نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 1، بهار و تابستان1397، صفحه 28-19

جوشکاری غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی304L به فولاد زنگ نزن فریتی 409 با فرآیند GMAW و سیم‌جوش‌های ER316LSi و ER309LMo

مرتضی عباسی، حمیدرضا نجفی دژده منفرد*، علیرضا خدابنده

دانشکده مهندسی مواد، واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۳ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۹)

چکیده

در این پژوهش جوشکاری غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستینیتی 304L و فریتی ۴۰۹ با فرآیند GMAW با دو ترکیب از گازهای آرگون- اکسیژن و آرگون- دی اکسید کربن بررسی شده است. برای این منظور، سیم‌جوش‌های ER309LMo و ER316LSi باتوجه به مقدار فریت دلتای ۵ و ۱۵ درصد (با استفاده از روابط و دیاگرام شفلر) انتخاب شد. بر پایه مشاهدات، جوش قابل قبول با پرکننده‌های مذکور و استفاده از گاز محافظ $Ar–2\%O_2$ حاصل شد. نتایج آزمون‌های کشش نشان‌دهنده تنش تسلیم و استحکام کششی به ترتیب ۲۸۸ و MPa ۴۲۴ و وقوع شکست در سمت فولاد فریتی ۴۰۹ بود. میکروسختی‌سنجی نیز نشان‌دهنده حصول بیشترین سختی در فلز جوش ER316LSi بین ۱۹۰ تا HV ۲۰۰ و کمترین سختی در منطقه تحت تاثیر حرارت فولاد فریتی ۴۰۹ (۱۴۵HV) بر اثر رشد دانه‌ها در آن بود. همچنین، در منطقه تحت تاثیر حرارت فولاد زنگ‌نزن فریتی رسوبات سوزنی شکلی از نوع TiC مشاهده شد که گمان می‌رود بر اثر گرمایش و سرمایش سریع حین جوشکاری به این شکل تحول یافته باشند.

کلمات کلیدی: جوشکاری با قوس الکترود فلزی تحت گاز محافظ(GMAW)، فولاد زنگ‌نزن آستینیتی 304L ، فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۰۹، سیم جوشER316LSi، سیم جوش ER309LMo، گاز محافظ.

Welding of 304L Stainless Steel to 409 Stainless Steel with GMAW Process Using ER316LSi and ER309LMo Filler Metals

M. Abbasi, H. Najafi, A. Khodabandeh

Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

(Received 12 April 2017 ; Accepted 20 November 2018)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: hnajafi@srbiau.ac.ir

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

Abstract

Dissimilar welding of AISI 304L austenitic stainless steel to AISI 409 ferritic stainless steel with GMAW process usingtwo Ar-O2 and Ar-CO2 shielding gas mixtures was studied. ER316LSi and ER309LMo filler metals were chosen by considering 5 and 15% delta ferrite according to the Schaeffler equations and diagram. Based on the observations, both filler metals accompanied by Ar-2%O_2 shielding gas resulted in acceptable weldments. Yield strength and UTS of tensile samples were 288 and 424 MPa, respectively. All tensile samples fractured in the ferritic base metal. Microhardness test results demonstrated that the maximum hardness of 190-200 HV was obtained from ER316LSi weld metal. The minimum hardness of 145 HV was found in the HAZ of 409 side mainly due to the grain coarsening. Microstructural examinations revealed needle-like precipitates formed perpendicular to each other in the HAZ of 409 stainless steel. It seemed that the pre-existing TiC precipitates evolved into the needle shape precipitates as a result of rapid heating and cooling rates during the welding process.

Keywords: GMAW, 304L Stainless Steel, 409 Stainless Steel, ER316LSi, ER309LMo, Shielding Gas.

1- مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن با هدف بکارگیری در محیط های خورنده و دماهای زیاد توسعه یافته‌اند. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی و فریتی انواعی پرکاربرد از این فولادها هستند. یکی از کاربردهای این فولادها استفاده در صنایع خودروسازی است. امروزه با گران شدن قیمت حامل‌های انرژی نظیر بنزین در جهان، بحث مصرف انرژی یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین مباحث مطرح در صنعت است.خودروسازان بزرگ، فعالیت‌های زیادی برای ساخت خودروهای پاک انجام داده‌اند.اگر سعی شود که هر قطعه با سبک‌ترین وزن ممکن تولید شده و خواص مطلوب خود را از دست ندهد، وزن خودرو کمتر شده و در نهایت مصرف سوخت کمتر خواهد بود[۱ و ۲]. یکی از این قطعات چندراهه دود در خودرو است. برای ساخت چند راهه‌های دود معمولا از چدن‌های نشکن پرسیلیسیم و چدن‌های آستنیتی که در دماهای زیاد مقاومت بهتری دارند استفاده می‌شود[۳].

فولادهای زنگ‌نزن از جمله آلیاژهایی هستند که توانایی حفظ استحکام در دماهای زیاد را دارند. به این ترتیب، بکار بردن این فولادها در ساخت چندراهه‌های دود کاهش ضخامت جداره آن و درنتیجه کاهش وزن خودرو را میسر می‌سازد. علاوه بر این، ساخت چندراهه‌های دود از فولاد زنگ‌نزن، با افزایش دمای کاری موجب افزایش راندمان مصرف سوخت می‌شود. در نهایت، استفاده از فولادهای زنگ‌نزن به جای چدن در ساخت این قطعه، مزایای دیگری مانند بهبود مقاومت به خوردگی، مقاومت به اکسیداسیون و خستگی حرارتی را در پی دارد[۴].

