

## جوشکاری غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن آستینیتی 304L به فولاد زنگ‌نزن فریتی 409 با فرآیند GMAW و سیم‌جوش‌های ER316LSi و ER309LMo

مرتضی عباسی، حمیدرضا نجفی دژده منفرد\*، علیرضا خداپنده

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 409 با فرآیند GMAW با دو ترکیب از گازهای آرگون-اکسیژن و آرگون-دی اکسید کربن بررسی شده است. برای این منظور، سیم‌جوش‌های ER316LSi و ER309LMo با توجه 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<sub>2</sub> حاصل شد. نتایج آزمون‌های کشش نشان‌دهنده تنش تسلیم و استحکام کششی به ترتیب ۲۸۸ و ۴۲۴ MPa و وقوع شکست در سمت فولاد فریتی 409 بود. میکروسختی‌سنجی نیز نشان‌دهنده حصول بیشترین سختی در فلز جوش ER316LSi بین ۱۹۰ تا ۲۰۰ HV<sub>۰.۰۵</sub> و کمترین سختی در منطقه تحت تاثیر حرارت فولاد فریتی 409 (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 الکتروود فلزی تحت گاز محافظ (GMAW)، فولاد زنگ‌نزن آستینیتی 304L، فولاد زنگ‌نزن فریتی 409، سیم جوش ER316LSi، 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: [hnejafi@sbiau.ac.ir](mailto:hnejafi@sbiau.ac.ir)

## Abstract

Dissimilar welding of AISI 304L austenitic stainless steel to AISI 409 ferritic stainless steel with GMAW process using two Ar-O<sub>2</sub> and Ar-CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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 محیط‌های خوردنده 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 معمولاً از چدن‌های نشکن پرسلیسیم 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 در نتیجه 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 زنگ‌نزن 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 زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴L و فریتی ۴۰۹ با ضخامت ۳ mm تهیه شد. آنالیز شیمیایی فلزات پایه در جدول (۱) آورده شده است. ریزساختار ورق ۳۰۴L شامل فریت دلتای کشیده‌شده در راستای نورد و دوقلوئی‌های آنیلی بود (شکل ۱). ریزساختار فولاد ۴۰۹ شامل دانه‌های آنیل شده بود که در شکل (۲) نشان داده شده است. علاوه بر این، چنان‌که در شکل (۲) نشان داده شده است در

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

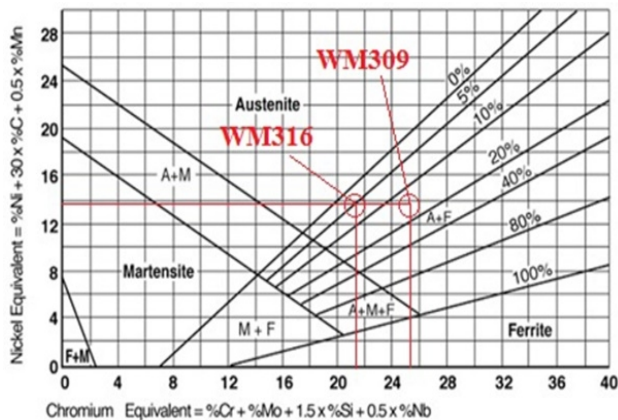
فلز پایه	USN No.	%C	%Cr	%Mn	%Si	%Ni	%S	%P	سایر (%)
۳۰۴L	S30403	۰/۰۳	۱۷/۴	۱/۵۳	۰/۵	۸/۲۲	۰/۰۰۵۱	۰/۰۴۵	Mo (۰/۲۵)
۴۰۹	S40900	۰/۰۴۸۶	۱۰/۹	۰/۴۷۵	۰/۷۵	۰/۱۱۳	<۰/۰۰۰۷	۰/۰۲۸۱	Ti (۰/۱۷۸)

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. 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.

