مزایایی که دارد از جمله تولید قطعات سبک ماشین‌آلات در صنایع خودروسازی، تولید قطعات مهندسی با مقاومت خوردگی مطلوب در صنایع شیمیایی، پتروشیمی و صنایع تولید انرژی اهمیت زیادی پیدا کرده است. از طرفی جوشکاری فولادهای غیرمشابه به دلیل تفاوت ذاتی در خواص فیزیکی، مکانیکی و متالورژیکی آن‌ها در مقایسه با فولادهای هم جنس بسیار دشوار است [۵].

فرایندهای حالت جامد و برخی از فرایندهای جوشکاری ذوبی مانند جوشکاری پرتو لیزر و پرتو الکترونی قادر به تولید اتصالات با کیفیت بالا هستند. با این حال، محدودیت‌های اصلی در جوشکاری حالت جامد فولادهای غیرمشابه، هزینه بالای آن و عدم توانایی در جوشکاری قطعات پیچیده است. با توجه به این چالش‌ها، جوشکاری تیگ^۳ به دلیل پایداری و کیفیت بالای جوش تولید شده به طور

¹ Sulfide Stress Corrosion (SSC)

² Face Center Cubic

³ Tungsten Inert Gas

گسترده در اتصال غیر مشابه فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در صنایع تولیدی استفاده می‌شود [۷،۶]. تحقیقات متعددی با استفاده از روش‌های جوشکاری حالت جامد و ذوبی برای جوشکاری فلزات غیر مشابه انجام شده است.

آریواژگان و همکاران [۸] اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI304 به فولاد کم آلیاژ AISI4140 را با روش‌های جوشکاری پرتو الکترونی، جوشکاری اصطکاکی و جوشکاری قوسی تنگستن-گاز^۱ (GTAW) بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در این اتصالات بهترین خواص مکانیکی توسط جوشکاری پرتو الکترونی به دلیل گرمای ورودی بالاتر به دست می‌آید.

چرخ و همکاران [۹] به بررسی اثر پیش‌گرم بر روی کاهش اعوجاج در جوشکاری فلزات غیرهم‌جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ و فولاد کربنی A106-B پرداختند و مشاهده شد که با افزایش دمای پیش‌گرم، اعوجاج در اتصالات غیر هم‌جنس در هر دو طرف فولاد زنگ‌نزن و فولاد کربنی کاهش قابل توجهی می‌یابد. با افزایش دمای پیش‌گرم از محدوده دمایی خاصی به بعد، اثر پیش‌گرم روی کاهش اعوجاج در هر دو طرف اتصال کمتر می‌شود. هر چه دمای پیش‌گرم در اتصال فلزات غیرهم‌جنس نامتقارن تر می‌شود اثر پیش‌گرم روی کاهش اعوجاج در طرف فولاد کربنی ناچیز ولی در طرف فولاد زنگ‌نزن اثر مهمی دارد. با افزایش یکنواخت دمای پیش‌گرم، طرف فولاد کربنی نسبت به طرف فولاد زنگ‌نزن به دلیل دارا بودن ضریب هدایت حرارتی بالا اعوجاج حاصل از جوش کمتری دارد.

در پژوهش دیگری، لابونسکی [۱۰] به بررسی خواص مکانیکی و حساسیت به ترک خوردگی تنش‌ی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ به فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ پرداخت. این محقق گزارش کرده است که در این اتصال غیرمشابه، ضعیف‌ترین مکان در ارتباط با ترک خوردگی تنش‌ی، منطقه متأثر از حرارت در سمت فولاد زنگ‌نزن دوفازی است. این پدیده با ساختار نامطلوب آن ناحیه متشکل از مقدار زیادی فریت درشت دانه و رسوب‌های آستنیت سوزنی شکل مرتبط بود. همچنین ترک در منطقه متأثر از حرارت پس از انجام آزمون تنش-کرنش مشاهده و گزارش شده است.

بانویی و همکاران [۱۱] در تحقیقی، به بررسی اثر انرژی ورودی بر استحکام اتصال غیر هم‌جنس اینکونل 713LC به فولاد ۴۱۴۰ به روش جوشکاری پرتو الکترونی پرداختند و مشاهده شد که با افزایش انرژی ورودی عمق نفوذ و نیروی کششی اتصال افزایش می‌یابد. در تست کشش نمونه‌ها نیروی کششی سه نمونه، بیش از ۸۰ درصد فلز پایه را نشان دادند. همچنین نشان داده شد که شکست در تمامی نمونه‌ها از ناحیه فصل مشترک فولاد ۴۱۴۰ به منطقه جوش رخ داده است به طوری که با افزایش انرژی ورودی، منطقه متأثر از حرارت در فصل مشترک فولاد ۴۱۴۰ افزایش می‌یابد. در بررسی سطوح شکست نیز مشاهده گردید که در مقادیر انرژی بالاتر از 230 J/mm انعطاف‌پذیری جوش کاهش می‌یابد که علت آن درجه حرارت بالا بر اثر افزایش انرژی ورودی و نرخ سرد شدن سریع منطقه جوش است.

میرکریمی و همکاران [۱۲] در پژوهشی اتصال غیرمشابه فولاد A387-Gr.11 و فولاد A240-TP.316 توسط جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ با دو جریان ثابت و پالسی و با استفاده از دو نوع فلز پرکننده ER309L و ERNiCr-3 را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که نمونه‌های جوشکاری شده توسط جریان پالسی به دلیل گرمای ورودی کم‌تر و ایجاد اختلاط بیش‌تر در حوضچه جوش، ضمن کاهش وقوع پدیده‌های نامطلوب متالورژیکی مانند تشکیل منطقه فقیر از کربن، منطقه انتقالی و منطقه مخلوط نشده، بهبود خواص مکانیکی اتصال را در بر داشتند. نتایج نشان دادند که فلز پرکننده پایه نیکل، به دلیل محدود کردن نفوذ کربن به درون حوضچه جوش و کاهش احتمال تشکیل منطقه انتقالی نسبت به فلز پرکننده دیگر، مطلوب‌تر است.

اسدی و همکاران [۱۳] در تحقیقی به بررسی عددی تأثیر سرعت جوشکاری، حرارت ورودی و تعداد پاس در تنش‌های پسماند اتصال لوله‌هایی از جنس فولاد زنگ‌نزن در جوشکاری تیگ پرداختند. نتایج نشان دادند که با افزایش سرعت جوشکاری، تنش کششی محوری در سطح لوله کاهش می‌یابد. در حالت تنش مماسی، با افزایش سرعت جوشکاری، تنش‌های کششی و فشاری برای هر دو حالت جوش دو پاس و سه پاس افزایش می‌یابند و همچنین عرض ناحیه تنش در سرعت‌های جوشکاری بالاتر، باریک‌تر می‌شود. نتایج نشان دادند که جوشکاری با سه پاس تنش‌های کمتری نسبت به جوشکاری با دو پاس ایجاد می‌کند.

در تحقیق دیگری میسرا و همکاران [۱۴] به بررسی استحکام کششی اتصال غیرمشابه فولاد ساده کربنی به فولادهای زنگ‌نزن ۲۰۲، ۳۰۴، ۳۱۰ و ۳۱۶ پرداختند. اتصال قطعات با فرایند جوشکاری برقی با الکتروود فلزی مصرف شدنی و گاز محافظ (میگ) و

¹ Gas Tungsten Arc Welding

² Metal Inert Gas

جوشکاری برقی با الکتروود تنگستن مصرف نشدنی و گاز محافظ (تیگ) انجام شد. نتایج نشان داد که اتصال‌های جوشی تولید شده با روش تیگ از خواص مکانیکی بهتری نسبت به نمونه‌های تولید شده با روش میگ برخوردار هستند.

در پژوهش دیگری اسدی و همکاران [۱۵] به بررسی تاثیر نوع ماده (جنس قطعات و الکتروود)، پیشگرم کردن و تعداد پاس جوش بر تنش‌های پسماند در لوله‌های فولادی (C-Mn, SUS304, SUS316) جوشکاری شده به روش تیگ چندپاسه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که نوع فلز پایه، تاثیر بیشتری بر تنش‌های پسماند کششی محوری روی سطح خارجی لوله نسبت به سطح داخلی آن دارد. هرچند تعداد پاس جوش تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر تنش پسماند کششی محوری در سطح داخلی ندارد. در حالت پیش‌گرم، مقدار تنش با افزایش دمای پیش‌گرم کاهش می‌یابد که در سطح داخلی لوله با کاهش شدیدتری همراه خواهد بود. به علاوه برای اینکه تنش پسماند کششی محوری کمتر از استحکام تسلیم فلز پایه باشد، پیش‌گرم کردن تا حداقل دمای ۳۲۵ درجه سانتی‌گراد ضروری است.

در پژوهش دیگری مرتضایی و همکاران [۱۶] به بررسی اتصال غیر مشابه بین سوپرآلیاژ پایه نیکل، اینکونل ۷۱۸ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی S310 با استفاده از روش قوسی تنگستن-گاز، برای تعیین رابطه‌ی بین ریزساختار جوش‌ها و خواص مکانیکی و خوردگی حاصل پرداختند. برای این منظور از سه فلز پرکننده اینکونل ۶۲۵، اینکونل ۸۲ و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۰ استفاده گردید. مشاهده شد که ریزساختارهای جوش برای تمام فلزات پرکننده کاملاً آستنیتی هستند. در آزمایش‌های کشش، جوش‌های تولید شده توسط فلزات پرکننده اینکونل ۶۲۵ و ۳۱۰ به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت کششی نهایی را نشان دادند. نتایج آزمون ضربه شاریبی نشان داد که حداکثر انرژی شکست مربوط به فلز جوش اینکونل ۸۲ است. با توجه به نتایج تست پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی، اینکونل ۸۲ بالاترین مقاومت خوردگی را در بین تمام فلزات پرکننده آزمایش شده نشان داد. در نهایت، نتیجه‌گیری شد که برای جوشکاری غیرمشابه بین اینکونل ۷۱۸ و فولاد S310، فلز پرکننده اینکونل ۸۲ خواص بهینه را در دمای اتاق ارائه می‌دهد.