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴L و فریتی ۴۰۹ از مطرح‌ترین کاندیداها برای ساخت چندراهه‌های دود فولادی هستند. از آنجا که فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴L به عنوان لوله‌های چندراهه و فولاد زنگ نزن ۴۰۹ به عنوان فلنج خروجی چندراهه دود مد نظر است، استفاده از جوشکاری برای اتصال آنها اجتناب‌ناپذیر است. به همین دلیل، هدف از انجام این پژوهش، بررسی اتصال فولادهای زنگ‌نزن ۳۰۴L به ۴۰۹ با فرآیند GMAW است. برای رسیدن به اتصالی مناسب، انتخاب فلز پرکننده و ترکیب گاز محافظ مناسب، ضروری و اهداف اصلی برای این پژوهش بود.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- فلزات پایه و پرکننده‌ها

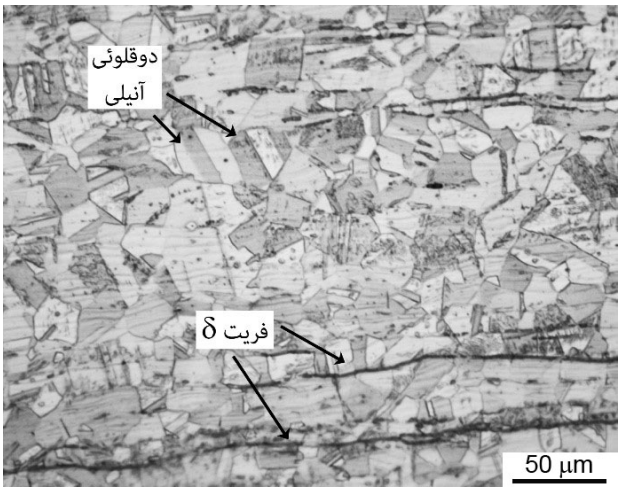
برای انجام پژوهش، ورق‌هایی از جنس فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴Lو فریتی ۴۰۹ با ضخامت mm ۳تهیه شد. آنالیز شیمیایی فلزات پایه در جدول(۱) آورده شده است. ریزساختار ورق۳۰۴L شامل فریت دلتای کشیده‌شده در راستای نورد و دوقلوئی‌های آنیلی بود (شکل ۱). ریزساختار فولاد ۴۰۹ شامل دانه‌های آنیل‌شده بود که در شکل(۲) نشان داده شده است. علاوه براین، چنان‌که در شکل(۲) نشان داده شده است در

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

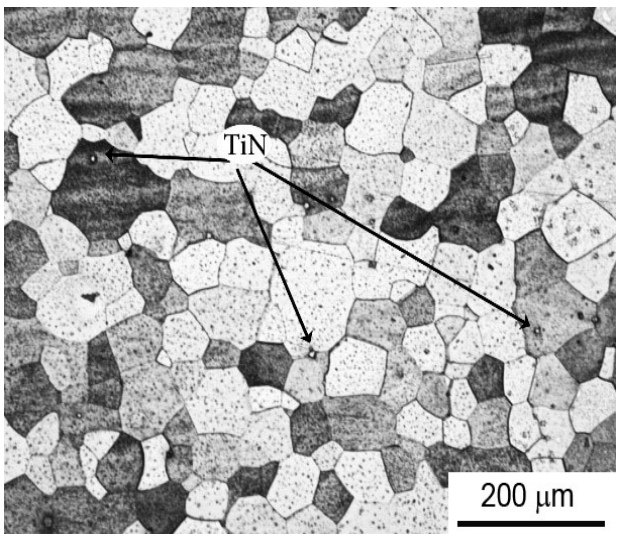
جدول 1- ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ نزن**304L** و 409 (درصد وزنی)

فلز پایه	USN No.	%C	%Cr	%Mn	%Si	%Ni	%S	%P	سایر (٪)
۳۰۴L	S30403	۰/۰۳	۱۷/۴	۱/۵۳	۰/۵	۸/۲۲	۰/۰۰۵۱	۰/۰۴۵	Mo (۰/۲۵)
۴۰۹	S40900	۰/۰۴۸۶	۱۰/۹	۰/۴۷۵	۰/۷۵	۰/۱۱۳	<۰/۰۰۰۷	۰/۰۲۸۱	Ti (۰/۱۷۸)

ریزساختار این فولاد رسوب‌های نسبتاً درشتی از نوع TiN دیده می‌شود.



شکل1- تصویرمیکروسکوپی نوری از ریزساختارفلزپایه فولادآستنیتی 304 L (فریت d و دوقلوئی‌های آنیلی با پیکان مشخص شده‌اند).



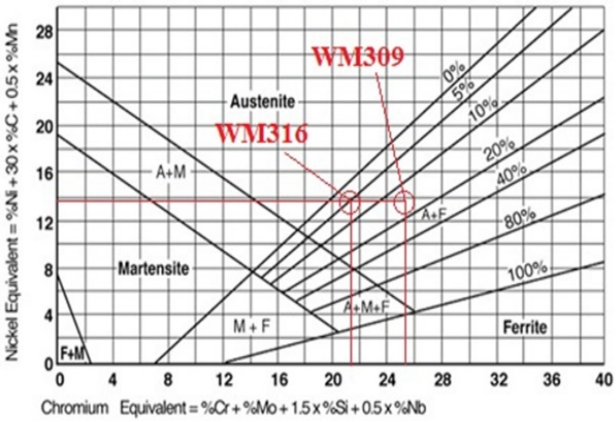
شکل2- تصویرمیکروسکوپی نوری ازریزساختارفلزپایه فولادفریتی 409 (پیکان‌ها نشان‌دهنده رسوب‌های TiN است).

انتخاب دو فلز پرکننده بر پایه دیاگرام و روابط شفلر (شکل ۳ و روابط ۱ تا ۳) صورت گرفت [۵]. هدف، انتخاب پرکننده‌هایی بود که پس از انجماد حاوی ۵ تا ۱۵٪ فریت دلتا باشند. برای انجام محاسبات، با توجه نیاز به در نظر گرفتن رقتی مشخص، بر اساس طرح اتصال، رقت ۳۰٪ با سهم برابر فلزات پایه (۱۵٪) در نظر گرفته شد. پس از محاسبه نیکل و کروم معادل و در نهایت عدد فریت، دو فلز پرکننده ER316LSi و ER309LMo بر پایه استاندارد AWS A5.9 انتخاب شد. در جدول(۲) ترکیب شیمیایی این دو پرکننده مشخص شده است. مقدار نیکل معادل، کروم معادل و عدد فریت فلز جوش با در نظر گرفتن ۳۰٪ رقت نیز در جدول(۳) مشخص شده است.

