نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 2، پاییز و زمستان1397، صفحه 12-1

توسعه اتصالات ذوبی غیرمشابه فولاد 4130 به فولاد زنگ نزن آستنیتی 201 و بررسی اثر فلزات پرکننده مختلف با هدف دستیابی به خواص مکانیکی و مشخصه‌های ریزساختاری بهبود یافته با استفاده از روش قوسی تنگستن-گاز

محمد غلامی، حسین مستعان *، ***فردین نعمت زاده، علی سنبلی***

دانشکده فنی مهندسی،گروه مهندسی مواد ومتالورژی،دانشگاه اراک،اراک،ایران.

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۶ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶)

چکیده

در این پژوهش، جوشکاری غیرمشابه فولاد کم آلیاژ ۴۱۳۰ به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۲۰۱ به روش قوسی تنگستن-گاز مورد بررسی قرار گرفت.از چهار فلز پرکننده اینکونل ۸۲ (ERNiCr-3)، فولادهای زنگ نزن آستنیتی ER308L، ER309L و فولاد کم آلیاژ ER80S-B2 برای این منظور استفاده شد. پس از جوشکاری ریزساختار مناطق مختلف هر اتصال و همچنین سطح مقاطع شکست با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی خواص مکانیکی اتصال از آزمایش کشش استفاده شد. در آزمایش کشش، نمونه جوش داده شده با فلز پرکننده ERNiCr-3 از مرکز جوش دچار شکست شد و سایر فلزات پرکننده از فولاد پایه ۴۱۳۰ دچار شکست شدند که این امر به دلیل پایین بودن استحکام فولاد ۴۱۳۰ نسبت به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۲۰۱ بود. همچنین به دلیل تشکیل ترکیباتی از جمله NbC در ساختار مرکز جوش فلز پرکننده ERNiCr-3، این نمونه از مرکز جوش دچار شکست گردید. مشاهدات انجام شده توسط SEM نشان داد که در آزمایش کشش، شکست نمونه مربوط به فلز پرکننده ERNiCr-3 به صورت نیمه ترد است و سایر فلزات پرکننده به صورت نرم می‌شکنند. بررسی‌ها نشان داد فلز پرکننده ERNiCr-3 دارای ساختار کاملا آستنیتی و از دانه های هم محور تشکیل شده است و هیچ گونه ترکی در آن مشاهده نشد. فلزات پرکننده ER308L و ER309L دارای ریزساختار سلولی- دندریتی هستند؛ به دلیل وجود فاز فریت دلتا در نواحی بین دندریتی آستنیت زمینه هیچ گونه ترکی در این اتصال تشکیل نشد. ریزساختار فلز پرکننده ER80S-B2 به صورت صفحات مارتنزیت لایه ای بود. همچنین در این اتصال نیز هیچ گونه ترک انجمادی رخ نداد. پس از بررسی تمامی نتایج به‌دست آمده، سیم جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی ER308L به دلیل دارا بودن ساختاری با انعطاف پذیری بالاتر نسبت به نمونه جوشکاری شده توسط فلز پرکننده ER80S-B2 مناسب‌ترین پرکننده برای جوشکاری غیر مشابه فولاد زنگ نزن ۲۰۱ به فولاد کم آلیاژ ۴۱۳۰ تشخیص داده شد.

کلمات کلیدی: اتصال غیرمشابه، جوشکاری قوسی تنگستن-گاز، فولاد زنگ نزن آستنیتی۲۰۱، فولاد کم آلیاژ ۴۱۳۰، خواص مکانیکی، ریزساختار.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: hossein.mostaan@gmail.com

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

Development of dissimilar GTA 4130/201 SS weld joint and investigation on the effect of filler metals in order to obtain improved mechanical properties and microstructural features

M. Gholami, H. Mostaan*, F. Nematzadeh, A. Sonboli
Faculty of Engineering, Department of Materials and Metallurgical engineering. Arak University, Arak. Iran.

(Received 25 February 2018 ; Accepted 15 April 2018)

Abstract
In this research, gas tungsten arc welding of dissimilar joint between 4130 low alloy steel and AISI 201 austenitic stainless steel was investigated. Four filler metals i. e. ERNiCr-3, ER 309L, ER 308L and ER 80SB2 were used. After welding, microstructural features of various areas and also fracture surfaces were examined using optical microscopy and scanning electron microscopy. Tensile test was conducted in order to study the mechanical properties of each joint. It was found that ERNiCr-3 is fractured from fusion zone and the others were fractured from 4130 base metal. Also, some second phase particles such as NbC were seen in the ERNiCr-3 weld joint. SEM observation showed that the fracture behavior of ERNiCr-3 weld joint is semi brittle and the others are ductile. The fusion zone of ERNiCr-3 weld joint was fully austenitic and consisted of equiaxed grains and no crack was seen in this area. The fusion zone of ER 308L and ER 309L were composed from cellular dendrite and finally ER 80S-B2 weld joint was consisted of lath martensite.

Keywords: Dissimilar joints, Gas tungsten arc welding, AISI 201 austenitic stainless steel, AISI 4130 low alloy steel, Mechanical properties, Microstructure.

1- مقدمه
فولاد AISI ۴۱۳۰ یک فولاد کم آلیاژ با استحکام بالا و قابلیت عملیات حرارتی است. این فولاد دارای میزان کربن متوسط بوده و دارای عناصر آلیاژی همچون کروم، مولیبدن، منگنز و عناصر دیگر است [۱و ۲]. کاربرد این فولاد در صنایع نفت و نیروگاه‌های برق است. همچنین به علت مقاوم بودن در مقابل اکسید شدن و استحکام بسیار خوب در درجه حرارت بالا، در انواع مولدها و مبدل‌های حرارتی کاربرد دارد. این فولاد در مخازن تحت فشار در صنایع پتروشیمی نیز استفاده می‌شود. این گروه فولادها بصورت نرماله، تمپر شده و کوئنچ – تمپر شده استفاده می‌شوند. کروم در فولاد، مقاومت به خوردگی و مولیبدن استحکام در درجه حرارت‌های بالا را افزایش می‌دهد[۳– ۵].

فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۲۰۱ ترکیب شیمیایی مشابه با فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۱ دارد، با این تفاوت که درصد نیکل کم‌تری نسبت به نوع ۳۰۱ دارد و برای پایدار کردن آستنیت آن از درصد بیشتری Mn و N استفاده شده است. فولادهای زنگ‌نزن سری ۲۰۰ بدلیل مقادیر پایین تر نیکل نسبت به فولادهای زنگ نزن سری ۳۰۰ قیمت پایین تری نیز دارند. فولاد زنگ نزن ۲۰۱، در جاهایی که استحکام زیاد و شکل‌پذیری زیاد لازم است، واگن‌ها، بدنه بارکش‌ها، بدنه هواپیما، اتصالات، مخازن و قالپاق‌ها کاربرد دارد [۶و ۷].

اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ‌نزن به فولادهای کم‌آلیاژ با استحکام بالا در صنایع مختلفی مانند نفت، گاز، پتروشیمی، نیروگاه‌های حرارتی و صنایع غذایی دارای کاربردهای فراوان است. در اکثر صنایع ذکر شده خطوط لوله انتقال دهنده سیالات و نازل‌ها، مخازن و قسمت‌های تحت فشار سیستم از جنس فولاد کم آلیاژ ساخته می‌شود. اتصال این اجزاء به روش جوشکاری انجام می‌شود و یکی از مهمترین اتصالات موجود در این صنایع است [۳،۴و۶].

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

باتوجه به کاربرد گسترده فولادهای کم آلیاژ و فولادهای زنگ‌نزن در صنایع مختلف و نیاز فراوان به اتصال این دو نوع فولاد به یکدیگر، توسعه و بهینه‌سازی خواص این اتصال همواره مورد توجه بوده است. در گذشته پژوهش‌هایی در مورد کاربرد فلزهای پرکننده مختلف در اتصال این نوع فولادها ارائه شده است.

پورکبیریان و همکارانش [۹] به ارزیابی تاثیر فلز پرکننده بر خواص اتصال غیرمشابه فولاد کم‌آلیاژ ۴۱۳۰ به فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۱۶L با استفاده از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز[1](GTAW) پرداختند. در این بررسی خواص اتصال دو فلز پرکننده ERNiCr-3 و ER309L بررسی شد. نتایج نشان داد فلز پر کننده ER309L ازفولاد پایه ۳۱۶L دچار شکست می‌شود، اما نمونه جوش داده شده با سیم جوش ERNiCr-3 از محل جوش می‌شکند. همچنین بررسی‌ها نشان‌دهنده وجود ساختار دندریتی در فلز جوش ERNiCr-3 و ساختار سلولی –دندریتی به همراه فاز فریت دلتا برای سیم جوش ER309L بود. در پایان برای جوشکاری غیرمشابه این دو فولاد سیم جوش ER309L پیشنهاد شد. فراهانی و همکارانش [۱۰] به بررسی اتصال غیرمشابه اینکونل ۶۱۷ به فولاد زنگ نزنH ۳۰۴ به روش قوسی تنگستن-گاز پرداختند. در این پژوهش آنها از سه فلز پرکننده اینکونل۸۲ (ERNiCr-3)، اینکونل ۶۱۷ (ERNiCrCoMo1) و فولاد زنگ نزن ۳۱۰ (ER310) استفاده کردند. نتایج پژوهش نشان داد فلز پرکننده اینکونل ۶۱۷ دارای بیشترین انرژی ضربه و فلز پرکننده ۳۱۰ کمترین انرژی ضربه را دارا هستند. همچنین با بررسی نتایج حاصل از متالوگرافی قطعات مشخص شد بهترین فلز پرکننده برای این اتصال اینکونل ۶۱۷ است.

شایان‌فر و شمعانیان [۱۱] به بررسی جوشکاری غیرمشابه فولاد کوئنچ-تمپر ASTM A517 به فولاد زنگ نزن AISI316L و تأثیر بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری بر ریزساختار پرداختند. بدین منظور از دو روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز با جریان پیوسته و جریان پالسی به همراه فلز پرکننده ER309MoL استفاده شد. نتایج نشان داد اندازه دانه منطقه متأثر از حرارت در روش پالسی نسبت روش پیوسته کم‌تر است. ساختار فلز جوش کاملا آستنیتی بود و در روش پالسی ساختار ریزتری به دست آمد. همچنین بررسی‌ها نشان داد میزان رقت در روش پالسی کم‌تر است. انرژی ضربه در هر سه منطقه فلز جوش و مناطق متاثر از حرارت در روش پالسی افزایش یافت. شکست در فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت فولاد ۳۱۶L از نوع کاملا نرم بود و در منطقه متاثر از حرارت A۵۱۷ از نوع نیمه ترد رخ داد. درمورد روش‌های مختلف جوشکاری این دو نوع فولاد نیز در گذشته بررسی‌هایی صورت گرفته است. آریواژگان و همکارانش [۳] به بررسی خواص اتصال فولادهای AISI 4140 و AISI 304 توسط روشGTAW، جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی و جوشکاری پرتو الکترونی[2] (EBW) پرداختند. نتایج نشان داد که اتصال به روش EBW دارای بیشترین استحکام کششی و GTAW روش دارای بیشترین مقاومت به ضربه می‌باشد.

بررسی کلی مراجع بالا نشان می‌دهد که تحقیقات قابل توجهی که درباره اتصال غیرمشابه فولادهای زنگ نزن آستنیتی به فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا انجام شده است، اطلاعات جامعی را درباره اینگونه اتصال‌ها به‌دست می‌دهد، ولی بررسی‌های خاص و متمرکزی در مورد اتصال غیرمشابه فولاد کم آلیاژ استحکام بالا ۴۱۳۰ به فولادزنگ نزن آستنیتی ۲۰۱ در دسترس نیست. لذا جوشکاری غیرمشابه فولاد کم‌آلیاژ استحکام بالا ۴۱۳۰ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۲۰۱ و ارزیابی خواص اتصال از اهداف اصلی این پژوهش است. نویسندگان بر این باورند که نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در بهره‌برداری بهینه از این آلیاژها در صنایع مختلف همچون نفت و گاز و پتروشیمی مفید واقع شود.

2- مواد و روش انجام آزمایش

2-1- مواد مصرفی

در این پژوهش از ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی با مشخصه

1-Gas tungsten arc welding

2-Electron beam welding

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

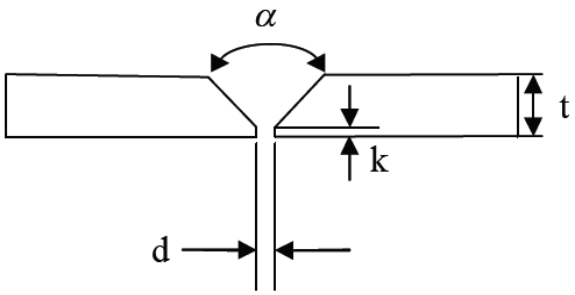
AISI 201(UNS S20100) وفولاد کم‌آلیاژ کروم–مولیبدن دار با مشخصه AISI 4130 (UNS G41300) به عنوان فلزات پایه استفاده شد. از آنالیز کوانتومتری به منظور تعیین دقیق ترکیب شیمیایی فلزات پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و فلزات پرکننده در جدول(۱) ارائه شده است. جهت اتصال فلزات پایه از چهار فلز پرکننده زیر استفاده شد:

- فلز پرکننده فولاد زنگ نزن ۳۰۸ (ER308L)
- فلز پرکننده فولاد زنگ نزن ۳۰۹ (ER309L)
- فلز پرکننده اینکونل ۸۲ (ERNiCr-3)
- فلز پرکننده فولاد کم‌آلیاژ (ER80S-B2)

در تمامی موارد از فلزات پرکننده با قطر ۱/۶ میلیمتر جهت پاس ریشه و در ادامه جهت رونشانی پاس بعدی استفاده شد. به منظور ارائه دقیق ترکیب شیمیایی سیم جوش‌های به کار گرفته شده، از اطلاعات درج شده توسط کارخانه سازنده استفاده گردید. در انتخاب فلزات پرکننده در این پژوهش علاوه بر ترکیب شیمیایی، پارامترهای دیگری مانند خواص مکانیکی، پایداری حرارتی، مقاومت به خوردگی، ضریب انبساط حرارتی، در دسترس بودن و هزینه ها مد نظر قرار گرفته است. بر همین اساس از استاندارد های AWS A5.9 و AWS A5.14 و مشخصات ارائه شده از طرف تولید کنندگان استفاده شد.