کوتاری و همکاران [۱۷] در یک تحقیق جوشکاری غیرهمجنس آلیاژ منیزیم AZ31 به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به روش تیگ را مورد مطالعه قرار دادند و خواص ترشوندگی و پخش پذیری فلز پرکننده پایه منیزیم روی سطح فولاد زنگ‌نزن را تحلیل و بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که شکست در ناحیه HAZ در سمت آلیاژ منیزیم و در فصل مشترک فولاد زنگ‌نزن و درز جوش رخ داد. سطح شکست نمونه‌ها با استفاده از آنالیز SEM مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و با مشاهده حفره‌ها شکست از نوع نرم تشخیص داده شد.

در پژوهش دیگری که توسط موتاسکو و همکاران [۱۸] انجام شده است از فرایند جوشکاری پالسی تیگ برای سخت کاری سطحی فولاد زنگ‌نزن داپلکس X2CrNiMoN22-5-3 با لایه‌ای از آلیاژ استلایت استفاده شد. در این تحقیق شرایط جوشکاری بهینه منجر به تشکیل پوششی عاری از منافذ و ترک، با چسبندگی خوب به بستر شد و مورفولوژی و عملکرد لایه‌های رسوب‌شده با میکروسکوپ نوری و اندازه‌گیری سختی مورد مطالعه قرار گرفت.

ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI347 به فولاد کم آلیاژ ASTM/A335 توسط حاجیان نیا و همکاران [۱۹] مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، دو فلز پرکننده ER309L و ERNiCr-3 برای استفاده در فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز انتخاب شدند. در تست‌های کشش، تمام جوش‌ها در منطقه متأثر از حرارت سمت فولاد کم آلیاژ A335 گسیخته شدند. همچنین حداکثر انرژی شکست مربوط به اتصال با فلز پرکننده ERNiCr-3 بود. حداکثر و حداقل سختی به ترتیب با فلزات پرکننده ERNiCr-3 و ER309L حاصل شد. در نهایت نتیجه‌گیری شد که فلز پرکننده ERNiCr-3 بهترین انتخاب برای اتصال فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۴۷ و فولاد کم آلیاژ A335 است.

با توجه به مطالعات انجام شده مشخص می‌شود که اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و صنایع دریایی کاربرد ویژه‌ای دارد. از مهمترین پارامترهای جوشکاری در اتصال غیرهمجنس فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، انتخاب مناسب فلز پرکننده و گاز محافظ است. با توجه به اهمیت و کاربرد اتصال فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۰ و ۳۱۶ در صنایع مختلف، از جمله صنعت نفت و گاز، ضرورت انجام تحقیق برای رسیدن به یک اتصال غیرهمجنس با خواص مکانیکی و ریزساختاری مطلوب وجود دارد، بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی اثر دو نوع گاز محافظ آرگون و مخلوط گازهای آرگون و CO₂ و همچنین سه نوع فلز پرکننده ۳۰۹، ۳۱۰ و ۳۱۶ بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال ورق‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۰ و ۳۱۶ پرداخته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این بخش از پژوهش مشخصات مواد مصرفی، نحوه انجام آزمون‌ها و بررسی‌های ریزساختاری آورده شده است. آزمون‌های انجام شده شامل آنالیز عنصری (کوانتومتری)، آزمون‌های مکانیکی کشش، ضربه شارپی و ریزسختی‌سنجی بودند. ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری بررسی شد.

۲-۱- فلزات پایه و فلزات پرکننده

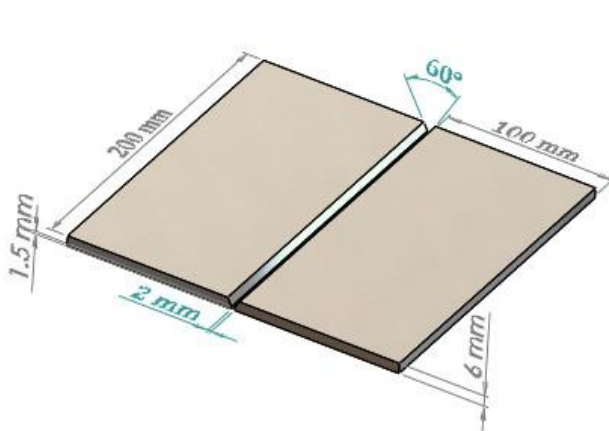
در این پژوهش از دو نوع ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI310 و AISI316 به عنوان فلزات پایه استفاده شد. جهت اتصال فلزات پایه از سه نوع فلز پرکننده فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ER309L، ER310 و ER316L ساخت کشور انگلیس استفاده شد. ترکیب شیمیایی مواد مصرفی در جداول ۱ ارائه شده است. برای آنالیز عنصری و تعیین میزان عناصر موجود در فلزات پایه و فلز جوش از دستگاه کوانتومتری مدل Foundry Master UV استفاده شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلزات پرکننده (درصد وزنی)

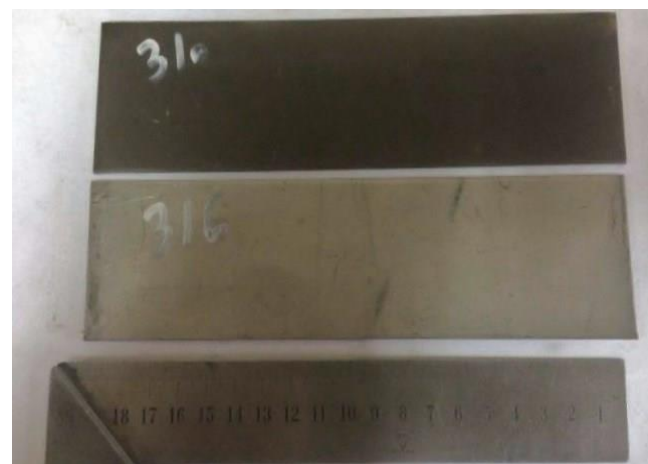
S	P	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	C	Fe	
0.01	0.017	1.18	1.30	25.03	0.11	19.74	—	0.156	پایه	AISI 310
0.01	0.03	1.24	0.59	16.60	2.24	10.20	0.12	0.063	پایه	AISI 316
0.02	0.02	1.80	0.30	23.60	0.04	12.50	0.10	0.03	پایه	ER309L
0.014	0.02	2.10	0.50	26.00	0.75	20.00	0.72	0.08	پایه	ER310
0.01	0.018	1.90	0.45	19.00	2.50	12.10	0.60	0.04	پایه	ER316L

۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها و طرح اتصال

فلزات پایه مورد استفاده به شکل ورق و با ابعاد $۲۰۰ \times ۱۰۰ \times ۶$ میلی‌متر با استفاده از دستگاه واترجت بریده شدند (شکل ۱-الف). در این پژوهش، از طرح اتصال V شکل یک‌طرفه با زاویه پخ ۶۰° درجه، درز اتصال ۲ میلی‌متر و پاشنه اتصال $۱/۵$ میلی‌متر، با در نظر گرفتن ضخامت ورق‌های فلزات پایه و جنس آن‌ها، استفاده شد. آماده سازی ورق‌ها به وسیله ماشین فرز و با استفاده از مایع خنک کننده‌ی آب صابون جهت جلوگیری از تغییر در ریزساختار نمونه‌ها، انجام شد. نمایی از طرح اتصال و ابعاد آن در شکل ۱-ب ارائه شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱ الف) نمایی از نمونه‌های آماده سازی شده قبل از انجام فرایند جوشکاری، ب) نمایی از طرح اتصال

پس از فرایند آماده‌سازی و لبه‌سازی جهت انجام فرایند جوشکاری، تمام صفحات با برس سیمی، برس کاری شده تا هرگونه لایه اکسیدی و آلودگی که روی سطح وجود دارد از بین رود. سپس ورق‌ها را با آب گرم و مواد شوینده شستشو داده تا تمام چربی‌ها و آلودگی‌هایی که از مرحله‌ی ماشینکاری و برش نمونه‌ها باقیمانده، از بین برود. نمایی از فیکسچر و قطعات قبل از جوشکاری در شکل ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که طبق تحقیقات انجام شده [۲۰] در شدت جریان‌های کمتر از ۲۵۰ آمپر، فیکسچر تاثیر قابل توجهی در پدیده وزش قوس ایجاد نمی‌کند و با توجه به اینکه در پژوهش حاضر جوشکاری با شدت جریان کمتر از ۲۵۰ آمپر انجام شده است، پدیده وزش قوس در حین فرایند جوشکاری مشاهده نشد. هرچند جهت اطمینان از عدم وقوع پدیده وزش قوس و یا کاهش اثرات آن، علاوه بر این که محل اتصال کابل به قطعه کار تا حد امکان دور از درز جوش انتخاب شد، از فیکسچر دیگری مشابه با فیکسچر استفاده شده در سمت دیگر قطعه کار جهت ایجاد تقارن جرم فلزی اطراف درز جوش استفاده شده است.



شکل ۲ نمایی از فیکسچر و قطعات فلزات پایه قبل از جوشکاری

۲-۳- روش جوشکاری

در این پژوهش برای ایجاد یک اتصال غیرهمجنس بین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۰ و ۳۱۶ از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان پالسی با قطبیت منفی و الکتروود تنگستنی با قطر ۱/۸ میلی‌متر استفاده شد. از سه نوع فلز پرکننده‌ی ER309L، ER310 و ER316L و دو نوع گاز محافظ آرگون و گاز محافظ مخلوط (۱۰ درصد کربن دی اکسید + ۹۰ درصد آرگون) استفاده شد.