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb \quad (1)$$

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

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



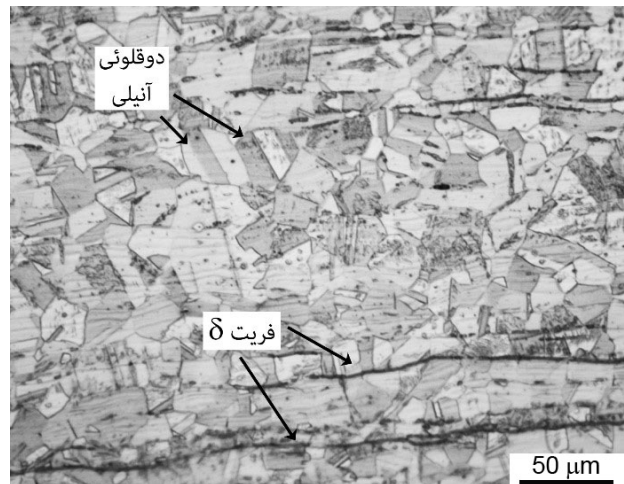
شکل 3- دیاگرام شفلر و ترکیب تخمینی فلزات جوش حاصل از

سیم جوش های ER316LSi و ER309LMo [1].

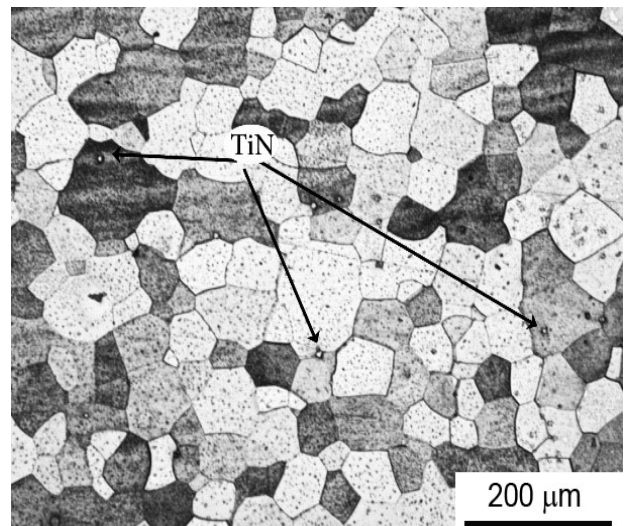
## 2-2- جوشکاری

جوشکاری به وسیله فرآیند GMAW دستی با دو ترکیب گاز محافظ  $Ar-20\%CO_2$  و  $Ar-20\%O_2$  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 نمونه های جوشکاری شده

ریزساختار این فولاد رسوب های نسبتاً درشتی از نوع TiN دیده می شود.



شکل 1- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فلز پایه فولاد آستینیتی 304 L (فريت d و دوقلوئی های آنیلی با پیکان مشخص شده اند).



شکل 2- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فلز پایه فولاد فرتی 409 (پیکان ها نشان دهنده رسوب های TiN است).

انتخاب دو فلز پرکننده بر پایه دیاگرام و روابط شفلر (شکل ۳ و روابط ۱ تا ۳) صورت گرفت [۵]. هدف، انتخاب پرکننده هایی بود که پس از انجماد حاوی ۵ تا ۱۵٪ فريت دلتا باشند. برای

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	-

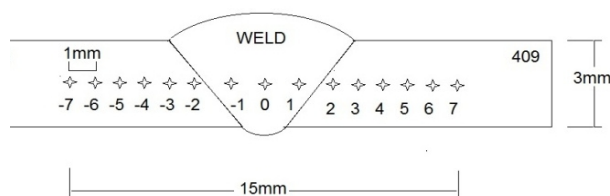
جدول ۳- کروم معادل، نیکل معادل فلزات پایه فلزات پرکننده و فلزات جوش

پرکننده	Ni <sub>eq</sub> 304 L	Cr <sub>eq</sub> 304 L	Ni <sub>eq</sub> 409	Cr <sub>eq</sub> 409	فلز پرکننده	Ni <sub>eq</sub>	Cr <sub>eq</sub>	فلز جوش	Ni <sub>eq</sub>	Cr <sub>eq</sub>	عدد فریت
ER316LSi	۱۰/۱۰	۱۸/۴۰	۱/۸۰	۱۲/۰۳	۱۶/۱۵	۲۳/۹۸	۱۳/۹۰	۲۱/۳۴	۲۱/۳۴	۲۳/۹۸	۵/۱۴
ER309LMo	۱۰/۱۰	۱۸/۴۰	۱/۸۰	۱۲/۰۳	۱۶/۱۵	۲۸/۷۸	۱۳/۹۰	۲۴/۷۰	۲۴/۷۰	۲۸/۷۸	۱۵/۲۲