2-2- آماده‌سازی نمونه‌ها و طراحی اتصال

فلزات پایه مورد استفاده به حالت ورق و با ابعـاد ۵ ×۵۰ ×۲۰۰ میلیمتر مکعب با دستگاه فرز CNC بریده شدند. با توجه به ضخامت، جنس مواد و طرح اتصال پیشنهادی منابع، از طرح اتصال جناغی یک طرفه (V شکل) با زاویه پخ ۶۰ درجه، درز اتصال ۳ میلیمتر و پاشنه اتصال ۱ میلیمتر استفاده شد. آماده‌سازی‌های مورد نظر به وسیله ماشین فرزCNC با استفاده از خنک‌کننده آب وصابون جهت جلوگیری از تحول ریزساختاری نمونه‌ها، انجام شد. شکل(۱) نمایی از طرح اتصال را به همراه مشخصات آن نشان می‌دهد. جدول(۲) نیز مشخصات ابعادی طرح اتصال را نشان می‌دهد.



شکل ۱– طرح اتصال مورد استفاده و مشخصات

پس از پخ‌زنی، برای انجام عملیات جوشکاری سطوح اکسید منطقه جوش و اطراف آن توسط سنباده برداشته شد. آلودگی‌ها و چربی‌های احتمالی موجود در سطح قطعات توسط برس سیمی و سیم جوش‌ها توسط استون حذف شد.

2-3- فرایند جوشکاری نمونه‌ها

اتصال ورق‌ها با استفاده از سیم جوش‌های ER308L، ER309L،

جدول ۱– ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده بر اساس درصد وزنی

درصد عناصر	%Fe	%C	%Cr	%Ni	%Mn	%Si	%Mo	%S	%P	%N
AISI 201	پایه	۰/۱۵	۱۸–۱۶	۵/۵ –۳/۵	۷/۵ –۵/۵	۰/۵	–	۰/۳	۰/۶	۰/۲۵
AISI 4130	پایه	۰/۳۳–۰/۲۸	۱/۱ – ۰/۸	–	۰/۶ – ۰/۴	۰/۳ – ۰/۱۵	۰/۲	۰/۰۴	۰/۰۳۵	–
ER308L	پایه	۰/۰۳	۲۲ –۱۹/۵	۱۱ –۹	۲/۵ – ۱	۰/۶۵ – ۰/۳	۰/۷۵	۰/۰۳	۰/۰۳	–
ER309L	پایه	۰/۰۳	۲۵ -۲۳	۱۴ -۱۲	۲/۵ – ۱	۰/۶۵ – ۰/۳	۰/۷۵	۰/۰۳	۰/۰۳	–
ER80S-B2	پایه	۰/۱	۱/۵ – ۱/۲	۰/۲	۰/۷ – ۰/۴	۰/۷ – ۰/۴	۰/۶۵ – ۰/۴	۰/۰۲	۰/۰۲	–
ERNi-Cr3	۳	۰/۱	۲۲ –۱۸	پایه	۳/۵ –۲/۵	۰/۵	–	/۰۱۵	۰/۰۳	–

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول۲- مشخصات ابعادی طرح اتصال

ضخامت ورق(t)	پاشنه اتصال (k)	درز اتصال (d)	زاویه پخ (α)
۵ میلیمتر	۱ میلیمتر	۳ میلیمتر	۶۰ درجه

جدول ۳- پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش

نوع فیلر مصرفی	308L	NiCr-3	309L	80S-B2
زاویه پخ	۶۰ درجه	۶۰ درجه	۶۰ درجه	۶۰ درجه
گاز	Ar۹۹/۹۹۵٪	Ar۹۹/۹۹۵٪	Ar۹۹/۹۹۵٪	Ar۹۹/۹۹۵٪
اندازه درز اتصال	۳ میلی‌متر	۳ میلی‌متر	۳ میلی‌متر	۳ میلی‌متر
مدت زمان جوشکاری پاس ریشه	۳´: ۰۶˝	۳´ ۲۱˝	۲´ ۳۱˝	۲´ ۵۴˝
مدت زمان جوشکاری پاس رو	۲´: ۲۳˝	۲´: ۲۱˝	۲´: ۴۱˝	۳´ ۱۲˝
قطر فلز پرکننده	۱/۶ میلی‌متر	۱/۶ میلی‌متر	۱/۶ میلی‌متر	۱/۶ میلی‌متر
میزان مصرف فلز پرکننده پاس ریشه	۶۰ سانتی‌متر	۷۰ سانتی‌متر	۴۰ سانتی‌متر	۷۴ سانتی‌متر
میزان مصرف فلز پرکننده پاس رو	۶۵ سانتی‌متر	۷۰ سانتی‌متر	۶۰ سانتی‌متر	۷۴ سانتی‌متر
آمپر خروجی پاس ریشه	۹۰ –۱۰۰ آمپر	۸۶ آمپر	۸۶ آمپر	۸۵ آمپر
آمپر خروجی پاس رو	۱۰۲ آمپر	۹۰ آمپر	۸۸ آمپر	۱۱۰ آمپر
مقدار گاز خروجی از نازل	۱۰ لیتر بر دقیقه	۱۰ لیتر بر دقیقه	۱۰ لیتر بر دقیقه	۱۰ لیتر بر دقیقه
مقدار گاز خروجی پشت بند	۷ لیتر بر دقیقه	۷ لیتر بر دقیقه	۷ لیتر بر دقیقه	۷ لیتر بر دقیقه

ER80S و ERNi-Cr3 به قطر ۱/۶ میلیمتر و به روش GTAW، بدون پیشگرم کردن نمونه‌ها و با قطبیت DCEN بصورت 1G انجام شد. الکترود مصرف‌نشدنی مورد استفاده، الکترود تنگستنی حاوی ۲ درصد توریم به قطر ۲/۴ میلیمتر بود. گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۵ درصد به عنوان گاز محافظ استفاده شد. دمای بین‌پاسی ۱۰۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد تا تنش‌های پسماند ناشی از انقباض و سرد شدن فلز جوش به حداقل مقدار ممکن برسد. در هر پاس مقادیر شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری اندازه گیری و کنترل شدند (جدول۳).

2-4- متالوگرافی به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی و ارزیابی خواص مکانیکی

برای مطالعه و بررسی ریزساختار فلزات پایه، فلزات پرکننده، مناطق متاثر از حرارت و فصل مشترک‌ها از متالوگرافی استفاده شد. بدین منظور از هر اتصال یک نمونه با ابعاد مناسب تهیه شد. سطوح مورد نظر توسط سنباده‌های کاربید سیلیسیوم با مش۸۰ تا ۲۰۰۰ صاف و سپس توسط خمیر الماسه۳µm پرداخت شدند. نمونه‌ها توسط محلول شیمیایی با ترکیب($10grFeCl_3+20mlC_2H_5OH+20mlHCl$) به مدت ۱۰ ثانیه اچ شدند تا ریزساختار فلز پایه و جوش آشکار شوند.