به منظور اتصال ورق‌ها، دستورالعمل جوشکاری طبق استاندارد ASME بخش نهم برای هرکدام از فلزات پرکننده تنظیم شد. حرارت ورودی جوشکاری در این تحقیق با اعمال راندمان حرارتی $\eta = 0.77$ [۲۱]، برابر با 0.847 کیلو ژول بر میلی‌متر محاسبه شد. همچنین پارامترهایی نظیر قطبیت جریان DCEN، دمای پیشگرم ۲۵ درجه سانتی‌گراد و حداکثر دمای بین پاسی ۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. مقدار دمای بین پاسی توسط گج حرارتی و ترموکوپل لیزری، در فاصله ۱/۵ سانتی‌متری از فلز جوش کنترل شد. لازم به ذکر است که نمونه‌ها قبل از جوشکاری با استون تمیز شدند و بین هر پاس هم با استفاده از برس سیمی تمیز کاری انجام شد. گازهای محافظ آرگون و کربن دی اکسید با خلوص ۹۹/۹ درصد به عنوان گاز محافظ با سرعت ۱۰ لیتر بر دقیقه برای حفاظت و با سرعت ۵ لیتر بر دقیقه برای حفاظت پشت جوش استفاده شد. جدول ۲ پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

چون هدف این پژوهش، بررسی تاثیر گاز محافظ و فلز پرکننده بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال جوشی ایجاد شده است، سایر پارامترهای جوشکاری ثابت در نظر گرفته شد. شش نمونه از طرح اتصال ارایه شده در شکل ۱-ب برای اتصال غیرمشابه فولادهای ۳۱۶ به ۳۱۰ و دو نمونه برای اتصال مشابه و با ابعاد $6 \times 10 \times 200$ میلی‌متر، از هر کدام از فلزات پایه تهیه شد. سپس اتصال با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان پالسی انجام شد. قبل از انجام فرایند جوشکاری عملیات سنگ‌زنی نمونه‌ها انجام شد. همچنین بعد از جوشکاری در هر پاس و قبل از انجام پاس بعدی، سنگ‌زنی برای خروج آخال و کاهش عیوب جوش اعمال شد.

نمایی از ورق جوشکاری شده در شکل ۳ مشاهده می‌شود. پس از انجام فرایند جوشکاری آزمون‌های متالوگرافی و مکانیکی بر روی نمونه‌ها انجام شد. ابتدا آزمون آلتراسونیک جهت بررسی عیوب روی نمونه‌ها صورت گرفت.

جدول ۲ پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش

نام نمونه	جریان (A)	ولتاژ (V)	سرعت جوشکاری (mm/S)	قطر الکترود تنگستن (mm)	فلز پرکننده	گاز محافظ	فلزات پایه
ER309-Ar	220	12	2.4	1.8	ER309	Ar	AISI 310-AISI 316
ER310-Ar	220	12	2.4	1.8	ER310	Ar	AISI 310-AISI 316
ER316-Ar	220	12	2.4	1.8	ER316	Ar	AISI 310-AISI 316
ER309-Mix	220	12	2.4	1.8	ER309	Ar-10%CO ₂	AISI 310-AISI 316
ER310-Mix	220	12	2.4	1.8	ER310	Ar-10%CO ₂	AISI 310-AISI 316
ER316-Mix	220	12	2.4	1.8	ER316	Ar-10%CO ₂	AISI 310-AISI 316
SER310-Ar	220	12	2.4	1.8	ER310	Ar	AISI 310-AISI 310
SER316-Ar	220	12	2.4	1.8	ER316	Ar	AISI 316-AISI 316



شکل ۳ نمایی از ورق‌های جوش داده شده

آزمون متالوگرافی جهت شناسایی ریزساختارهای مناطق مختلف اتصال (فلزات پایه، منطقه متاثر از حرارت و فلز جوش) توسط میکروسکوپ نوری^۱ انجام شد. همچنین آزمون‌های مکانیکی شامل آزمون کشش، ضربه شاریپی و ریزسختی‌سنجی روی نمونه‌ها انجام شد. برای اطمینان از درستی نتایج، آزمون‌های کشش و ضربه سه بار برای هر نمونه تکرار شدند و مقدار میانگین برای هر نمونه به عنوان نتایج این آزمون‌ها ارائه شد.

۲-۴- بررسی‌های ریزساختاری

از قطعات جوشکاری شده نمونه‌هایی در ابعاد ۱۰ × ۳۰ میلی‌متر جهت بررسی‌های ریزساختاری توسط وایرکات تهیه شد. سپس نمونه‌ها به‌وسیله‌ی سنباده‌های ۶۰ تا ۳۰۰۰ آماده‌سازی شدند و پولیش نهایی با ترکیب آب و آلومینا (Al₂O₃) با صفحه پولیش نمدی انجام شد.

به منظور مشاهده فازهای موجود در مناطق مختلف اتصال نمونه‌ها، از محلول اچ ماربل (4g Cu₂SO₄ + 20 ml HCl + 20 ml H₂O) برای اچ کردن استفاده شد. بدین منظور از میکروسکوپ نوری SA-Iran مدل IMM420 ساخت کشور ایران استفاده شد. نمایی از نمونه‌های آماده شده جهت انجام آزمون متالوگرافی در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

¹ Optical Microscope

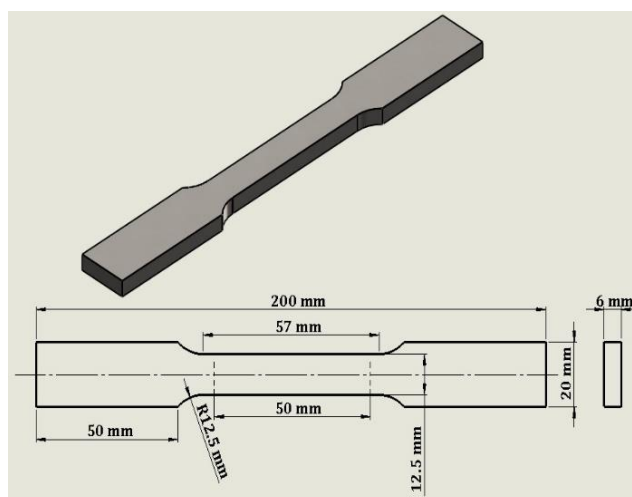


شکل ۴ نمایی از نمونه‌های آماده شده جهت انجام آزمون متالوگرافی

۲-۵-آزمون کشش

با استفاده از آزمون کشش می‌توان استحکام کششی، استحکام تسلیم، مدول الاستیسیته و انعطاف‌پذیری (درصد تغییر طول نسبی و درصد تغییر سطح نسبی) را به دست آورد.

به منظور انجام آزمون کشش روی نمونه‌های جوشکاری شده، سه عدد از هر کدام از نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M تهیه شد [۲۲]. آزمون کشش به وسیله‌ی دستگاه کشش ۳۰ تنی مدل INSTRON 4486 ساخت کشور انگلستان انجام شد. نما و ابعاد نمونه‌های کشش در شکل ۵ نشان داده شده است. به طور معمول، طول نمونه ۲۰ سانتی‌متر و عرض آن ۲ سانتی‌متر می‌باشد و آزمایش در دمای محیط انجام می‌شود.



شکل ۵ ابعاد و جزئیات نمونه‌های کشش مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M

۲-۶-آزمون ریزسختی سنجی ویکرز

آزمون سختی سنجی، مقاومت فلز در برابر فرو رفتن جسم سخت‌تر در سطح آن را نشان می‌دهد. ریزسختی‌سنجی ویکرز مطابق با استاندارد ASTM E92-82 به وسیله‌ی نیروی ۱۰۰ گرم برای مناطق مختلف نمونه‌های جوشکاری شده انجام شد [۲۳]. لازم به ذکر است که مدت زمان اعمال نیرو در این آزمون ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

۲-۷- آزمون ضربه شاری

جهت تعیین انرژی ضربه‌ی فلز جوش، از آزمون ضربه شاری استفاده شد. این آزمون مقاومت نمونه در برابر بارهای ضربه‌ای (برای مثال نیرویی که در هنگام تصادف، به یک مخزن تحت فشار قابل حمل اعمال می‌شود) را شبیه‌سازی می‌کند. جهت انجام آزمون ضربه شاری از هر اتصال سه نمونه طبق استاندارد ASTM E23-00 تهیه شد. نمونه‌ها به شکل مکعب به ابعاد $6 \times 100 \times 200$ میلی‌متر آماده شدند به طوری که فلز جوش در مرکز نمونه قرار گیرد و یک شیار به عمق ۲ میلی‌متر و زاویه ۴۵ درجه روی فلز جوش ایجاد شد [۲۴]. آزمون ضربه به وسیله‌ی دستگاه تست ضربه SANTAM-SIT-300E و در دمای محیط (۲۷ درجه سانتیگراد) روی نمونه‌ها انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار فلزات پایه

شکل ۶ تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های متالوگرافی شده از فلزات پایه AISI310 و AISI316 را نشان می‌دهد. شکل ۶-الف ریز ساختار آئیل شده‌ی فلز پایه‌ی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI310 که متشکل از دانه‌های هم محور آستنیت است را نشان می‌دهد. در این تصاویر زمینه آستنیتی با رنگ روشن مشخص شده و مرز دانه‌های آستنیت به رنگ تیره قابل مشاهده است. شکل ۶-ب ریز ساختار نوردی فلز پایه‌ی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI316 را نشان می‌دهد. در این تصاویر ریز ساختار شامل دانه‌های هم محور آستنیت به عنوان زمینه به همراه نوارهای نازک فریت دلتا است. در این تصاویر زمینه آستنیتی با رنگ روشن مشخص شده و فاز فریت دلتا به رنگ تیره قابل مشاهده است. فریت دلتا به صورت نواری در جهت نورد کشیده شده است که تشکیل این فریت ناشی از جدایش عناصر فریت‌زا (بوپزه کروم) در طی انجماد است. ریز ساختار فلزات پایه در این پژوهش با ریز ساختار مشاهده شده در مطالعات گذشته مطابقت دارد [۲۵، ۲۶].