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- گاز محافظ

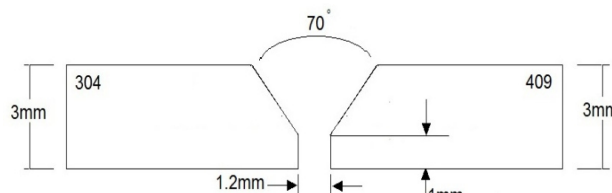
با استفاده از گاز محافظ با ترکیب  $Ar-20\% O_2$  و  $Ar-20\% CO_2$  قوس پایدار و نرم بدست آمد. کمترین میزان پاشش نیز از ترکیب گاز محافظ  $Ar-20\% O_2$  حاصل شد.



شکل 5- تصویر شماتیک نقاطی که ریزسختی سنجی انجام شده است.

شکل (۶) تصویر قطعه جوشکاری شده با سیم جوش ER316LSi با گازهای محافظ پیش گفته را نشان می‌دهد. چنان‌که در شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) قابل مشاهده است، با استفاده از گاز  $Ar-20\% O_2$  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 بر این، حضور اکسیژن پایداری بیشتر قوس و انتقال پایدارتر مذاب را در پی خواهد داشت. شکل (۷) تصویر ماکروسکوپی قطعات جوشکاری شده با گاز محافظ  $Ar-20\%$  با سیم جوش‌های ER309LMo و ER316LSi را 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

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



شکل 4- طرح اتصال نمونه های جوشکاری شده

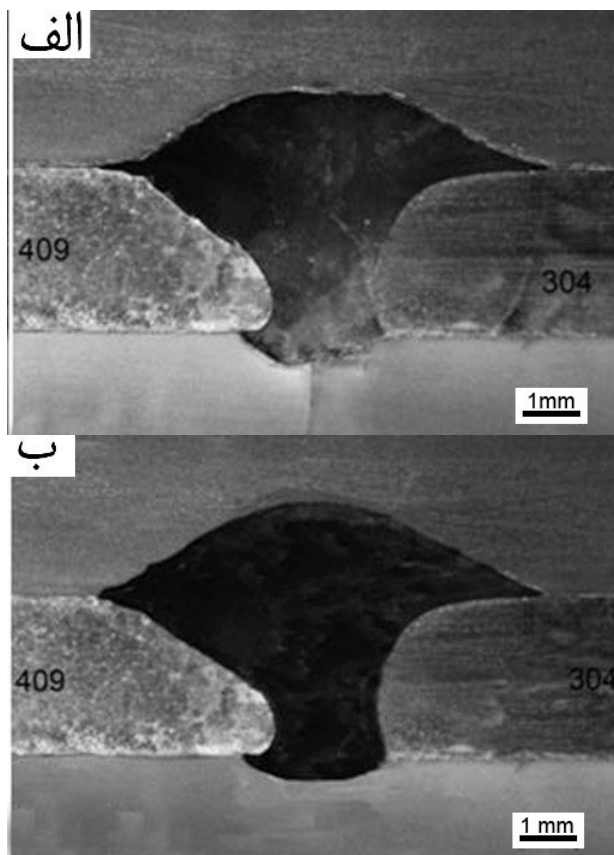
#### 3-2- بررسی‌های ریزساختاری

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

#### 4-2- آزمون‌های مکانیکی

برای هر حالت دو نمونه کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8M به‌گونه‌ای آماده شدند تا فلز جوش دقیقاً در وسط نمونه‌ها قرار گیرد. سرعت حرکت فک‌ها در این آزمون برابر با 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 گزارش شده، میانگین سه سختی سنجی در هر موضع است.