شکل ۲- نمونه‌های مربوط به آزمایش کشش تهیه شده از نمونه‌های جوشکاری شده با فلزات پرکننده مختلف.

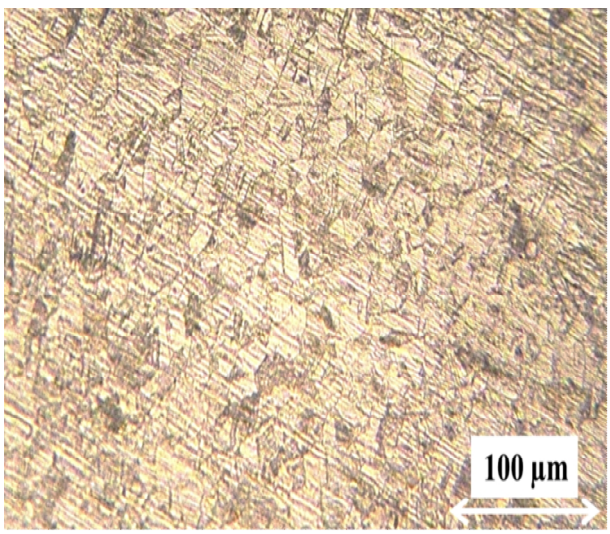
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

ریزساختار مناطق مختلف قطعات جوشکاری شده توسط میکروسکوپ نوری (Nikon) در بزرگ‌نمایی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه استحکام تسلیم، استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول نمونه‌ها با یکدیگر از آزمایش کشش استفاده شد. برای انجام آزمایش کشش از فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده یک نمونه از هر کدام از نمونه‌ها به صورت عرضی و عمود بر خط جوش مطابق با استاندارد ASTM E8-00 تهیه شد [۹]. سپس آزمایش کشش توسط دستگاه GOTECH و سرعت بارگذاری یک میلیمتر بر دقیقه انجام شد. در شکل(۲) نمونه های آزمایش کشش نشان داده شده است.

3- بحث و نتیجه‌گیری

3-1- ریزساختار فلزات پایه

تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فولاد زنگ نزن ۲۰۱ در شکل(۳) نشان داده شده است. ریزساختار دارای زمینه کاملاً آستنیتی و از دانه های هم‌محور تشکیل شده است. همچنین دوقلویی‌های آنیل در سرتاسر ساختار به چشم می‌خورند. چنین ساختاری نتیجه فرآیند آنیل انحلالی پس از عملیات نورد است. این عملیات به منظور از بین بردن رسوبات تشکیل شده در مرحله نورد انجام می‌شود تا خواص خوردگی و شکل پذیری آلیاژ بهبود یابد [۱۴و۱۵].



شکل ۳- ریزساختار فولاد زنگ آستنیتی ۲۰۱ با زمینه آستنیت



شکل ۴- ریزساختار فولاد ۴۱۳۰ شامل بینیت، فریت و پرلیت

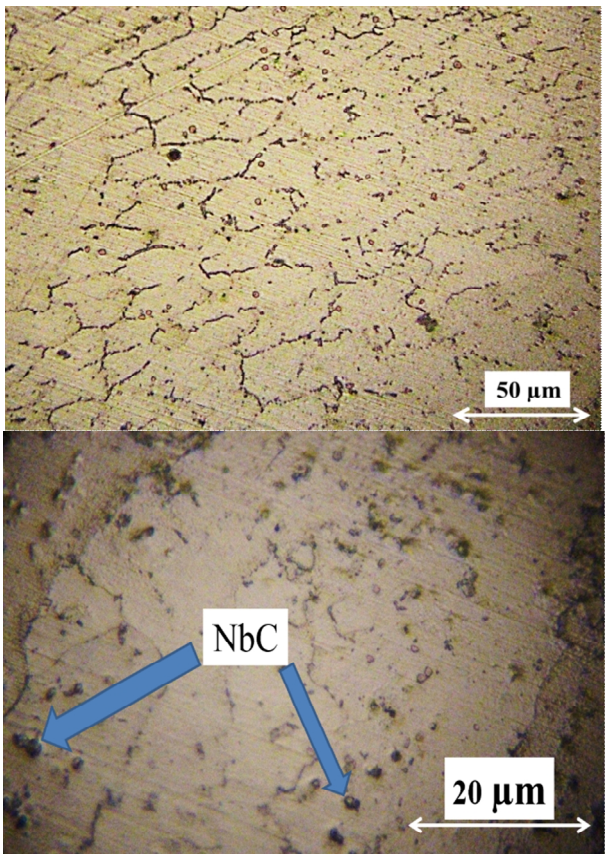
شکل(۴) تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فولاد ۴۱۳۰ اچ شده را نشان می‌دهد. ساختار شامل ترکیب بینیت، فریت و نواحی پرلیت می‌باشد. این آلیاژ معمولاً در حالت آنیل شده یا تمپر بیش از حد جوشکاری می‌شود، مگر اینکه هدف تعمیر قطعه باشد که در این حالت آنیل یا تمپر قبل از جوشکاری عملی نیست. با انجام عملیات آنیل علاوه بر یکنواختی در ترکیب شیمیایی، در اثر وقوع تبلور مجدد، ساختاری با دانه‌های هم‌محور ایجاد می‌شود و با افزایش زمان آنیل دانه‌ها، فرصت جهت رشد دارند و در نهایت ساختاری شامل دانه‌های هم‌محور نسبتا بزرگ به وجود می‌آید.

3-2- ریز ساختار فلز جوش با فلزات پرکننده مختلف

یکی از فلزات پرکننده مورد استفاده برای اتصال غیرمشابه در این پژوهش سیم جوش اینکونل ۸۲ (ERNiCr-3) است. ساختار دانه‌بندی فلز جوش مربوط به این فلز پرکننده در شکل(۵) آورده شده است. با توجه به این اشکال، ریزساختار مطابق انتظار کاملاً آستنیتی و از دانه‌هایی تشکیل شده است که تقریبا هم‌محور هستند. در درون دانه‌ها ساختار دندریتی سلولی ساختار غالب است. در این قسمت‌ها بازوهای دندریتی تا حدودی مشخص بوده و مناطق بین دندریتی با رنگ روشن متمایز هستند. هرچند که دندریت‌های هم‌محور هم در برخی از دانه‌ها وجود دارند. جهت‌گیری رشد دندریت‌ها در هر دانه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