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb \quad (۱)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0.5Mn + 30C \quad (۲)$$

$$\text{Delta ferrite} = 3(Cr_{eq} - 0.93Ni_{eq} - 6.7) \quad (۳)$$



شکل 3- دیاگرام شفلر و ترکیب تخمینی فلزات جوش حاصل از سیم‌جوش‌های ER316LSiو ER309LMo [1].

2-2- جوشکاری

جوشکاری به‌وسیله فرآیند GMAW دستی با دو ترکیب گاز محافظ Ar-%۲O_2 و Ar-%۲CO_2 در یک پاس انجام گرفت [۶]. به منظور بررسی تاثیر فلز پرکننده و گاز محافظ سایر پارامترهای جوشکاری ثابت در نظر گرفته شد. پارامترهای مختلف جوشکاری به همراه شماره نمونه‌های جوشکاری‌شده

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

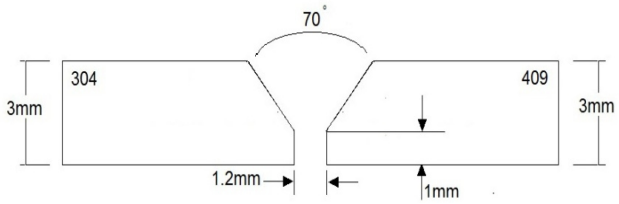
جدول ۲- ترکیب شیمیایی پرکننده‌ها (درصد وزنی)

پرکننده	USN No.	%C	%Cr	%Mn	%Si	%Ni	%S	%P	%Mo	%Cu
ER316LSi	S31683	۰/۰۳	۲۰	۲/۵	۰/۶۵	۱۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۳	۰/۷۵
ER309LMo	S30983	۰/۰۳	۲۵	۲/۵	۰/۶۵	۱۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۲/۸	–

جدول ۳- کروم معادل، نیکل معادل فلزات پایه فلزات پرکننده و فلزات جوش

پرکننده	Ni_{eq} 304 L	Cr_{eq} 304 L	Ni_{eq} 409	Cr_{eq} 409	Ni_{eq} فلز پرکننده	Cr_{eq} فلز پرکننده	Ni_{eq} فلز جوش	Cr_{eq} فلز جوش	عدد فریت
ER316LSi	۱۰/۱۰	۱۸/۴۰	۱/۸۰	۱۲/۰۳	۱۶/۱۵	۲۳/۹۸	۱۳/۹۰	۲۱/۳۴	۵/۱۴
ER309LMo	۱۰/۱۰	۱۸/۴۰	۱/۸۰	۱۲/۰۳	۱۶/۱۵	۲۸/۷۸	۱۳/۹۰	۲۴/۷۰	۱۵/۲۲

در جدول(۴) مشخص شده است. طرح اتصال به شکل شیار V شکل یک‌طرفه در شکل(۴) نشان داده شده است.



شکل4-طرح اتصال نمونه های جوشکاری شده

2-3-بررسی‌های ریزساختاری

نمونه‌های متالوگرافی با روش مرسوم آماده سازی شدند. برای اچ کردن این نمونه‌ها از محلول گلیسرجیا (شامل ۳ cc HCl، ۱ cc اسید نیتریک و ۱ cc گلیسیرین)استفاده شد. برای بررسی بهتر ریزساختار، نمونه‌های متالوگرافی‌شده منتخب توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به EDS شرکت ZEISS تحت مطالعه قرار گرفتند.

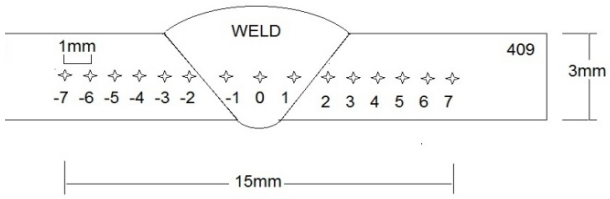
2-4- آزمون‌های مکانیکی

برای هر حالت دو نمونه کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8M به‌گونه‌ای آماده شدند تافلز جوش دقیقاً در وسط نمونه‌ها قرارگیرد.سرعت حرکت فک‌ها در این آزمون برابر ۴ mm/min بود. برای تهیه پروفیل سختی از روش ویکرز با بار اعمالی ۵۰ گرم و مدت زمان اعمال بار ۲۰ ثانیه استفاده شد. نقاط مورد بررسی نیز از مرکز جوش تا فلز پایه در فواصل یک میلیمتری مطابق شکل(۵) بود. اعداد گزارش‌شده، میانگین سه سختی‌سنجی در هر موضع است.

3- نتایج و بحث

3-1- گاز محافظ

با استفاده ازگازمحافظ باترکیب$Ar-\%2O_2$و$Ar-\%2CO_2$قوس پایدار ونرم بدست آمد. کمترین میزان پاشش نیز از ترکیب گازمحافظ$Ar-\%2O_2$حاصل شد.

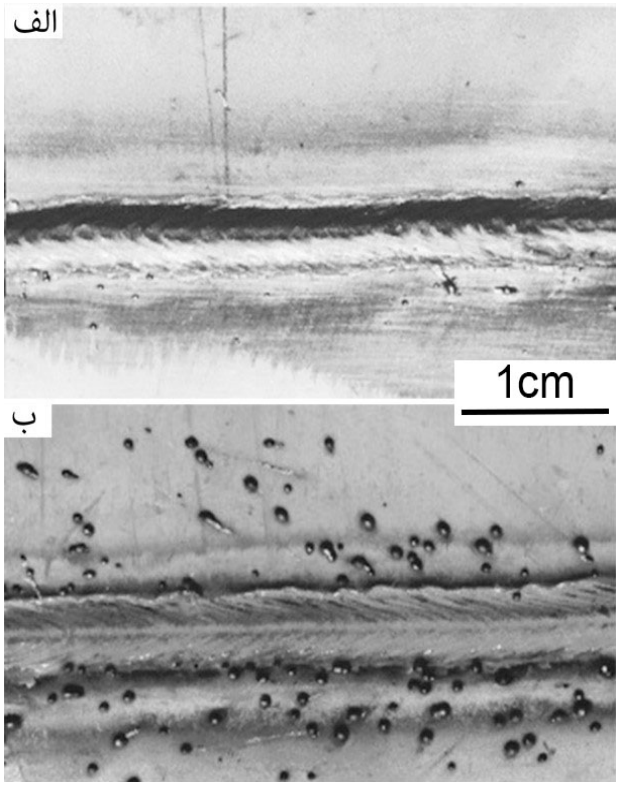


شکل 5- تصویر شماتیک نقاطی که ریزسختی‌سنجی انجام شده است.