(ب)



(الف)

شکل ۶ ریز ساختار فلزات پایه (الف) فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI310، (ب) فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI316

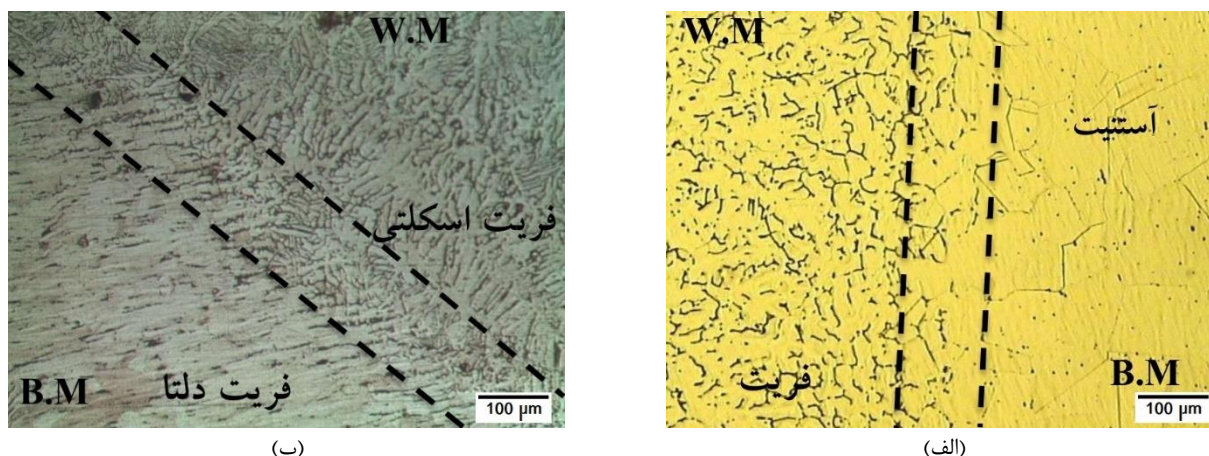
۳-۲- بررسی ریزساختار منطقه متأثر از حرارت

نتایج نشان داد که ریز ساختار منطقه‌ی متأثر از حرارت هر هشت نمونه تقریباً یکسان است و تنها تفاوت آن در دو طرف یعنی سمت فلز جوش و فلز پایه نمونه‌ها مشاهده شد. از آنجا که ریزساختار فلز پایه و فلز جوش برای هر یک از نمونه‌های جوشکاری شده به‌طور جداگانه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند و به دلیل یکسان بودن ریزساختار ناحیه HAZ در نمونه‌ها، ریز ساختار منطقه متأثر از حرارت نمونه ER309-Ar در سمت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI310 و سمت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI316 بررسی شد. شکل ۷ فصل مشترک فلزات پایه‌ی فولاد ۳۱۶ و فولاد ۳۱۰ و فلز جوش برای نمونه‌ی ER309-Ar را نشان می‌دهد. در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به دلیل پایین بودن ضریب انتقال حرارت، عرض منطقه متأثر از حرارت کوچک است. همان‌طور که در شکل ۷-الف

مشاهده می‌شود، در اثر حرارت ناشی از حوضچه‌ی جوش، اندازه دانه‌های آستنیت در این ناحیه نسبت به فلز پایه‌ی AISI310 افزایش یافته و تبلور مجدد رخ داده است. همچنین فریت تشکیل شده در فلز جوش در ادامه‌ی مرز دانه‌های آستنیت رشد کرده است که باعث رشد اپی تکسیال در این ناحیه شده است [۲۷].

شکل ۷-ب فصل مشترک فلز پایه‌ی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A316 و فلز جوش برای نمونه‌ی ER309-Ar را نشان می‌دهد. پدیده مشهود در منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A316، افزایش مقدار نوارهای فریت (فریت دلتا) می‌باشد. میزان تشکیل فریت دلتا به دلیل کند بودن استحاله آستنیت به فریت و سریع بودن سیکل حرارتی منطقه متأثر از حرارت کم می‌باشد. در این ناحیه مورفولوژی فریت دلتا که به صورت اسکلتی انجامد یافته به وضوح قابل مشاهده است [۲۷].

همچنین با پیشروی از سمت فلز پایه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI316 به سمت فلز جوش در منطقه متأثر از حرارت، دانه‌های آستنیت از حالت کشیده و نوردی به صورت گرد و هم محور تبدیل شده اند. این امر ناشی از میزان حرارت ورودی بیشتر در نواحی نزدیک به فلز جوش است که باعث تبلور مجدد و هم محور شدن دانه‌های آستنیت در این ناحیه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در منطقه متأثر از حرارت، فریت‌های تشکیل شده در طول مرز دانه‌ها به صورت هم محور رشد کرده‌اند که به خاطر سرعت سرد شدن متوسط جوش و مقدار کم Cr_{eq}/Ni_{eq} می‌باشد.



شکل ۷ ریزساختار منطقه متأثر از حرارت و فصل مشترک نمونه ER309-Ar سمت الف) فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 310، ب) فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316

فریت تشکیل شده در مرز دانه‌ها رشد دانه‌ها را محدود کرده و احتمال ترک خوردن ذوبی منطقه HAZ را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر فریت‌های تشکیل شده در فصل مشترک فلز جوش با فلز پایه زنگ‌نزن آستنیتی، در امتداد فریت‌های موجود در زمینه آستنیتی فلز پایه رشد نموده اند، بدین صورت که ابتدا آستنیت به صورت اپی تکسیال از دانه‌های آستنیت ذوب نشده در مرز ذوب رشد کرده و سپس فریت دلتا در جبهه‌ی انجماد جوانه می‌زند. این نوع رشد برای جوش مفید می‌باشد چرا که منطقه جوش را به دانه‌های فلز پایه پیوند می‌دهد و موجب می‌شود که از تمرکز تنش در فصل مشترک جوش و HAZ جلوگیری نماید [۲۸].

۳-۳- بررسی ریز ساختار فلز جوش

در این پژوهش از سه فلز پرکننده‌ی آستنیتی ER309L، ER310، و ER316L بعنوان سیم جوش و دو نوع گاز محافظ آرگون و گاز محافظ مخلوط (آرگون + ۱۰ درصد کربن دی اکسید) استفاده شد. نتایج متالوگرافی فلز جوش نمونه‌های ER310-Ar، ER309-Ar، ER316-Ar، ER316-Mix، ER310-Mix، ER309-Mix، و SER316-Ar در شکل ۸ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ریز ساختار حاصل در هر شش نمونه از نوع انجماد FA می‌باشد. انجماد FA بصورت فریت اولیه اتفاق می‌افتد و در پایان انجماد مقداری آستنیت تشکیل می‌شود، به طوری که در پایان انجماد فریت اولیه، یک واکنش پریتکتیک-یوتکتیک، آستنیت را در طول مرزهای سلولی و دندریتی فریت ایجاد می‌کند [۲۹].

با توجه به شکل ۸ ریز ساختار در تمامی نمونه‌ها بصورت فریتی-آستنیتی می‌باشد که در آن فریت با رنگ تیره در زمینه‌ی آستنیت با رنگ روشن دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸-الف و ۸-ب مشاهده می‌شود، ریز ساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی ER309 بصورت فریت اسکلتی و در برخی نقاط به صورت فریت شبکه‌ای همراه با آستنیت می‌باشد.

با توجه به شکل ۸-ج و ۸-د، ریزساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی ER310 از نوع فریت اسکلتی هم محور در زمینه آستنیت می‌باشد. همچنین طبق شکل ۸-ه و ۸-ز، ریز ساختار فلز جوش حاصل از فلز پرکننده‌ی ER316 از نوع فریت ستونی در زمینه آستنیت می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که مورفولوژی و ریخت‌شناسی فریت در نمونه‌های مختلف، متفاوت است. پارامترهای مختلفی روی ریزساختار نهایی فلز جوش فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی تاثیرگذار است. از آن جمله می‌توان به نسبت GR و نسبت C_{req}/Ni_{eq} اشاره کرد. دو پارامتر گرادیان دمایی (G) و نرخ رشد (R) از پارامترهای مهم انجماد هستند که به ترتیب نسبت آن‌ها (G/R) و حاصل ضربشان (G.R) برای پیش‌بینی مورفولوژی انجماد و اندازه ریزساختار انجماد استفاده می‌شوند [۲۸].

با توجه به یکسان بودن فرایند جوشکاری و پارامترهای آن، عامل اصلی تغییر در شکل‌گیری ریز ساختار را نمی‌توان نسبت GR معرفی کرد. از طرفی با توجه به تفاوت ترکیب شیمیایی فلزهای پرکننده و در نتیجه تفاوت در نسبت C_{req}/Ni_{eq} ریز ساختار حاصل از جوشکاری متفاوت خواهد بود [۲۸].

مورفولوژی فریت اسکلتی یا کرمی شکل که در شکل ۸-الف و ۸-ب مشاهده می‌شود و از انجماد فلز پرکننده‌ی ER309 حاصل می‌شود، زمانی شکل می‌گیرد که سرعت سرد شدن متوسط و یا نسبت C_{req}/Ni_{eq} در محدوده فریت-آستنیت (FA) باشد. دلیل این امر توسعه آستنیت مصرف کننده‌ی فریت است، زیرا وقتی که فریت به قدر کافی از عناصر فریت‌زا (کروم و مولیبدن) غنی و از عناصر آستنیت‌زا (نیکل، کربن و نیتروژن) تهی شود، در دماهای پایین‌تر که سرعت نفوذ محدود است، پایدار می‌گردد.

در برخی نواحی ساختار فریت بصورت شبکه‌ای مشاهده می‌شود. مورفولوژی شبکه‌ای به دلیل محدودیت نفوذ در طی استحاله‌ی فریت-آستنیت به جای مورفولوژی اسکلتی شکل می‌گیرد. وقتی که فواصل نفوذی کاهش می‌یابد، فرایند استحاله در صورت ایجاد شبکه‌های فضایی فشرده‌تر، تسهیل می‌شود. این امر باعث ایجاد الگوی فریت باقیمانده می‌شود که جهت رشد سلول یا دندریت اصلی را قطع نموده است [۲۹]. بنابراین ساختار ایجاد شده در سطح جوش به دلیل نرخ سرد شدن بالا و نسبت C_{req}/Ni_{eq} بیشتر، به صورت شبکه‌ای می‌باشد.