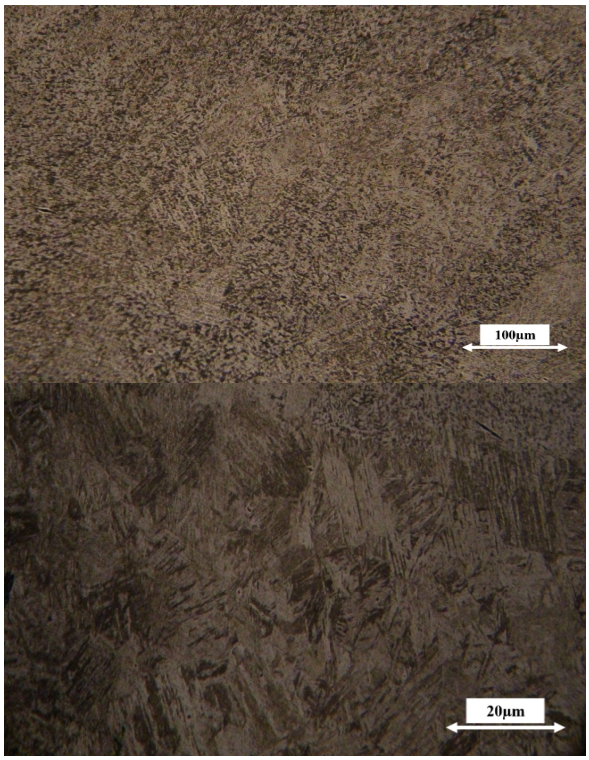
متفاوت است و در واقع یک نوع رشد رقابتی[1]در بین دانه‌های مختلف وجود دارد.



شکل ۵ – ریزساختار مرکز جوش با فلز پرکننده اینکونل ۸۲ در بزرگنمایی مختلف

مرز دانه‌های انجمادی[2](SGB) در ساختار کاملاً مشخص هستند. در واقع این مرزها محل تقاطع بسته‌هایی است که در آن‌ها دندریت‌ها در یک جهت خاص رشد کرده‌اند [۱۳و۱۴]. ریزساختار در مرکز جوش شامل دانه‌های دندریتی هم‌محور به همراه مقداری از رسوبات است. بنابر گزارش‌های انتشار یافته توسط سایر محققان به نظر می‌رسد که این رسوبات غنی از نیوبیوم و به شکل کاربید NbC می‌باشند[۸]. حضور نیوبیوم در فلز جوش در اثر توزیع مجدد عنصر حل‌شونده سبب ایجاد تحت‌تبرید ترکیبی شده و حالت انجمادی را از حالت سلولی به دندریتی هم‌محور تغییر می‌دهد [۱۸]. علاوه بر این رسوبات، در مرزها و بویژه محل تلاقی آنها فاز یوتکتیک لاوه وجود دارد که این فاز غنی از Nb می‌باشد. ضریب جدایش نیوبیوم در آلیاژهای پایه نیکل کمتر از یک بوده و در نتیجه این عنصر میل زیادی به جدایش به مناطق بین‌دندریتی دارد. علاوه بر این حضور سایر عناصر آلیاژی، قابلیت انحلال این عنصر در نیکل را کاهش می‌دهد [۱۴و۱۰].

فلز پرکننده دیگری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت فلز پرکننده ER80S-B2 می‌باشد. این فلز پرکننده پایه آهنی و از نوع فولاد کم آلیاژ کروم–مولیبدن‌دار است. در این فلز پرکننده بدلیل پایین بودن درصد نیکل و عناصر آستنیت‌زا ساختار آستنیتی ندارد. ریزساختار این فلز پرکننده در شکل(۶) آورده شده است. بررسی‌ها نشان داد بدلیل سرعت سرمایش بالا و هچنین درصد کربن نسبتا پایین در مرکز جوش ساختار این فلز پرکننده بصورت مارتنزیت لایه‌ای است که این صفحات مارتنزیتی در سرتاسر فلز جوش به چشم می‌خورد.



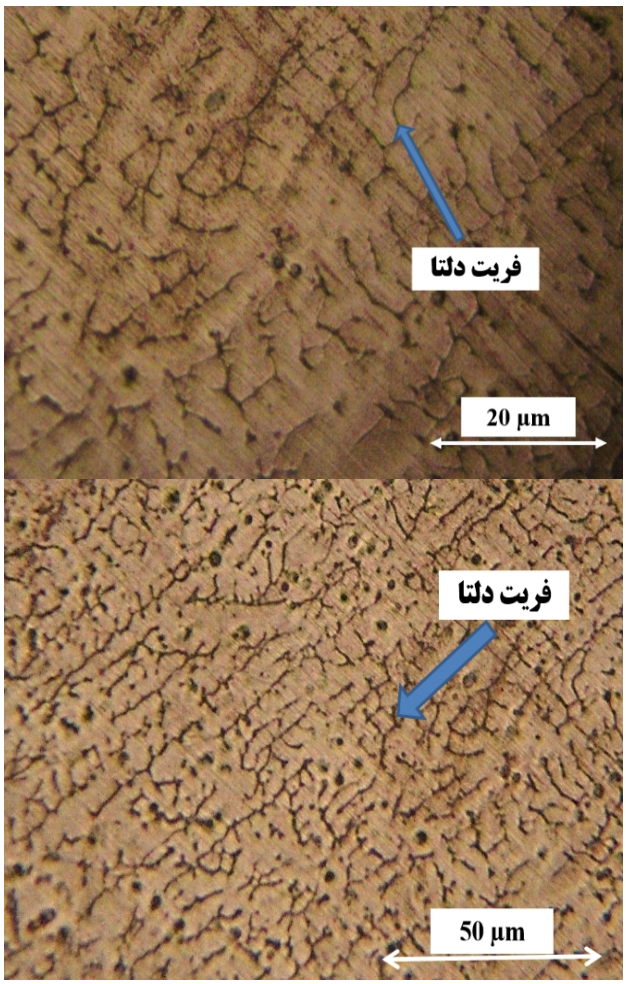
شکل ۶– ریزساختار مرکز جوش با فلز پر کننده ER80S-B2؛ سمت راست مربوط به پاس اول و سمت چپ مربوط به پاس دوم.

1- Competitive growth
2 - Sub Grain boundary

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

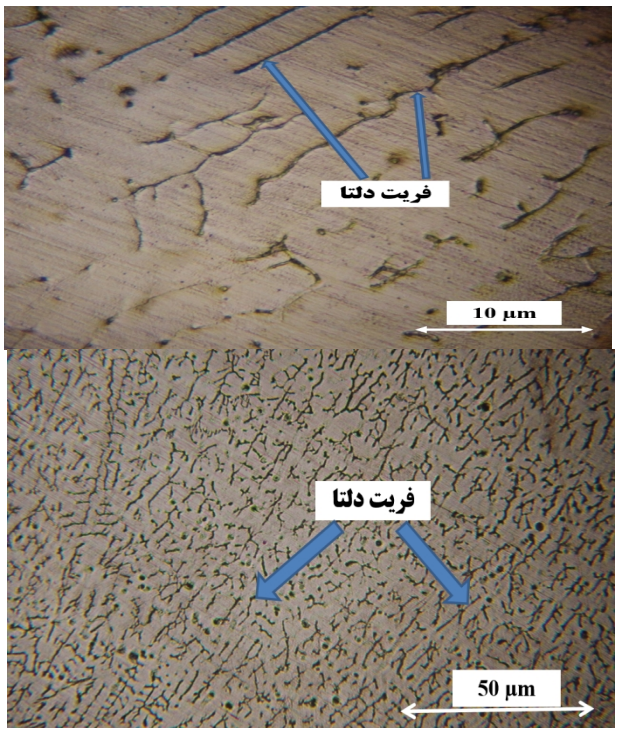
همچنین ساختار پاس ریشه با ساختار پاس رو اندکی تفاوت دارد. در هنگام جوشکاری پاس رو بدلیل بالا رفتن دما در پاس ریشه ساختار مارتنزیتی این قسمت به اصطلاح تمپر می‌شود و اندکی سختی آن کاهش می‌یابد.