شکل(۶)تصویرقطعه جوشکاری شده باسیم‌جوش ER316LSiباگازهای محافظ پیش‌گفته رانشان می‌دهد. چنان‌که در شکل‌های(۶-الف) و(۶-ب) قابل مشاهده است، با استفاده از گاز $Ar-\%2O_2$پاشش به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.برپایه یافته‌های Soonrakh و همکاران [۷] حضور اکسیژن در گاز محافظ ضمن تاثیر بر حالت انتقال مذاب، مقدار بهینه آن موجب کاهش جریان لازم برای انتقال با حالت اسپری می‌شود. علاوه براین، حضور اکسیژن پایداری بیشتر قوس و انتقال پایدارتر مذاب را در پی خواهد داشت. شکل(۷) تصویر ماکروسکوپی قطعات جوشکاری شده با گاز محافظ $Ar-\%2O_2$با سیم‌جوش‌هایER316LSiوER309LMoرا نشان می‌دهد.برپایه این شکل و با توجه به طرح اتصال اولیه می‌توان نتیجه گرفت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی بیش از فولاد نزن فریتی ذوب شده

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

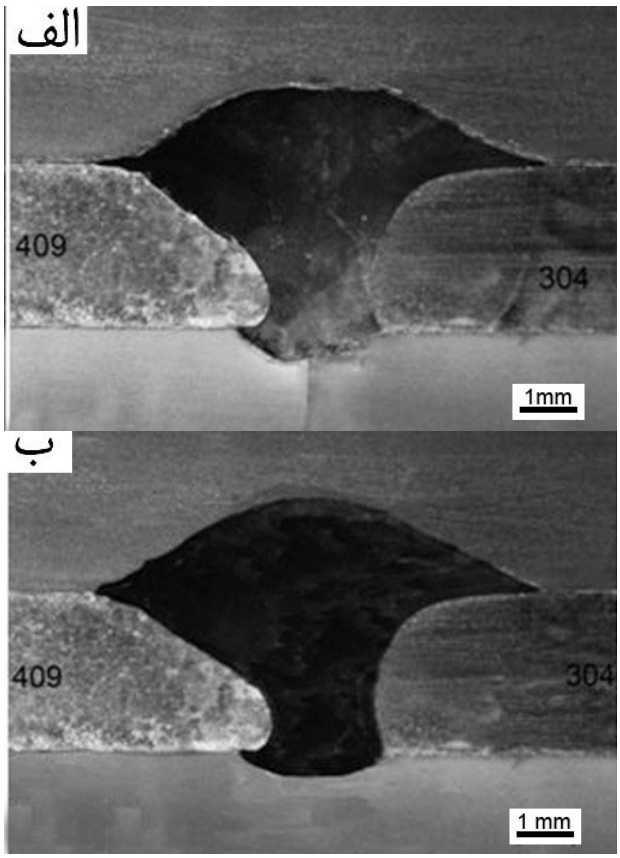
است. Tasalloti و همکاران [۸] نیز در جوشکاری نامتشابه فولاد ۳۰۴L به فولادی کم‌آلیاژ رفتار مشابه‌ای را مشاهده کرده‌اند. دلیل این رفتار می‌تواند تجمع حرارتی بیشتر در سمت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی به دلیل رسانایی حرارتی کم‌تر آن یا انحراف قوس به سمت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی (باتوجه ویژگی متفاوت مغناطیسی در مقایسه با فولاد زنگ‌نزن فریتی) باشد.



شکل 6- تصویر قطعات جوشکاری‌شده با سیم‌جوش ER316LSi گازهای محافظ (الف) Ar-%2O_2 (ب) Ar-%2CO_2

3-2- بررسی ریزساختاری فلز جوش

نسبت کروم معادل به نیکل معادل (Cr_{Eq}/Ni_{Eq}) برای هر دو سیم‌جوش در حدود ۱/۹ است. شکل(۸) تصویر میکروسکوپی نوری منطقه جوش حاصل از پرکننده‌های ER309LMo و ER316LSi را نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل مشخص است، ساختار نهایی انجماد برای هر دو سیم‌جوش شامل فریت اسکلتی است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت انجماد با تشکیل فریت دلتا آغاز شده و در پایان بخشی از فریت بر اثر جدایش عناصری مانند نیکل، آستنیت در مرزهای انجمادی فریت تشکیل شده است.تشکیل فریت دلتا در مرحله ابتدایی انجماد تاثیر مثبتی بر مقاومت جوش ایجادشده به ترک انجمادی خواهد داشت. حد حلالیت عناصری مانند فسفر و گوگرد (که موجب افزایش دامنه انجمادی می‌شوند) در فریتبه ترتیب ۱۰ و ۵ برابر بیشتر از آستنیت است. به این ترتیب، تشکیل فریت به عنوان فاز اولیه انجمادی موجب جذب فسفر و گوگرد به این فاز شده و مقدار آنها در مذاب باقی‌مانده کاهش خواهد یافت. با کاهش مقدار گوگرد و فسفر مذاب، دامنه انجمادی و درنتیجه حساسیت به ترک انجمادی کاهش خواهد یافت [۹].



شکل 7- تصویر ماکروسکوپی قطعات جوشکاری‌شده با گاز محافظ Ar-%2O_2 و سیم‌جوش: (الف) ER316LSi و (ب) ER309LMo.