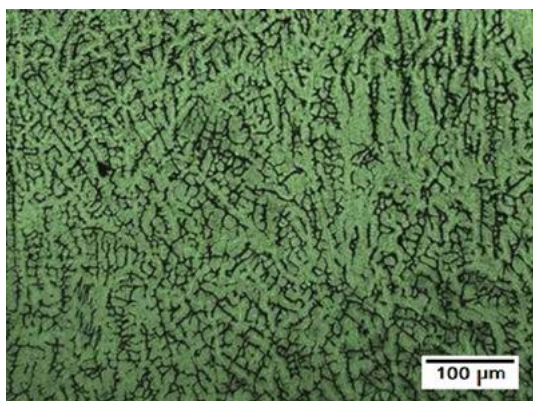
ریز ساختار فلز جوش حاصل از انجماد فلز پرکننده‌ی ER309 با نتایج تحقیقات دیوید تطابق دارد [۳۰]. مورفولوژی فریت در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی با ریز ساختار مشاهده شده در مطالعات گذشته مطابقت دارد [۳۱-۳۴].

با توجه به نتایج بدست آمده حاصل از فلز جوش، تنها تفاوت بین نمونه‌ها، مورفولوژی فریت می‌باشد. با توجه به یکسان بودن گرادیان دمایی در نمونه‌ها، با کاهش نرخ رشد، نسبت G/R افزایش یافته و مورفولوژی ساختار از حالت دندریتی هم‌محور به دندریتی ستونی تغییر پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل ۸-ز و ۸-ح مشخص است، ریزساختار فلز جوش حاصل از فلزات پرکننده‌ی ER310 و ER316 به ترتیب در اتصال هم‌جنس فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی AISI310 و AISI316 تفاوت چندانی با ریزساختار فلز جوش تشکیل شده در اتصال غیر هم‌جنس دو فلز پایه‌ی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI310 به AISI316 ندارد.

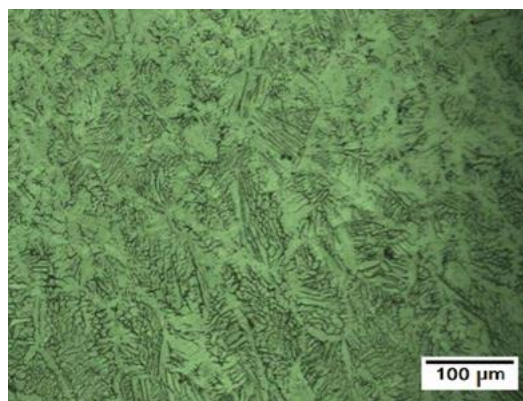
مطابق شکل ۸ مشاهده می‌شود در نمونه‌های جوشکاری شده با گاز محافظ مخلوط، مقدار فریت کمتر شده و شاخه‌های دندریتی تشکیل شده درشت‌تر شده است. در گاز مخلوط درصدی گاز اکسیژن وجود دارد که باعث افزایش دمای قوس و در نتیجه افزایش حرارت ورودی می‌شود که این امر مستقیماً روی ریز ساختار فلز جوش تاثیر می‌گذارد. با افزایش حرارت ورودی قوس، زمان انجماد افزایش می‌یابد که این امر باعث درشت شدن ساختارهای دندریتی در فلز جوش شده و می‌تواند تاثیر منفی بر مقاومت به ضربه داشته باشد. همچنین با افزایش حرارت ورودی قوس، مقدار فریت فلز جوش کاهش می‌یابد.

۴-۳-۴-آزمون کشش

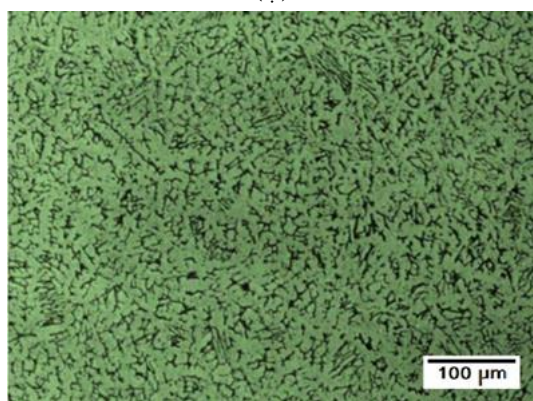
در شکل ۹ نمودار مقایسه‌ای استحکام کششی و در جدول ۳ مقادیر استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول و محل شکست نمونه‌های جوشکاری شده ارائه شده است.



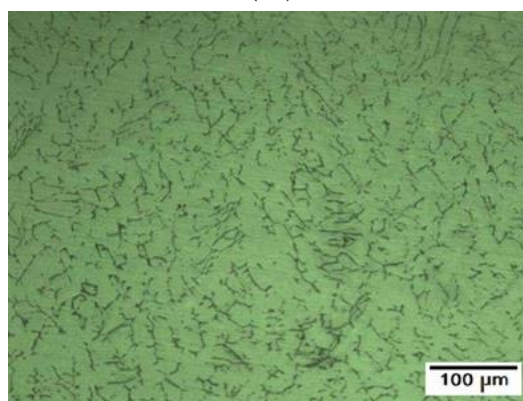
(ب)



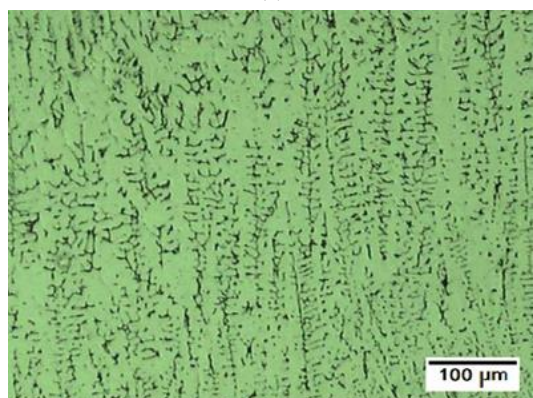
(الف)



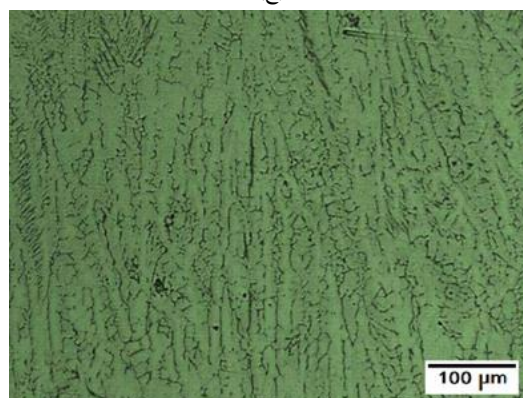
(د)



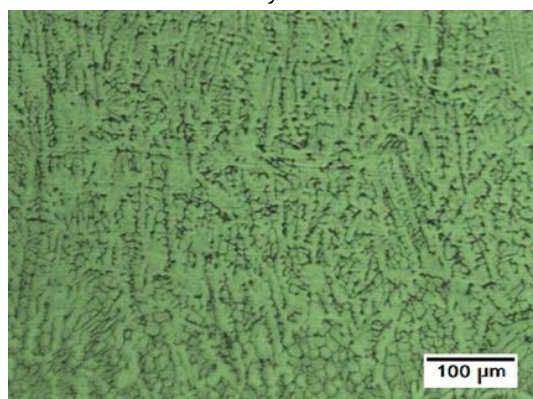
(ج)



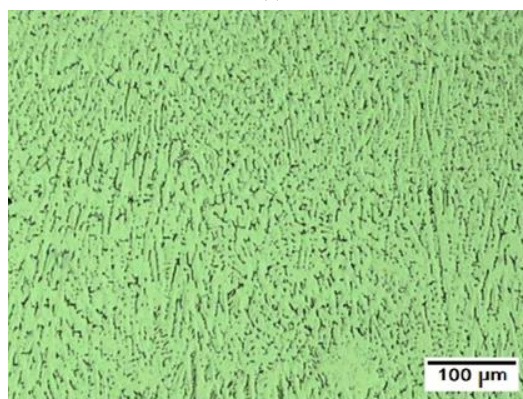
(و)



(ه)

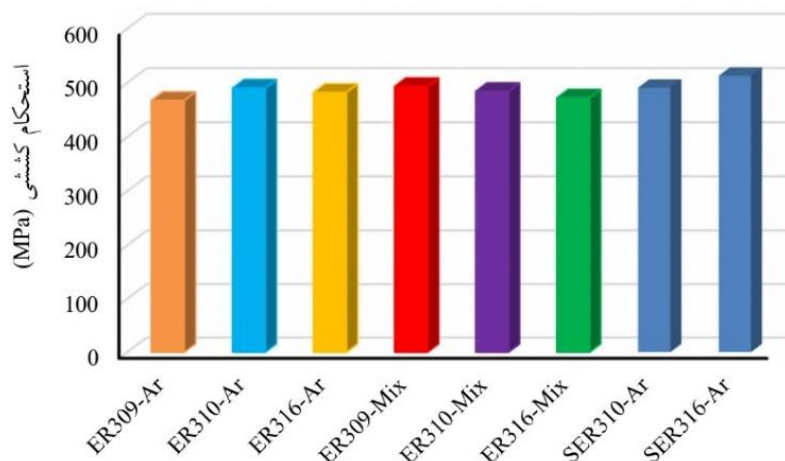


(ح)



(ز)

شکل ۸ ریزساختار فلز جوش در نمونه‌های الف) ER309-Ar، ب) ER309-Mix، ج) ER310-Ar، د) ER10-Mix، ه) ER316-Ar، و) ER16-Mix، ز) ER316-Ar، ج) ER310-Ar.