تشکیل شده است. تشکیل فریت دلتا در مرحله ابتدایی انجماد تاثیر مثبتی بر مقاومت جوش ایجاد شده به ترک انجمادی خواهد داشت. حد حلالیت عناصری مانند فسفر و گوگرد (که موجب افزایش دامنه انجمادی می شوند) در فریت به 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 باقی مانده کاهش خواهد یافت. با کاهش مقدار گوگرد و فسفر مذاب، دامنه انجمادی و در نتیجه حساسیت به ترک انجمادی کاهش خواهد یافت [۹].

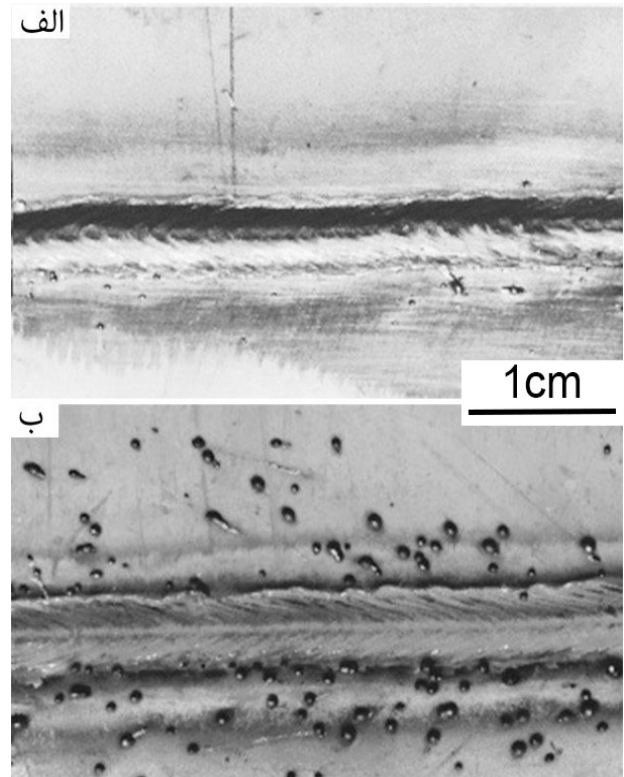


شکل 7- تصویر ماکروسکوپی قطعات جوشکاری شده با گاز محافظ  $Ar-20\%O_2$  و سیم جوش: (الف) ER316LSi و (ب) ER309LMo.

### 3-3- ریزساختار منطقه تحت تاثیر حرارت

چنانچه در شکل (الف-۹) نشان داده شده است، در HAZ فلز پایه ۳۰۴L رشد دانه‌ها بسیار اندک است. از طرف دیگر، بررسی ریزساختار نشان دهنده تشکیل فریت در این ناحیه اغلب در امتداد مرز دانه‌ها است. فریت بوجود آمده در مرز دانه‌های منطقه

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 جوشکاری شده با سیم جوش ER316LSi

گازهای محافظ (الف)  $Ar-20\%O_2$

(ب)  $Ar-20\%CO_2$

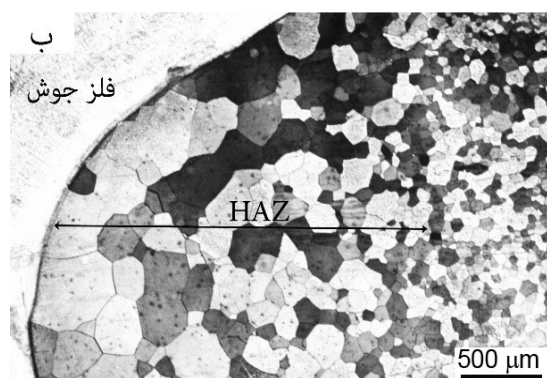
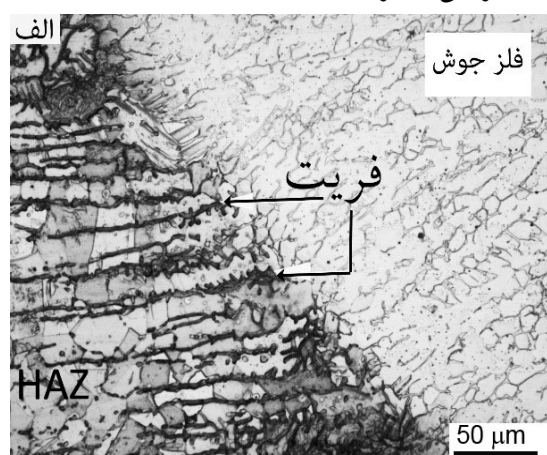
### 2-3- بررسی ریزساختاری فلز جوش