3-3- ریزساختار منطقه تحت تاثیر حرارت

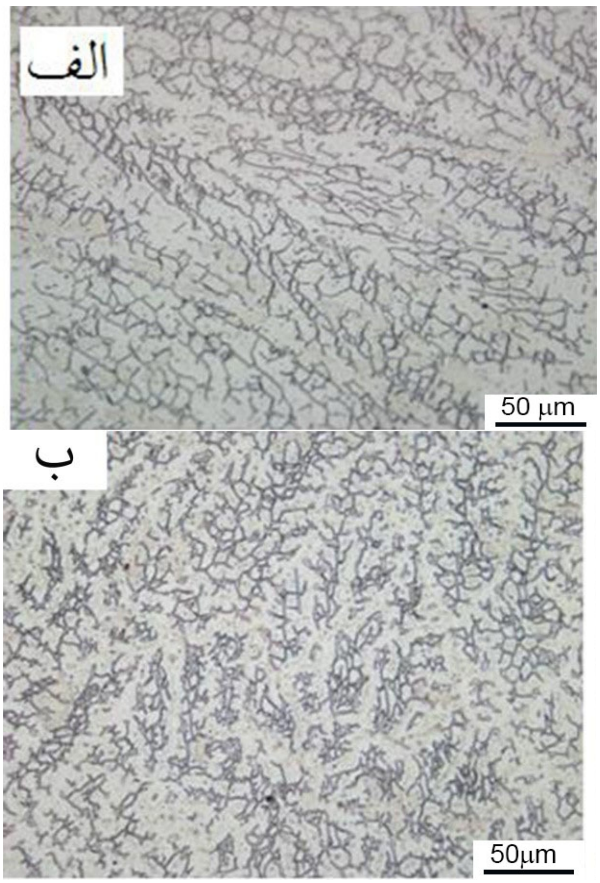
چنان‌که درشکل(۹-الف) نشانداده شده است،در HAZ فلز پایه۳۰۴L رشددانه‌هابسیاراندک است. از طرف دیگر، بررسی ریزساختار نشان‌دهنده تشکیل فریت دراین ناحیه اغلب درامتدادمرزدانه‌ها است.فریت بوجودآمده درمرزدانه‌های منطقه

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

جدول ۴- مقادیر تنظیم شده برروی دستگاه و مقادیر بدست آمده در حین جوشکاری

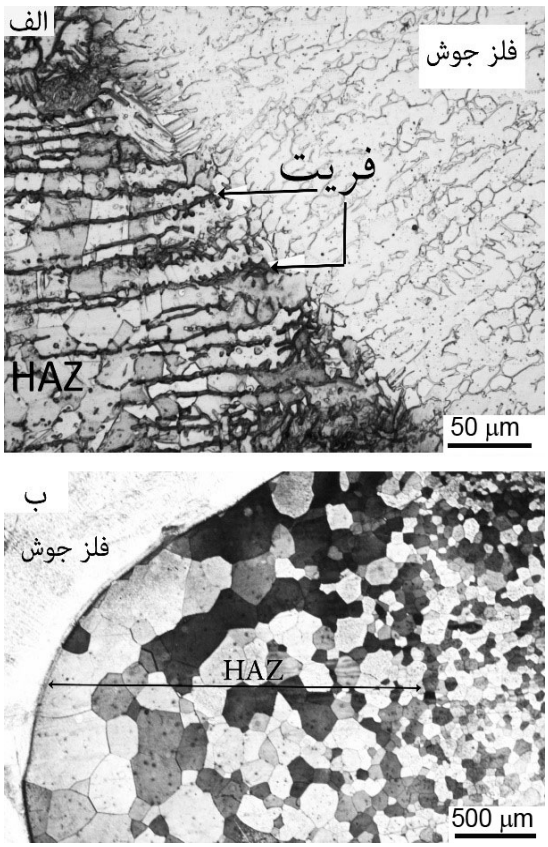
کد قطعه	نوع فلز پرکننده	ولتاژ (V)	شدت جریان (A)	سرعت تغذیه سیم(m/min)	دبی گاز محافظ (Lit/min)	ترکیب گاز محافظ	سرعت جوشکاری (m/min)	طول موثر الکترود (mm)	قطر الکترود (mm)	قطبیت
۱	ER309LMo	۱۶	۹۰	۲/۸	۱۵	Ar-٪۲O_2	۱۸	۱۲	۱/۲	DCEP
۲	ER309LMo	۱۶	۸۸	۲/۸	۱۵	Ar-٪۲CO_2	۱۸	۱۲	۱/۲	DCEP
۳	ER316LSi	۱۶	۱۰۰	۲/۸	۱۵	Ar-٪۲O_2	۱۸	۱۲	۱/۲	DCEP
۴	ER316LSi	۱۶	۱۰۰	۲/۸	۱۵	Ar-٪۲CO_2	۱۸	۱۲	۱/۲	DCEP

تحت تاثیر حرارت سبب جلوگیری از رشد دانه‌ها شده، همچنین حساسیت این منطقه به ترک گداز[1] را به حداقل می‌رساند[۹].



شکل 8- تصویر میکروسکوپی نوری منطقه جوش:
(الف) نمونه 1 و (ب) نمونه 3.

با این حال، در فولاد زنگ نزن فریتی ۴۰۹ دانه‌های فریت رشد کرده و منطقه تحت تاثیر حرارت درشت دانه بوجود آمده است (شکل۹-ب).دلیل رشد قابل توجه دانه در فولاد زنگ‌نزن فریتی در مقایسه با فولاد زنگ‌نزن آستنیتی تک‌فاز بودن و هدایت حرارتی بیشتر آن است.