شکل ۹ نتایج آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری شده

جدول ۳ مقادیر استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول و محل شکست نمونه‌های جوشکاری شده

شماره نمونه	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (%)	محل شکست
AISI 310	550	240	40	—
AISI 316	520	225	40	—
ER309-Ar	467	168	35	HAZ سمت فلز پایه A310
ER310-Ar	490	187	38	فلز پایه A316
ER316-Ar	482	183	38.5	فلز پایه A316
ER309-Mix	493	193	37.5	فلز پایه A316
ER310-Mix	484	188	38	فلز پایه A316
ER316-Mix	472	174	33.5	HAZ سمت فلز پایه A310
SER310-Ar	492	194	39	HAZ
SER316-Ar	500	189	38.5	HAZ

همانطور که مشاهده می‌شود استحکام کششی نمونه‌های ER310-Ar, ER309-Ar, ER316-Ar, ER310-Mix, ER309-Mix, ER316-Mix و SER316-Ar و SER310-Ar به ترتیب برابر با ۴۶۷، ۴۹۰، ۴۸۲، ۴۹۳، ۴۸۴، ۴۷۲، ۴۹۲ و ۵۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. مشاهده می‌شود که بیشترین استحکام کششی فلز جوش مربوط به نمونه‌ی جوشکاری شده هم‌جنس فولاد ۳۱۶ با استفاده فلز پرکننده‌ی ER316 (۵۰۰ مگاپاسکال) است و در دو نمونه‌ی جوشکاری شده با ورق‌های هم‌جنس شکست از ناحیه‌ی HAZ رخ داده است که ناشی از درشت شدن دانه‌های آستنیت در این ناحیه نسبت به فلز پایه است. در فلز جوش نیز به دلیل حضور فریت اسکلتی، استحکام افزایش یافته و شکستی در جوش مشاهده نشد. در تمامی نمونه‌ها فلز جوش دچار شکست نشد که دلیل این امر حضور فریت اسکلتی هم‌محور و در برخی نمونه‌ها به صورت ستونی، می‌باشد. در نمونه‌های جوشکاری شده با گاز مخلوط، به دلیل افزایش حرارت قوس و رشد بازوهای فریت دندریتی، استحکام نسبت به نمونه‌های جوشکاری شده با گاز آرگون افزایش یافته است که این امر منطقی به نظر می‌رسد.

در شکل ۱۰ تصاویر نمونه‌های جوشکاری شده پس از آزمون کشش مشاهده می‌شود. مطابق این شکل شکست در تمام نمونه‌ها از سمت فولاد ۳۱۶ اتفاق افتاده است. در نمونه‌های ER316-Mix و ER309-Ar شکست از منطقه متأثر از حرارت اتفاق افتاد. با افزایش حرارت ورودی در واحد طول نمونه‌های جوشکاری، متوسط اندازه دانه در ناحیه HAZ افزایش می‌یابد [۳۵]. این مساله را این‌گونه می‌توان توجیه کرد که یکی از پارامترهای موثر در رشد دانه دما است. بنابراین با افزایش دما نیروی محرکه لازم برای عبور از سد انرژی اکتیواسیون برای رشد دانه، تامین شده و در نتیجه مرز دانه‌ها در نمونه مهاجرت می‌کنند و تعداد کل دانه‌ها کاهش پیدا می‌کنند و بدین ترتیب متوسط اندازه دانه‌ها زیاد می‌شود. از طرفی وقتی که میزان حرارت ورودی در واحد طول نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند،

مدت زمانی که یک نقطه مشخص در یک نمونه در دمای بالا، مثلاً T قرار می‌گیرد نسبت به شرایطی که میزان حرارت ورودی در واحد طول نمونه کم است، افزایش پیدا می‌کند. بنابراین دومین عامل مهم برای رشد دانه که زمان می‌باشد نیز تأمین شده و این دو عامل مهم برای رشد دانه موجب افزایش اندازه دانه متوسط با افزایش میزان حرارت ورودی می‌گردند. از طرفی با نزدیک شدن به مرز ذوب، پیک دمایی بیشتر شده و ماده مورد نظر، مدت زمان طولانی‌تری در دمای بالا باقی می‌ماند. بنابراین با نزدیک شدن به مرز ذوب، متوسط اندازه دانه در ناحیه HAZ افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰ نمونه‌های آزمون کشش پس از آزمون

همچنین طبق اثر هال-پچ یا استحکام بخشی مرزدانه‌ای، می‌دانیم که با افزایش اندازه دانه‌ها، تنش تسلیم کاهش می‌یابد چراکه مرز دانه‌ها مانع حرکت نابجایی‌ها می‌شوند و همچنین تعداد نابجایی‌های درون یک دانه در به وجود آمدن تنش تأثیر گذارند. بنابراین تغییر اندازه دانه بر تجمع نابجایی‌های درون دانه و در نتیجه استحکام تسلیم تأثیر می‌گذارد. در چهار نمونه‌ی دیگر (ER310-Ar، ER316-Ar، ER309-Mix و ER310-Mix) شکست در منطقه‌ی فلز پایه فولاد ۳۱۶ رخ داده است که حاکی از ضعیف بودن این منطقه نسبت به نواحی دیگر اتصال (فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت) می‌باشد.

۳-۵- آزمون ریزسختی سنجی

در این بخش به بررسی تغییرات ریزسختی در مناطق مختلف جوش (فلزات پایه، فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت) و تأثیر نوع گاز محافظ و فلز پرکننده بر سختی این مناطق پرداخته می‌شود. نتایج آزمون سختی سنجی نمونه‌های جوشکاری شده با گاز آرگون در شکل ۱۱-الف و نتایج آزمون سختی سنجی تمام نمونه‌ها در شکل ۱۱-ب ارائه شده است.

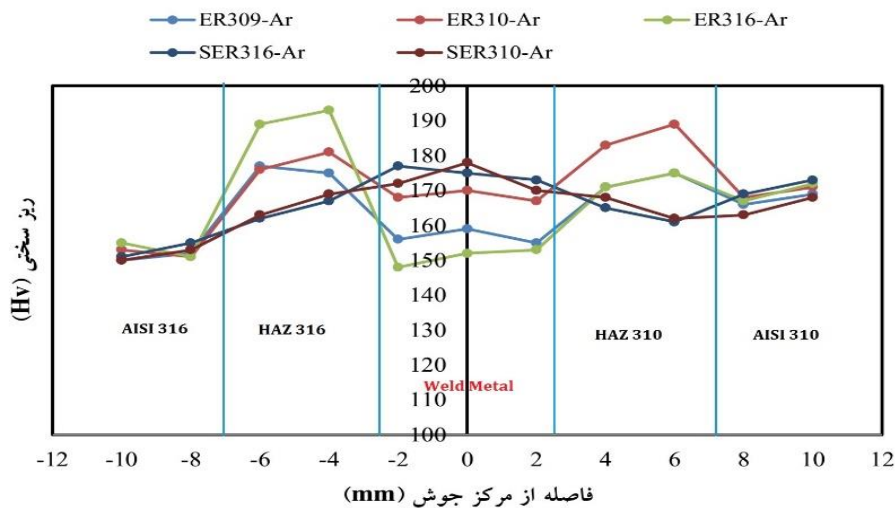
همان‌طور که مشاهده می‌شود ریزسختی در فلزات پایه‌ی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A310 و A316 به ترتیب برابر ۱۶۹ ویکرز و ۱۵۱ ویکرز به دست آمده است. علت اختلاف در نتایج سختی فلزات پایه را می‌توان به حضور ناچیز فریت دلتا در ریزساختار فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A316 نسبت داد [۳۶]. فریت یک فاز سخت نسبت به فاز آستنیت می‌باشد که باعث افزایش سختی در فلز پایه‌ی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A316 نسبت به فلز پایه‌ی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی A310 شده است.

با توجه به شکل ۱۱-الف ریز سختی در فلز جوش نمونه‌های ER309-Ar، ER310-Ar و ER316-Ar که با استفاده از گاز محافظ آرگون جوشکاری شده اند، به ترتیب برابر ۱۵۹ ویکرز، ۱۷۰ ویکرز و ۱۵۲ ویکرز به دست آمده است که بیشترین ریز سختی در این ناحیه در نمونه ER310-Ar به دست آمده است.

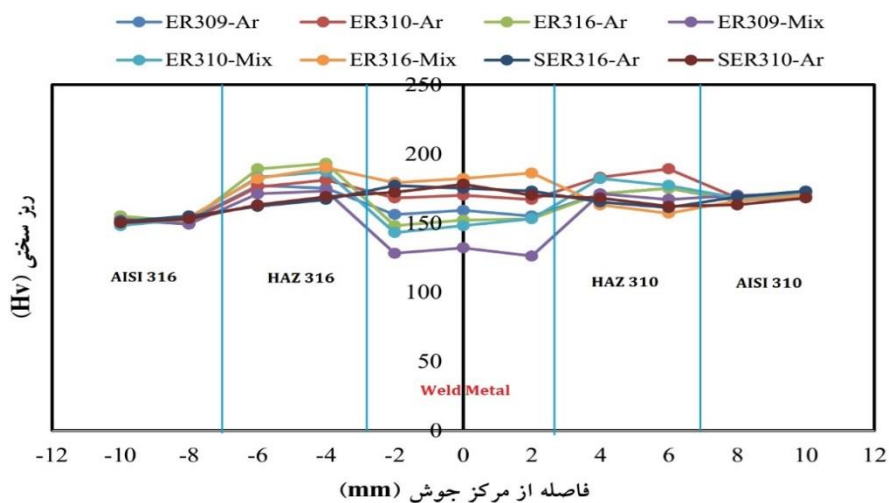
میزان سختی در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ارتباط مستقیمی با ریز ساختار دارد و با توجه به حضور فریت با مورفولوژی‌های متفاوت و زمینه‌ی آستنیت، می‌توان تفاوت سختی در منطقه فلز جوش را توجیه کرد. با توجه به نتایج حاصله مشاهده می‌شود که اختلاف چندانی بین دو نمونه‌ی ER309 و ER316 وجود ندارد که با توجه به ریز ساختار مشابه در فلز جوش این دو نمونه که به‌صورت فریت اسکلتی و زمینه‌ی آستنیتی است، قابل توجیه می‌باشد.

در شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود ریز سختی در فلز جوش نمونه‌های ER309-Mix، ER310-Mix و ER316-Mix که با استفاده از گاز محافظ مخلوط آرگون و کربن دی اکسید جوشکاری شده‌اند، به ترتیب برابر ۱۱۱ ویکرز، ۱۴۸ ویکرز و ۱۸۲ ویکرز به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که سختی حاصل از نمونه‌ی ER316-Mix نسبت به دو نمونه‌ی دیگر بیشتر است.

طبق نتایج به دست آمده استفاده از گاز محافظ مخلوط باعث افت سختی در نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از فلزات پرکننده‌ی ER310 و ER309 می‌شود که این افت سختی به ترتیب برابر ۳۰ درصد و ۱۳ درصد می‌باشد. دلیل آن را می‌توان به ریزتر شدن بازوهای فریت دندردیتی در زمینه‌ی آستنیت و کاهش درصد فریت دلتا در فلز جوش نسبت داد. اما این روند برای فلز جوش نمونه‌ی جوشکاری شده با استفاده از فلز پرکننده‌ی ER316 متفاوت است و سختی در نمونه‌ی جوشکاری شده با گاز محافظ مخلوط نسبت به نمونه‌ی جوشکاری شده با گاز محافظ آرگون از مقدار ۱۵۲ ویکرز به ۱۸۲ ویکرز افزایش یافته است. مشاهده می‌شود که سختی به میزان تقریباً ۲۰٪ افزایش یافته است که با توجه به ریز ساختار ستونی در این نمونه، این امر قابل توجیه است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱ نتایج سختی سنجی ویکرز (الف) برای نمونه‌های جوشکاری شده با گاز محافظ آرگون، (ب) برای تمام نمونه‌ها

همان‌طور که در شکل ۱۱-ب مشاهده می‌شود ریز سختی در ناحیه متأثر از حرارت در سمت فولاد زنگ نزن A316 برای نمونه های ER309-AR، ER310-Ar، ER316-AR، ER309-Mix، ER310-Mix و ER316-Mix به ترتیب برابر ۱۷۸، ۱۸۲، ۱۹۴، ۱۷۲، ۱۸۶ و ۱۹۲ ویکرز است. طبق این نتایج، در این ناحیه سختی نسبت به فلز پایه‌ی فولاد A316 افزایش یافته است. با عبور از فلز پایه و نزدیک شدن به ناحیه‌ی جوش، حرارت منطقه‌ی جوش بر این ناحیه تاثیر گذاشته و باعث افزایش فریت اسکلتی و افزایش سختی می‌شود. اختلاف سختی بین نمونه‌ها چشم‌گیر نیست که این امر ناشی از حرارت ورودی یکسان به تمامی نمونه‌ها در حین فرایند جوشکاری است.

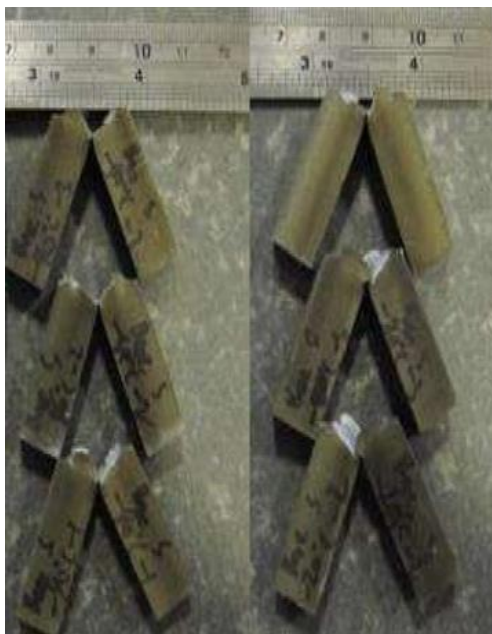
نتایج آزمون سختی سنجی ویکرز منطقه متأثر از حرارت در سمت فولاد A310 برای نمونه های مختلف، نشان می‌دهد که در این ناحیه نیز همانند منطقه‌ی متأثر از حرارت سمت فولاد A316، سختی نسبت به فلز پایه افزایش یافته است که دلیل آن افزایش فریت ناشی از حرارت منطقه جوش می‌باشد. علاوه بر این، افزایش سختی در این ناحیه را می‌توان به رشد اپی تکسیال در فصل مشترک فلز جوش و منطقه‌ی متأثر از حرارت نسبت داد.

نتایج نشان می‌دهد که تشکیل فاز فریت در فلز جوش با مورفولوژی اسکلتی، به‌عنوان یک عامل استحکام دهنده‌ی ثانویه عمل می‌کند و باعث افزایش سختی و استحکام جوش نسبت به نمونه‌های آستنیتی می‌شود.

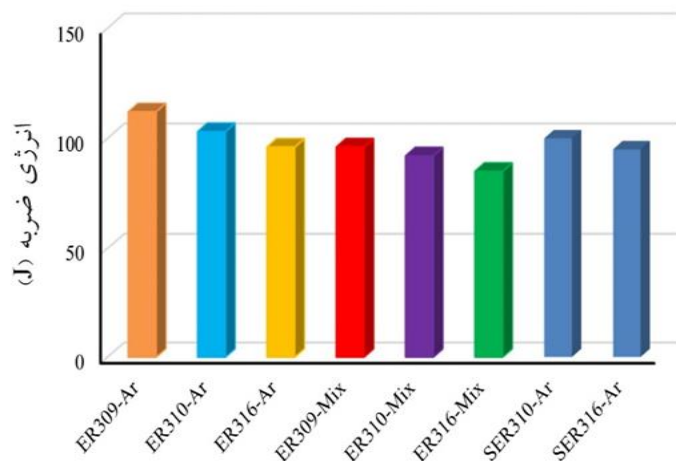
لازم به یادآوری است که در نمونه‌های SER310-AR و SER316-AR فلزات هم‌جنس ۳۱۰ و ۳۱۶ جوشکاری شده‌اند که جهت مقایسه با نمونه‌های جوش غیرمشابه، نتایج سختی سنجی این دو نمونه نیز در نمودارهای شکل ۱۳ ارائه شده است.

۳-۶- آزمون ضربه شاری

نتایج آزمون ضربه برای نمونه‌های جوشکاری شده در شکل ۱۲-الف و تصاویر نمونه‌ها پس از آزمون ضربه در شکل ۱۲-ب ارائه شده است. با توجه به ساختار فریتی-آستنیتی نمونه‌ها و شباهت ریزساختار این نمونه‌ها و حضور تقریباً یکسان فریت در ریز ساختار فلز جوش نمونه‌های جوشکاری، شده این اختلاف کم در انرژی ضربه قابل توجیه می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲ الف) نمودار میزان انرژی جذب شده توسط آزمون ضربه، ب) نمونه‌ها پس از آزمون ضربه

مشاهده می‌شود که انرژی ضربه برای نمونه های جوشکاری شده با استفاده از گاز آرگون نسبت به انرژی ضربه نمونه‌های جوشکاری شده با گاز محافظ مخلوط بیشتر است. ریزساختار در نمونه های جوشکاری شده با گاز محافظ آرگون ریزتر است چون با

افزایش اکسیژن در گاز محافظ، دمای قوس افزایش می‌یابد و این امر مستقیماً روی ریز ساختار فلز جوش تاثیر می‌گذارد. با افزایش حرارت ورودی قوس، زمان انجماد افزایش یافته و باعث درشت شدن ساختارهای دندریتی در فلز جوش می‌شود و می‌تواند تاثیر منفی بر مقاومت به ضربه داشته باشد. همچنین افزایش حرارت ورودی باعث کاهش مقدار فریت در فلز جوش می‌شود. بررسی سطح شکست نمونه‌ها نشان داد که ریز ساختار در تمامی نمونه‌ها یکسان و از نوع فریتی آستنیتی با مورفولوژی فریت دندریتی بوده و شکست در تمامی نمونه‌ها از نوع نیمه نرم می‌باشد؛ زیرا علاوه بر وجود حفرات، صفحات کلیواژ یا تفرقی در آن مشاهده می‌شود که ناشی از شکست نیمه نرم می‌باشد. فریت فازی سخت است که در زمینه‌ی فاز آستنیت که یک فاز نرم است قرار گرفته است. با توجه به حضور فریت، شکست ترد در برخی از مناطق شکست انتظار می‌رفت.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر گاز محافظ و فلز پرکننده بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر همجنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI310 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI316 بررسی شد. از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان پالسی (PCGTAW) و سه فلز پرکننده‌ی ER309L، ER310 و ER316L برای اتصال نمونه‌ها استفاده شد. مهم‌ترین دست‌آوردهای این پژوهش عبارتند از:

- انجماد در فلز جوش در در تمامی نمونه‌های جوشکاری شده از نوع FA و به‌صورت فریت اسکلتی با زمینه آستنیتی بود و تنها تفاوت بین ریز ساختار نمونه‌ها در مورفولوژی فریت تشکیل شده بود که در نمونه‌های جوشکاری شده با فلز پرکننده‌ی ER316 از نوع فریت اسکلتی ستونی و در مابقی نمونه‌ها بصورت فریت اسکلتی هم محور مشاهده شد.
- در منطقه متاثر از حرارت در تمامی نمونه‌ها به دلیل حرارت حوضچه جوش، دانه‌های آستنیت رشد کرده و فریت در این ناحیه نسبت به فلز پایه افزایش یافت. همچنین فریت دندریتی فلز جوش در ادامه مرز دانه‌های فلز پایه رشد کرده که نشان از رشد اپی تکسیال در این ناحیه در تمامی نمونه‌ها دارد.
- در نمونه‌های جوشکاری شده با گاز مخلوط، حرارت قوس بیشتر از نمونه‌های جوشکاری با گاز آرگون است که این امر باعث افزایش حرارت ورودی و در نتیجه درشت دانه‌تر شده فاز فریت می‌شود.
- در آزمون کشش، نمونه‌های ER316-Ar، ER310-Ar، ER309-Mix و ER310-Mix از منطقه‌ی فلز پایه‌ی A316 دچار شکست شدند ولی در نمونه‌های ER309-Ar و ER316-Mix شکست از ناحیه‌ی HAZ اتفاق افتاد که نشان از استحکام بالای جوش در اتصال تمامی نمونه‌ها دارد.
- انرژی ضربه در نمونه‌های جوشکاری شده با گاز مخلوط کاهش یافته است که ناشی از درشت‌تر شدن بازوهای دندریتی می‌باشد.
- نتایج نشان داد که در بین نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از گازهای محافظ مختلف (آرگون و مخلوط آرگون + کربن دی اکسید) و فلزات پرکننده‌ی متفاوت ER309، ER310 و ER316، اتصال غیرهمجنس فولادهای زنگ‌نزن ۳۱۰ و ۳۱۶ نسبت به اتصال همجنس این فولادها ضعیف‌تر می‌باشد، بنابراین با استناد به نتایج مقاله، استفاده از اتصال همجنس فولادهای زنگ‌نزن ۳۱۰ و ۳۱۶ به‌جای اتصال غیر همجنس این فولادها توصیه می‌شود.