فلز پرکننده دیگری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت فلز پرکننده ER308L بود. به طور کلی نوع انجماد در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به عواملی همچون ترکیب شیمیایی و فاکتورهای سینتیکی مانند سرعت سرد شدن بستگی دارد. مهمترین عامل مقدار کروم نیکل معادل و نسبت Cr_{eq}/Ni_{eq} در ترکیب شیمیایی است [۱۹-۲۳]. بنابر محاسبات صورت گرفته و بر اساس پیش‌بینی‌های انجام شده با استفاده از نمودار WRC-1992 مقدار عدد فریت دلتا در فلز جوش ایجاد شده برابر با ۶ است.



شکل ۷- ریزساختار مرکز جوش با فلز پرکننده ER308L در بزرگنمایی متفاوت

تصاویر متالوگرافی نشان داده شده در شکل(۷) نیز مؤید این موضوع است. حضور فریت دلتا در این ریزساختار موجب عدم‌وقوع ترک خوردن انجمادی می‌شود. این نوع ترک در جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن و اتصالات غیرمشابه با سایر فولادهای آلیاژی به عنوان یک معضل اساسی مطرح می‌شود. بر طبق بازرسی‌های غیرمخرب صورت گرفته توسط روش مایعات نافذ و بازرسی چشمی، هیچ‌گونه نشانه‌ای مبنی بر وجود ترک انجمادی در تمام پاس‌های جوشکاری و در سرتاسر جوش مشاهده نشد.

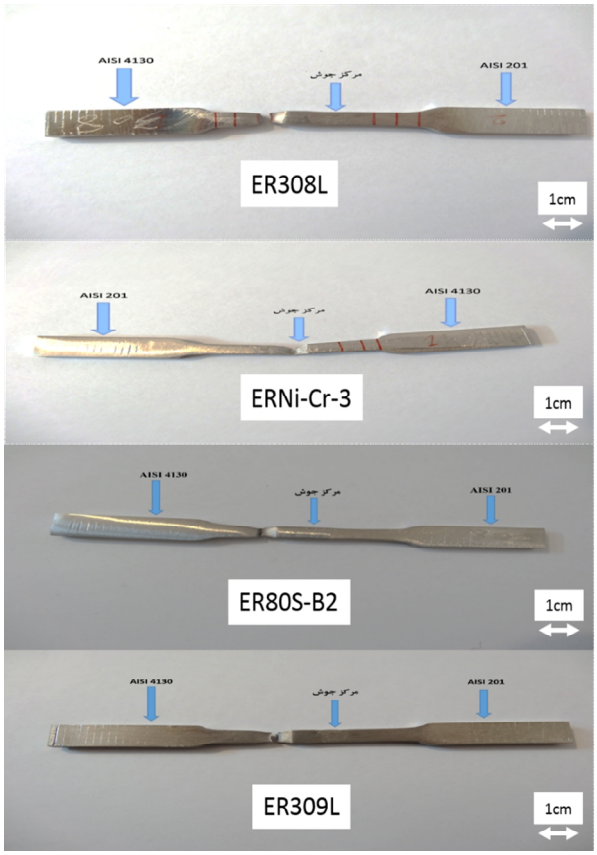


شکل ۸- ریزساختار مرکز جوش با فلز پرکننده ER309L در بزرگنمایی متفاوت.

فلز پرکننده دیگری که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است فلز پرکننده ER309L می‌باشد. تصاویر ریزساختاری از فلز جوش ایجاد شده به وسیله این پرکننده در شکل(۸) نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که فریت دلتا در راستای دندریت‌های شکل گرفته در مرکز فلز جوش تشکیل شده است. محاسبات انجام شده و بر طبق پیش‌بینی‌های نمودار WRC-1992 میزان عدد فریت در این حالت برابر با ۵ است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

این مقدار در واقع حداقل مقدار مورد نیاز جهت جلوگیری از وقوع ترک خوردن انجمادی درنظر گرفته می‌شود. نکته جالب توجه در رابطه با نوع مورفولوژی فریت دلتای تشکیل در فلز جوش مربوط به پرکننده ER309L آن است که برخلاف فریت‌های دلتای تشکیل شده در فلز جوش ER308L که انحنادار و پرپیچ و خم هستند، فریت‌های دلتا تشکیل شده در فلز جوش ER309L به صورت صاف و بدون انحنا هستند. این موضوع می‌تواند خواص مکانیکی اتصال را تحت تأثیر قرار دهد که در ادامه به این موضوع پرداخته خواهد شد.



شکل ۹- شکست در نمونه های جوش داده شده توسط فلزات پرکننده متفاوت

3-3- آزمایش کشش

نتایج آزمایش کشش نمونه‌ها در جدول(۴) آورده شده است. در بین فلزات پرکننده، فلز جوش ER80S-B2 دارای بیشترین استحکام کششی بود. بررسی‌ها نشان داد علت این امر بدلیل ساختار ماتنزیت فلز جوش آن است.

همان‌گونه که در شکل(۱۰) نشان داده شده است، استحکام نهایی فلز جوش ایجاد شده توسط فلز پرکننده ER 308L نسبت به فلز پرکننده ER 309L بیشتر است که علت این امر وجود فریت‌دلتاهای پراکنده و کرمی شکل در ساختار آن است که به عنوان موانعی برای رشد ترک‌ها و منحرف کردن آنها از مسیر خود نقش ایفا می‌کند. همچنین با بررسی سطح شکست نمونه‌ها مشخص شد طبق شکل(۸) نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ERNiCr-3 از مرکز جوش دچار شکست می‌شود. علت این امر می‌تواند تشکیل ترکیبات بین‌فلزی NbC در مرکز جوش باشد. سایر نمونه‌های جوشکاری شده از فلز پایه ۴۱۳۰ دچار شکست شدند که دلیل آن پایین بودن استحکام فلز پایه ۴۱۳۰ نسبت به فلزات جوش و فلز پایه ۲۰۱ است. این بدان معنی است که ضعیف‌ترین مناطق در این قطعات جوشکاری شده، به ترتیب فلز پایه ۴۱۳۰ و فلز پرکننده ERNiCr-3 هستند. شکل(۹) مقطع شکست نمونه‌های آزمایش کشش را نشان می‌دهد. همچنین نمودار مقایسه ای آزمایش کشش فلزات پرکننده در شکل(۱۰) آمده است.