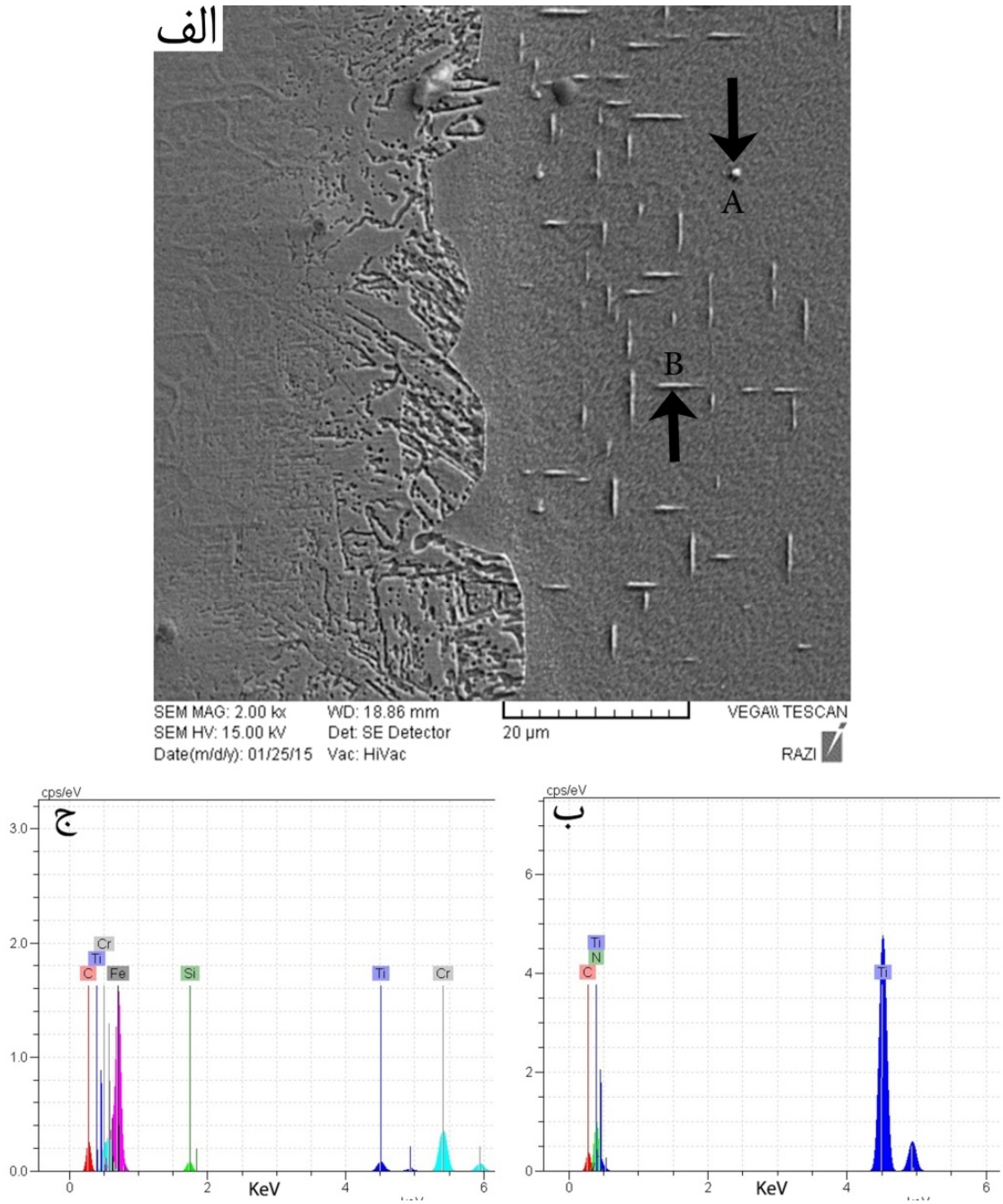


شکل9- تصویرمیکروسکوپی نوری ازریزساختارمنطقه تحت تاثیر حرارت فلزپایه نمونه 1: (الف) فولاد فریتی 409 و (ب) فولادآستنیتی304L.

هدایت حرارتی فولاد ۴۰۹ برابر ۲۶ W/m.K و هدایت حرارتی فولاد ۳۰۴L برابر ۱۶W/m.K است [۱۰]. به این ترتیب، سمت فولاد ۴۰۹ بیشتر تحت تاثیر حرارت قرار می‌گیرد. از طرف

1 - Liquation

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

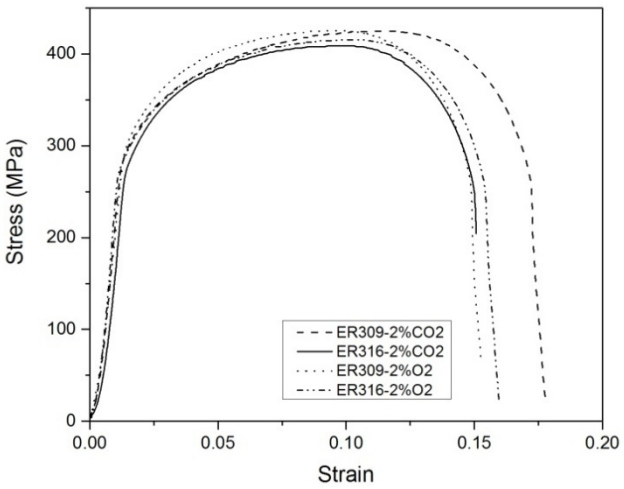


شکل ۱۰- (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی منطقه تحت تاثیر حرارت فلز پایه ۴۰۹نمونه ۴،
(ب) آنالیز عنصری رسوب A و (ج) آنالیز عنصری رسوب B.

دیگر، در سمت فولاد ۴۰۹ فاز موثری برای پیش‌گیری از رشد دانه وجود ندارد. رسوب‌هایی که در پاراگراف‌های پیشرو به آنها اشاره شده به دلیل درشت بودن تاثیر چندانی بر رشد دانه نخواهند داشت. با این حال، چنان‌که در ابتدای همین پاراگراف به آن اشاره شد، وجود فریت دلتا در ناحیه تحت تاثیر حرارت فولاد ۳۰۴L تاثیر مثبتی بر پیش‌گیری از رشد دانه خواهد داشت.میکروسکوپی الکترونی روبشی منطقه تحت تاثیر حرارت فلز پایه ۴۰۹ نشان‌دهنده دو نوع رسوب بود. نوع اول به نظر از همان رسوب‌هایی بود که در فلز پایه وجود داشت. رسوب A در شکل(۱۰-الف) نمونه‌ای از این رسوب ها را نشان می‌دهد.

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

شکل(۱۰–ب) نتیجه آنالیز نقطه‌ای این رسوب را به تصویر کشیده است. چنان‌که از نتیجه EDS مشخص است، رسوب از نوع کاربونیترید تیتانیوم Ti(C,N) است. دلیل وجود این رسوب‌ها در HAZ به پایداری حرارتی بالای آنها باز می‌گردد.
نوع دیگری از رسوب‌ها که پس از جوشکاری در منطقه تحت تاثیر حرارت فولاد ۴۰۹ وجود داشت، به صورت سوزنی و در جهات عمود بر هم به فاصله کمی از مرز ذوب تشکیل شده بودند (شکل ۱۰–الف). نتیجه آنالیز عنصری نمونه‌ای از این رسوب‌ها (رسوب B) در شکل(۱۰–ج) نشان داده شده است. با بررسی عناصر موجود، می‌توان به این نتیجه رسید که این رسوب‌ها از تیتانیوم و کربن تشکیل شده‌اند.