References

- [1] Sabzi M, Anijdan SM, Chalandar AB, Park N, Jafarian HR, Eivani AR. An experimental investigation on the effect of gas tungsten arc welding current modes upon the microstructure, mechanical, and fractography properties of welded joints of two grades of AISI 316L and AISI310S alloy metal sheets. *Materials Science and Engineering: A*. 2022 Apr 18;840:142877. doi: 10.1016/j.msea.2022.142877
- [2] Sabzi M, Anijdan SM, Eivani AR, Park N, Jafarian HR. The effect of pulse current changes in PCGTAW on microstructural evolution, drastic improvement in mechanical properties, and fracture mode of dissimilar welded joint of AISI 316L-AISI 310S stainless steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2021 Aug 17;823:141700. doi: 10.1016/j.msea.2021.141700

- [3] Borgioli F, Galvanetto E, Bacci T. Low temperature nitriding of AISI 300 and 200 series austenitic stainless steels. *Vacuum*. 2016 May 1;127:51-60. doi: [10.1016/j.vacuum.2016.02.009](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.02.009)
- [4] Lai JK, Shek CH, Lo KH, editors. *Stainless steels: An introduction and their recent developments*. Bentham Science Publishers; 2012. doi: [10.2174/97816080530561120101](https://doi.org/10.2174/97816080530561120101)
- [5] Kah P, Shrestha M, Martikainen J. Trends in joining dissimilar metals by welding. *Applied Mechanics and Materials*. 2014 Jan 6;440:269-76. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.440.269](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.440.269)
- [6] Echezona N, Akinlabi SA, Jen TC, Fatoba OS, Hassan S, Akinlabi ET. Tig welding of dissimilar steel: a review. *Advances in Material Science and Engineering: Selected articles from ICMMPPE 2020*. 2021:1-9. doi: [10.1007/978-981-16-3641-7_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3641-7_1)
- [7] Sayed AR, Kumbhare YV, Ingole NG, Dhengale PT, Dhanorkar NR. A review study of dissimilar metal welds of stainless steel and mild steel by TIG welding process. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol*. 2019;7:370-3. doi: [10.22214/ijraset.2019.2044](https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.2044)
- [8] Arivazhagan N, Singh S, Prakash S, Reddy GM. Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding. *Materials & Design*. 2011 May 1;32(5):3036-50. doi: [10.1016/j.matdes.2011.01.037](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.037)
- [9] Charkhi M, Faghani G, Akbari D, Shalvandi M. Application of pre-heating in the reduction of distortion in the dissimilar joints welding SS type 304 and carbon steel A106-B. [in Persian]
- [10] Łabanowski J. Stress corrosion cracking susceptibility of dissimilar stainless steels welded joints. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007 Jan;20(1-2):255-8.
- [11] Banooei HR, Farahani MR. Experimental investigating the effect of heat input on the strength of dissimilar welded joints of IN 713LC and AISI 4140 by electron beam welding method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Nov;9(9):45-54. doi: [10.22034/ijme.2023.377707.1730](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.377707.1730) [In Persian]
- [12] Mirkarimi SH, Ranjbar K, Roshani M, Dehmollaei R. Evaluating the microstructure and mechanical properties of dissimilar welding between austenitic stainless steel A240-TP. 316 and ferritic low alloy steel A387-Gr. 11. *Journal Of Metallurgical and Materials Engineering*. 2016 Feb 20;27(1):23-38. doi: [10.22067/ma.v27i1.23535](https://doi.org/10.22067/ma.v27i1.23535)
- [13] Asadi P, Alimohammadi S, Kohantorabi O, Soleymani A, Fazli A. Numerical investigation on the effect of welding speed and heat input on the residual stress of multi-pass TIG welded stainless steel pipe. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2021 May;235(6-7):1007-21. doi: [10.1177/0954405420981335](https://doi.org/10.1177/0954405420981335)
- [14] Mishra RR. A study of tensile strength of MIG and TIG welded dissimilar joints of mild and stainless steel. *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering*. 2014;3:23-32. doi: [10.14810/ijamse.2014.3203](https://doi.org/10.14810/ijamse.2014.3203)
- [15] Asadi P, Alimohammadi S, Kohantorabi O, Fazli A, Akbari M. Effects of material type, preheating and weld pass number on residual stress of welded steel pipes by multi-pass TIG welding (C-Mn, SUS304, SUS316). *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020 May 1;16:100462. doi: [10.1016/j.tsep.2019.100462](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100462)
- [16] Mortezaie A, Shamanian M. An assessment of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welds between Inconel 718 and 310S austenitic stainless steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2014 Apr 1;116:37-46. doi: [10.1016/j.ijpvp.2014.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2014.01.002)
- [17] Kotari S, Punna E, Gangadhar SM, Cheepu M, Sarkar P, Venukumar S. Dissimilar metals TIG welding-brazing of AZ31 magnesium alloy to 304 stainless steel. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;39:1549-52. doi: [10.1016/j.matpr.2020.05.553](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.553)
- [18] Mutaşcu D, Mitelea I, Bordeasu I, Burcă M, Uțu ID. Hardfacing of X2CrNiMoN22-5-3 duplex stainless steel with stellite alloy using pulsed TIG welding process. *Materials Today: Proceedings*. 2021 Jan 1;45:4112-6. doi: [10.1016/j.matpr.2020.11.662](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.662)
- [19] Hajiannia I, Shamanian M, Kasiri M. Microstructure and mechanical properties of AISI 347 stainless steel/A335 low alloy steel dissimilar joint produced by gas tungsten arc welding. *Materials & design*. 2013 Sep 1;50:566-73. doi: [10.1016/j.matdes.2013.03.029](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.029)
- [20] Lincolnelectric.com. Welders, Welding Wire, Welding Equipment, Accessories and Gear. Prevent Arc Blow [Internet]. Clair Avenue Cleveland OH 44117:2024.
- [21] Stenbacka N. On arc efficiency in gas tungsten arc welding. *Soldagem & Inspeção*. 2013;18:380-90. doi: [10.1590/S0104-92242013000400010](https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000400010)
- [22] ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [23] ASTM E92-82 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.
- [24] ASTM E23-00 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

- [25] Shayanfar P, Shamanian M. Dissimilar welding of ASTM 517A quench-temper steel to stainless steel and the effect of welding parameters optimization on microstructure. *Journal of Advanced Processes in Materials Engineering*. 2013;8(3):75-89. [In Persian]
- [26] Naffakh H, Shamanian M, Ashrafizadeh F. Microstructural evolutions in dissimilar welds between AISI 310 austenitic stainless steel and Inconel 657. *Journal of materials science*. 2010 May;45:2564-73. doi: [10.1007/s10853-010-4227-8](https://doi.org/10.1007/s10853-010-4227-8)
- [27] Sadeghi B, Sharifi H, Rafiei M. Evaluation of dissimilar joint properties of A321 austenitic stainless steel to A537CL1 carbon steel by GTAW process. *Journal of Welding Science and Technology of Iran*. 2017;3(1):10-20. [In Persian]
- [28] Sindhu Kou. *Welding Metallurgy*. 2nd ed. Isfahan University of Technology; 2006. [In Persian]
- [29] Lippold JC, Kotecki DJ. *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Isfahan University of Technology; 2009. [In Persian]
- [30] David SA. Ferrite morphology and variations in ferrite content in austenitic stainless steel welds. Oak Ridge National Lab., TN; 1981 Apr 1.
- [31] Steels A. *Stainless steel grade datasheets*. Atlas Steels Technical Department: Melbourne, Australia. 2013 Aug.
- [32] Brooks JA, Thompson AW. Microstructural development and solidification cracking susceptibility of austenitic stainless steel welds. *International Materials Reviews*. 1991 Jan 1;36(1):16-44. doi: [10.1179/imr.1991.36.1.16](https://doi.org/10.1179/imr.1991.36.1.16)
- [33] Farrar RA, Huelin C, Thomas RG. Phase transformation and impact properties of type 17-8-2 austenitic weld metals. *Journal of materials science*. 1985 Aug;20:2828-38. doi: [10.1007/BF00553045](https://doi.org/10.1007/BF00553045)
- [34] Farrar RA. Microstructure and phase transformations in duplex 316 submerged arc weld metal, an ageing study at 700 C. *Journal of Materials Science*. 1985 Nov;20:4215-31.
- [35] Mahmoudian A, Yaghoobinezhad Y. Simulation of Heat Affected Zone (HAZ) microstructure and temperature profile in welding of 316 stainless steel by GTAW method. *Advanced Processes in Materials*. 2009;2(7):15-25.
- [36] Ammari Allahyari A, Farhangi H, Hadavi SMM. Investigating the effect of isothermal aging on the microstructure, mechanical properties and impact fracture behavior of 316L austenitic stainless steel weld metal. *Journal of Algorithms and Computation*. 2013;42(5):647-56. doi: [10.22059/jac.2013.7788](https://doi.org/10.22059/jac.2013.7788) [In Persian]