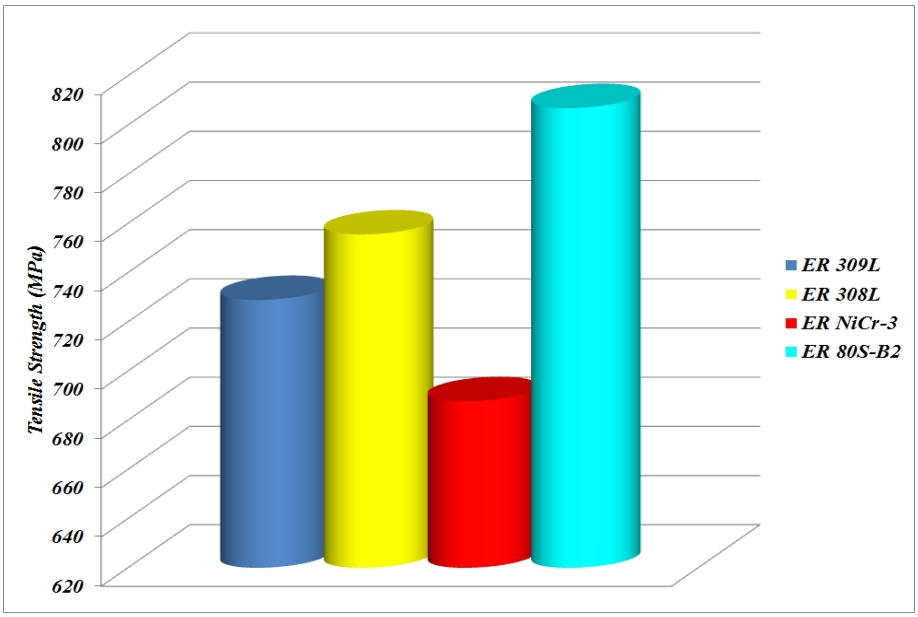
3-4- شکست‌نگاری

پس از آزمایش کشش سطح مقطع شکست نمونه‌های آزمایش کشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت و در شکل‌های(۱۱و۱۲) نشان داده شده است. سطح شکست نشان داده شده در شکل(۱۱) مربوط به یکی از سه نمونه ای است که در حین آزمایش کشش شکست از ناحیه فلز پایه ۴۱۳۰ رخ داده است. علت عدم وقوع شکست از محل فلز پایه ۲۰۱ آن است که فلز پایه ۲۰۱ از نوع زنگ‌نزن آستنیتی است. با توجه به درصد منگنز نسبتا بالای آن، سرعت کرنش سختی در آن نسبت به فلز پایه ۴۱۳۰ بسیار بالاست. این موضوع سبب می‌شود تا در کرنش‌های پایین، استحکام فلز پایه ۲۰۱ به شدت بالا رود و شکست از ناحیه فلز پایه ۴۱۳۰ رخ دهد. در شکل(۱۱) سطوح خطوط سیلان مشخص است و حالت پیوسته دارد. مشاهده دیمپل‌ها و حفرات قیفی شکل و کروی در سطح شکست نشان می‌دهد که نوع شکست در

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول ۴- نتایج آزمایش کشش در نمونه‌های جوشکاری شده

فلز پرکننده	استحکام کششی(MPa)	استحکام تسلیم(MPa)
ER308L	۷۵۶±۳	۳۹۲±۳
ERNiCr-3	۶۸۸±۳	۳۷۷±۳
ER309L	۷۲۸±۳	۴۰۶±۳
ER80S-B2	۸۰۶±۳	۴۶۰±۳



شکل۱۰- نمودار تنش کرنش نمونه جوشکاری شده : الف) فلز پرکننده ER309L ، ب) فلز پرکنندهER308L
ج) فلز پرکننده ERNiCr-3 ، د) فلز پرکنندهER80S-B2

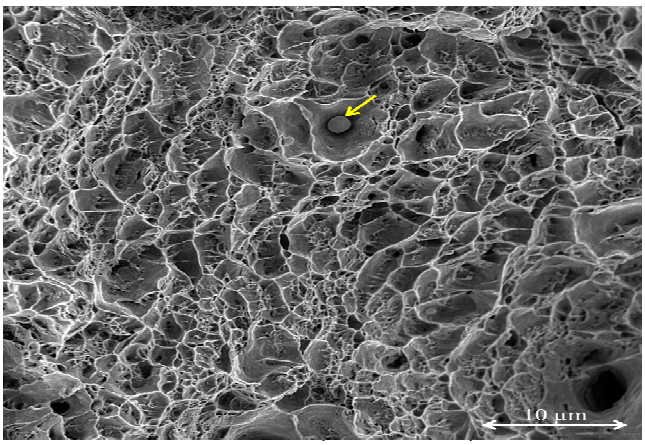
نمونه‌های ER308L، ER309L و ER80S-B2 که از محل فلز پایه ۴۱۳۰ دچار شکست شده‌اند کاملا نرم است. همان‌طور که در شکل مشخص است احتمال وجود ذرات کاربید نیز وجود دارد این ذرات با بالا رفتن دمای فلز در هنگام جوشکاری تشکیل می‌شوند که به‌دلیل وجود پستی و بلندی زیاد در سطح مقطع شکست امکان آنالیز EDS وجود ندارد. در نمونه جوش داده شده با فلز پرکننده ERNiCr-3 مطابق شکل(۱۲) علاوه بر دیمپل‌ها صفحات کلیواژ در نقاطی از نمونه قابل مشاهده است. این صفحات نشان دهنده شکست نیمه ترد هستند.

4- نتیجه‌گیری

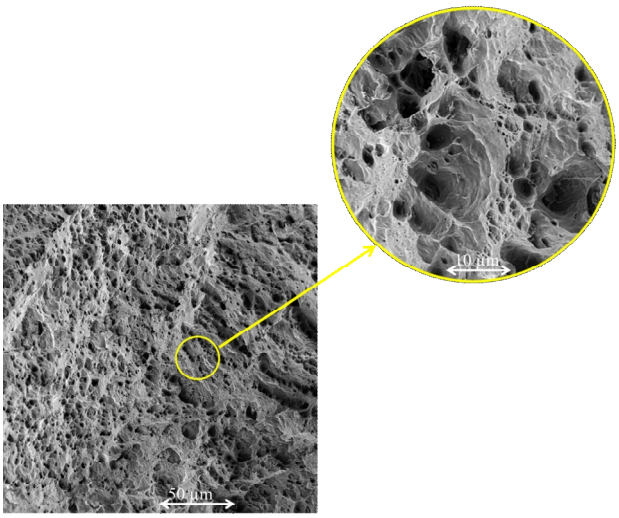
در این پژوهش اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی ۲۰۱ به فولاد کم آلیاژ ۴۱۳۰ توسط فرایند قوسی تنگستن-گاز به طور موفقیت‌آمیز صورت گرفت. در این رابطه، اثر ترکیب شیمیایی فلز پرکننده بر تحولات ریزساختاری مناطق مختلف جوش، خواص کششی و رفتار شکست در حین کشش اتصالات مورد بررسی و مطالعه دقیق قرار گرفت. بنابر تحقیقات صورت‌گرفته نتایج بدست آمده از این پژوهش را می‌توان در بخش‌های زیر خلاصه نمود:

- امکان اتصال موفقیت‌آمیز فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۲۰۱ به فولاد کم‌آلیاژ ۴۱۳۰ با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز و با استفاده از فلزات پرکننده ER309L، ER308L، ERNiCr-3 و ER80S-B2 وجود دارد.
- در بین فلزات پرکننده، فلز جوش ER80S-B2 دارای بیشترین استحکام کششی بود که بررسی‌ها نشان داد علت این امر بدلیل تشکیل ساختار ماتنزیت در فلز جوش آن است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل ۱۱-تصویر SEM سطح مقطع شکست از فلز پایه ۴۱۳۰



شکل ۱۲- تصویر SEM سطح مقطع شکست مرکز جوش نمونه ERNiCr-3

مارتنزیت تشکیل شده در پاس اول در اثر حرارت ورودی ناشی از پاس دوم ساختار تمپر شده پیدا می‌کند.