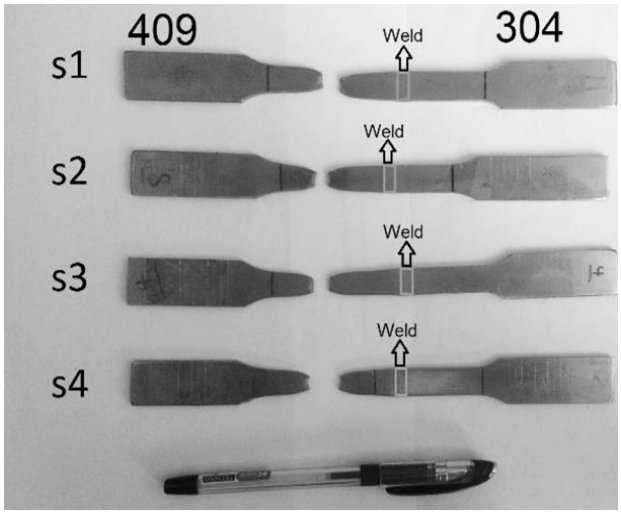


شکل 11- منحنی‌های تنش ـ کرنش نمونه‌های جوشکاری شده.

بنابراین، گمان می‌رود این رسوب‌ها ذرات TiC باشند. با توجه به حضور تیتانیم در ترکیب شیمایی فولاد ۴۰۹ وجود این رسوب‌ها پیش از جوشکاری در ریزساختار محتمل به نظر می‌رسد. گرمایش حاصل از جوشکاری تمایل به انحلال را در این رسوب‌ها (که دارای پایداری حرارتی کم‌تری از TiN هستند) بوجود می‌آورد. چنان‌که در متون متالورژی فیزیکی تصریح شده، پیش از انحلال، رسوب‌ها درشت می‌شوند به گونه‌ای که رسوب‌های ریز حل شده و رسوب‌های بزرگ درشت می‌شوند. این پدیده Ostwald Ripening نامیده می‌شود [۱۱ و ۱۲]. با این حال، سرعت بالای گرمایش در جوشکاری، فرصت کافی برای رشد یکنواخت را به رسوب‌ها نمی‌دهد. به این ترتیب رسوب‌ها در امتداد صفحات خاص کریستالی رشد می‌کنند که نتیجه آن شکل سوزنی رسوب‌ها خواهد بود [۱۳]. جهت‌گیری منظم این رسوب‌ها (عمود بودن جهت رشد آنها بر هم) می‌تواند اثبات کننده رشد این رسوب‌ها در امتداد صفحات مشخص کریستالی باشد.

3-4- ویژگی‌های مکانیکی

شکل ۱۱ منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. تنش تسلیم و استحکام کششی نمونه‌ها به تقریب برابر ۲۸۸ و ۴۲۴ MPa منطبق بر خواص استحکامی فولاد ۴۰۹ بود. با بررسی نمونه‌ها مشخص شد که تمام نمونه‌ها از منطقه فلز پایه ۴۰۹ شکسته شده‌اند (شکل ۱۲). بنابراین، به نظر می‌رسد سیم‌جوش‌های بکار رفته می‌توانند استحکام مورد نظر را برآورده سازند.

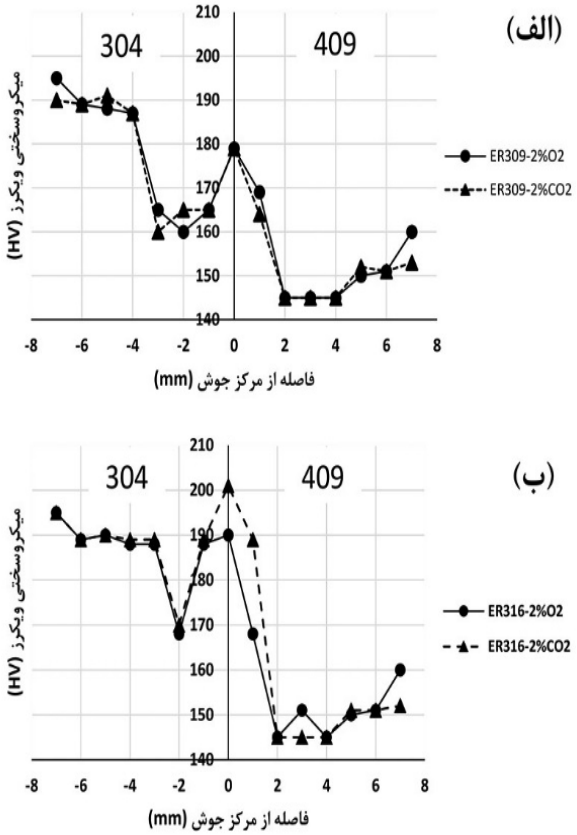


شکل 12- محل شکست نمونه‌های کشش.

شکل(۱۳–الف)ریزسختی‌های بدست آمده از نمونه‌های جوشکاری شده با پرکننده ER309LMoرا نشان می‌دهد. با توجه به ریزسختی‌های بدست‌آمده، کمترین مقدار سختی مربوط به منطقه تحت تاثیر حرارت فلز پایه ۴۰۹ می‌باشد. این پدیده می‌تواند به دلیل رشد دانه‌ها در این منطقه باشد. سختی در منطقه تحت تاثیر حرارت در سمت فلز پایه ۳۰۴L نیز از کمتر از فلز پایه می‌باشد، اما همچنان بیش از سختی منطقه تحت تاثیر حرارت فولاد ۴۰۹ است. بیشترین عدد ریزسختی

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

نیز در فلز جوش بدست آمد. شکل(۱۳–ب) ریزسختی‌های بدست آمده از نمونه جوشکاری شده با سیم‌جوش ER316LSiرا نشان می‌دهد که سختی در آن به HV ۲۰۰ رسیده است. عدد سختی بدست آمده برای مناطق تحت تاثیر حرارت در هر دو فلز پایه مشابه اعداد بدست آمده با سیم‌جوشER309LMoمی‌باشد.