نسبت کروم معادل به نیکل معادل ( $Cr_{Eq}/Ni_{Eq}$ ) برای هر دو سیم جوش در حدود ۱/۹ است. شکل (۸) تصویر میکروسکوپی نوری منطقه جوش حاصل از پرکننده‌های ER309LMo و ER316LSi را نشان می‌دهد. چنانچه در این شکل مشخص است، ساختار نهایی انجماد برای هر دو سیم جوش 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

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

ردیف	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 الکتروود (mm)	قطر الکتروود (mm)	قطبیت
۱	ER309LMo	۱۶	۹۰	۲/۸	۱۵	Ar-۲O <sub>۲</sub>	۱۸	۱۲	۱/۲	DCEP
۲	ER309LMo	۱۶	۸۸	۲/۸	۱۵	Ar-۲CO <sub>۲</sub>	۱۸	۱۲	۱/۲	DCEP
۳	ER316LSi	۱۶	۱۰۰	۲/۸	۱۵	Ar-۲O <sub>۲</sub>	۱۸	۱۲	۱/۲	DCEP
۴	ER316LSi	۱۶	۱۰۰	۲/۸	۱۵	Ar-۲CO <sub>۲</sub>	۱۸	۱۲	۱/۲	DCEP

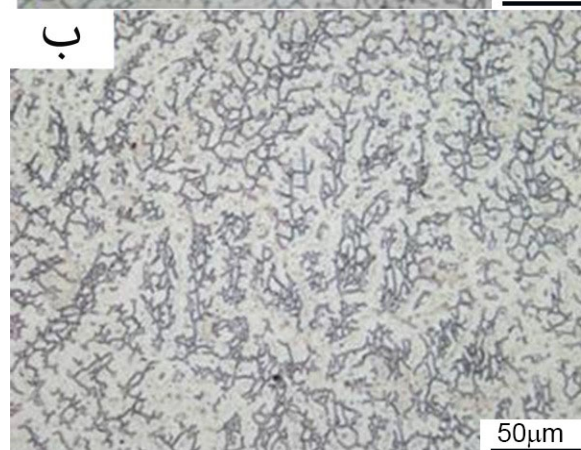
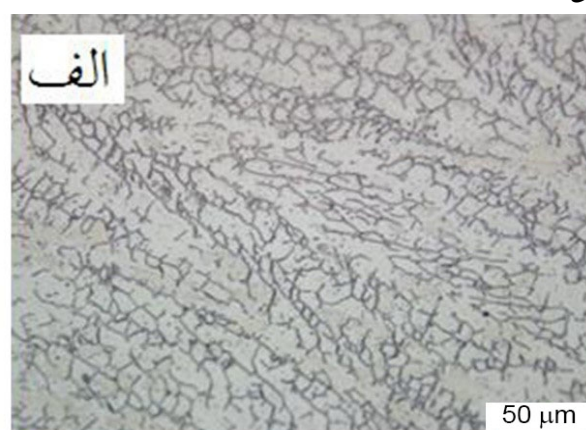
(شکل ۹-ب). دلیل رشد قابل توجه دانه در فولاد زنگ‌نزن فریتی در مقایسه با فولاد زنگ‌نزن آستنیتی تک‌فاز بودن و هدایت حرارتی بیشتر آن است.



شکل ۹- تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار منطقه تحت تاثیر حرارت فلز پایه نمونه 1: (الف) فولاد فریتی 409 و (ب) فولاد آستنیتی 304L.