- استحکام کششی نمونه جوشکاری شده توسط فلز پر کننده ER308L نسبت به نمونه جوشکاری شده توسط فلز پرکننده ER309L بالاتر بود که علت این امر وجود فریت‌دلتاهای پراکنده و کرمی شکل در ساختار آن است که به عنوان موانعی برای رشد ترک‌ها و منحرف کردن آنها از مسیر خود می‌شود.

- با بررسی سطح شکست نمونه‌ها مشخص شد طبق شکل(۹) نمونه جوشکاری شده با فلز پرکننده ERNiCr-3 از مرکز جوش دچار شکست شده است علت این امر می‌تواند ناشی از تشکیل ترکیبات بین‌فلزی NbC در مرکز جوش باشد.

- مطالعات شکست‌نگاری نشان داد که نوع شکست در نمونه‌های ER308L، ER309L و ER80S-B2 کاملا نرم است.

همچنین در نمونه جوش داده شده با فلز پرکننده ERNiCr-3 علاوه بر دیمپل‌ها صفحات کلیواژ در نقاطی از نمونه قابل مشاهده است که نشان دهنده شکست نیمه ترد می‌باشد.

منابع

1- Kou. S, " Welding Metallurgy ", 2nd ed., Wiley-interscince, Ney Jersey, USA, 2003.

2- SouzaNeto, F.,Neves, D.,Silva, O.M.M.,Lima, M.S.F., Abdalla, A.J., An Analysis of the Mechanical Behavior of AISI 4130 Steel after TIG and Laser Welding Process, Procedia Engineering, Vol. 114, pp. 181-188, 2015.

3- Arivazhagan, N. Singh, S. Prakash, S. Reddy, G, M. " 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 and Design, Vol. 32, pp. 3036-3050, 2011.

4- Phanindra Reddy, M. Aldrin Sam William, A. Mohan Prashanth, M. Sabaresh Kumar, S.N. DevendranathRamkumar, K. Arivazhagan, N. Narayanan, S. "Assessment of Mechanical Properties of AISI 4140 and AISI 316 Dissimilar Weldments", Procedia Engineering, Vol. 75, pp. 29-33, 2014.

5- Tseng, K.H., Shiu, Y.J, Effect of thermal stability of powdered oxide on joint penetration and metallurgical feature of AISI 4130 steel TIG weldment, Powder Technology, Vol. 286, pp. 31-38, 2015.

۶- اکرامی، ع. سیدریحانی، م، ساختار، خواص و کاربرد آلیاژهای مهندسی، دانشگاه صنعتی شریف-مرکز انتشارات، ۱۳۹۰.

7-SouzaFilho, I.R.,Zilnyk, K.D,Sandim, M.J., Bolmaro, R.R.E., Sandim, H.R.Z., Strain partitioning and texture evolution during cold rolling of AISI 201 austenitic stainless steel, Materials Science and Engineering: A, Vol. 702, pp. 161-172, 2017.

8- Jang, C. Lee, J. Kim, J, S. Jin, T, E. "Mechanical property variation within Inconel 82/182 dissimilar metal weld between low alloy steel and 316 stainless steel", International Journal of pressure Vessels and Piping, Vol. 85,pp. 635-646, 2008.

۹- م. پورکبیریان، ح. مستعان، م. رفیعی، تأثیر فلز پرکننده بر خواص اتصال غیرمشابه فولاد ۴۱۳۰ به فولاد زنگ نزن ۳۱۶L، مواد پیشرفته در مهندسی، در دست چاپ.

۱۰- فراهانی، ا. شمعانیان، م. اشرفی زاده ،ف.،"ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال جوشکاری غیرمشابه اینکونل۶۱۷ به فولادزنگ ۳۰۴ "،پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی وجامعه علمی ریخته گری ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۰.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

۱۱- پ. شایان فر، م. شمعانیان، "جوشکاری غیر مشابه فولاد کوئنچ -تمپرASTM A517 به فولاد زنگ نزن AISI۳۱۶L وتاثیر بهینه سازی پارامتر های جوشکاری بر ریز ساختار" فصلنامه علمی پژوهشی فرایند های نوین در مهندسی مواد، سال ۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۳.

12- ASTM E8-00 Standard Test Method for Tension of Metallic Materials.

13- ASTM E23-00 Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.

14- White, W.E. May, W.E.,"Metallographic observations on the formation and occurrence of ferrite, sigma phase, and carbides in austenitic stainless steels: Part I: Studies of AISI Type 310 Stainless Steel",Metallography, Vol. 3(1), pp. 35-50,1970.

15- Kington, A.V. Noble, F.W.,"σ phase embrittlement of a type 310 stainless steel",Materials Science and Engineering A, Vol. 138, pp. 259-266, 1991.

16- M. Sireesha, et al., "Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800",Materials Science and Engineering A, Vol. 292(1),pp. 74-82,2000.

17- J.N. DuPont, J.C. Lippold, S.D. Kiser, Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys, Wiley, 1 ed, 2009.

18-H. Shah Hosseini, M. Shamanian, A. Kermanpur" Characterization of microstructures and mechanical properties of Inconel 617/310 stainless steel dissimilar welds" materials characterization 62 (2011) 425-431.

19- Kington, A.V. Noble, F.W., "σ phase embrittlement of a type 310 stainless steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 138, pp. 259-266, 1991.

20- Ul-Hamid, H.A. Tawancy, H. Nureddin, A.M., "Failure of weld joints between carbon steel pipe and 304 stainless steel elbows", Engineering Failure Analysis, Vol. 12, pp. 181-191, 2005.

21- Kacar, R. Baylan, O., "An Investigation of microstructure property relationships in dissimilar welds between martensitic and austenitic stainless steels", Materials and Design, Vol. 25, pp. 317–329, 2004.

22- Sireesha, M. et al., "Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800", Materials Science and Engineering A, Vol. 292(1), pp. 74- 82, 2000.

23- W.E. White, IL. May, "Metallographic Observation on the formation and occurrence of ferrite, sigma phase, and carbides in austenitic stainless steel: part I: Studies of AISI Type 310 Stainless Steel", Metallography, Vol.3(1), pp. 35-50.1970.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]