شکل 13- پروفیل سختی:
(الف) نمونه‌های 1 و 2 و (ب) نمونه‌های 3 و ۴.

نکته قابل توجه این است که اعداد سختی در سیم‌جوش ER309LMo کم‌تر از سختی در سیم‌جوش ER316LSi است. این پدیده می‌تواند بر اثر فریت بیشتر موجود در این فلز جوش باشد. فریت بیشتر در سیم‌جوش ER309LMo نیز به دلیل مقدار بیشتر کروم است، که عنصری فریت‌زا است. با توجه به روابط کروم و نیکل معادل بر پایه دیاگرام شفلر مقادیر فریت به دست آمده برای سیم‌جوش ER316LSi ۵/۱۴ و برای سیم‌جوش ER309LMo ۱۵/۲۲ بود که نشان از فریت بیشتر در سیم‌جوش ER309LMo دارد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- سیم‌جوش‌هایER309LMo و ER316LSiجوش‌های قابل قبولی را برای اتصال فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴L و فریتی ۴۰۹ ایجاد کرد. علاوه براین، استفاده از گاز محافظ $Ar–٪۲O_۲$ در مقایسه با $Ar–٪۲CO_۲$ پاشش کم‌تر و ظاهر جوش بهتری را موجب شده است.

۲- ساختار نهایی انجماد برای هر دو سیم‌جوش ER309LMo و ER316LSiشامل فریت اسکلتی بود. با توجه به این که نسبت کروم معادل به نیکل معادل (Cr_{Eq}/Ni_{Eq}) برای هر دو سیم‌جوش در حدود ۱/۹ است، انجماد با تشکیل فریت دلتا آغاز شده و در پایان بخشی از فریت بر اثر جدایش عناصری مانند نیکل، آستنیت در مرزهای انجمادی فریت تشکیل شده است.

۳- رشد دانه در ناحیه تحت تاثیر حرارت هر دو فلز پایه قابل مشاهده بود. با این حال، رشد دانه در فلز پایه ۴۰۹ بسیار بیشتر از آلیاژ ۳۰۴L بود. تشکیل فریت دلتا در راستای مرزدانه‌ها موجب جلوگیری از رشد دانه‌های منطقه تحت تاثیر حرارت ۳۰۴L شده است.

۴- در منطقه تحت تاثیر حرارت فولاد زنگ نزن فریتی دو نوع رسوب مشاهده شد که یک نوع آن ذرات هم‌محور TiN و نوع دیگر رسوب‌های سوزنی‌شکل با ترکیب تقریبی TiC بود که به صورت منظم و در راستاهای عمود بر هم تشکیل شده بود. گمان می‌رود، رسوب‌های نوع دوم حاصل تحول رسوب‌های از پیش‌موجود TiC در ریزساختار بر اثر سرعت زیاد گرمایش و سرمایش حین جوشکاری باشد.

۵- تنش تسلیم و استحکام کششی نمونه‌های کشش منطبق بر خواص استحکامی فولاد ۴۰۹ بود و شکست تمام نمونه‌ها از سمت این فلز به وقوع پیوست.

۶- سختی بدست آمده از مناطق تحت تاثیر حرارت دو فلز پایه نشان دهنده افت سختی در این نواحی نسبت به فلز پایه بود که می‌تواند به دلیل رشد دانه در این مناطق باشد. با این حال، سختی در منطقه تحت تاثیر حرارت در سمت فلز پایه ۳۰۴L بیش از سختی منطقه تحت تاثیر حرارت فولاد ۴۰۹ است. همچنین، سختی در سیم‌جوشER309LMo کم‌تر از سختی در

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

سیم‌جوش ER316LSi است. این پدیده می‌تواند بر اثـر فریـت بیشتر موجود در این فلز جوش باشد.

منابع

1- Faivre, L., Santacreu, P. and Leseux, J., "Thermal Fatigue Resistance of Welded Joints in Stainless Steel High Temperature Exhaust Applications", *Tecnologiaem Metalurgia, Materiais e Mineracao*, Vol. 8, pp. 24-30, 2011.

2- Takuda, H., Mori, K., Masachika, T., Yamazaki, E. and Watanabe, Y., "Finite Element Analysis of the Formability of an AusteniticStainless Steel Sheet inWarm Deep Drawing", *Journal of Materials Processing and Technology*, Vol. 143-144, pp. 242-248, 2003.

3- Carry, H.B., Modern Welding Technology, 2nd edition, American Welding Society, NJ, USA, 1981, p. 497.

4- Karc, F., Kacar, R. andGunduz, S.,"The Effect of Process Parameter on the Properties of Spot Welded Cold Deformed AISI304 Grade Austenitic Stainless Steel",*Journal of Materials Processing and Technology*, Vol. 209, pp. 4011-4019, 2009.

5- Lippold, J.C. and Kotecki, D.J., "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels", John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 30, 2005.

6- Palani, P.K. and Murugan, N., "Selection of Parameters of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol, 172, pp. 1-10, 2006.

7- Soonrakh, R.and Poopat, B., "Effect of Oxygen Addition in Argon/Carbon Dioxide Gas Mixture on Metal Transfer Behavior in Gas Metal Arc Welding", *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Vol, 4, pp. 50-54, 2016.

8- Tasalloti, H., Kah, P. and Martikainen, J., "Effects of Welding Wire and Torch Weaving on GMAW of S355MC and AISI 304L Dissimilar Welds", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, pp. 197-205, 2014.

9- Kou, S., "Welding Metallurgy", 2nd edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003, p. 216, 279-281.

10- Davis, J.R., "Metals Handbook: Desk Edition" , 2nd edition, ASM International, Ohio,1998.

12- Cahn, R.W. and Hansen, P., "Physical Metallurgy", 4th edition, North-Holland, Amsterdam, pp. 1437, 1996.

13- Humphreys, F.J. and Hatherly, M, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", 2nd edition, Elsevier, Amsterdam, pp. 363, 2004.

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