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

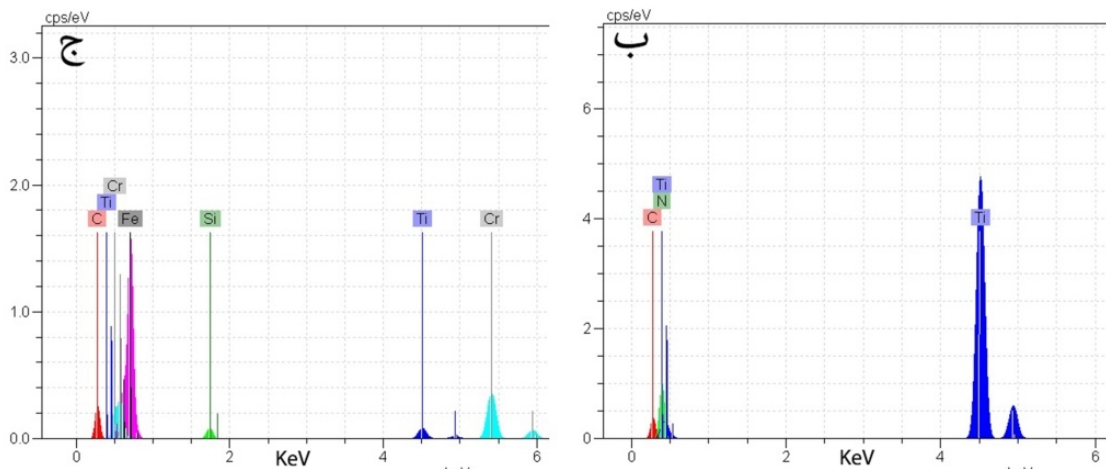
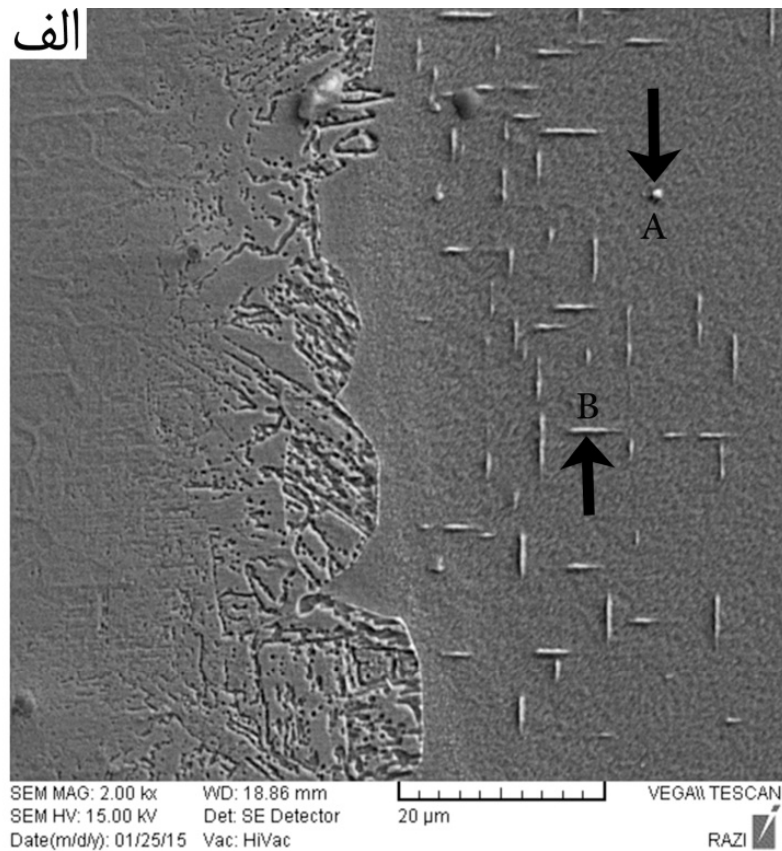
تحت تاثیر حرارت سبب جلوگیری از رشد دانه‌ها شده، همچنین حساسیت این منطقه به ترک‌گداز<sup>۱</sup> را به حداقل می‌رساند [۹].



شکل ۸- تصویر میکروسکوپی نوری منطقه جوش: (الف) نمونه 1 و (ب) نمونه 3.

با این حال، در فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۰۹ دانه‌های فریت رشد کرده و منطقه تحت تاثیر حرارت درشت دانه بوجود آمده است

1 - Liquation



شکل ۱۰- الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی منطقه تحت تاثیر حرارت فلز پایه ۴۰۹ نمونه ۴،

ب) آنالیز عنصری رسوب A و ج) آنالیز عنصری رسوب B.

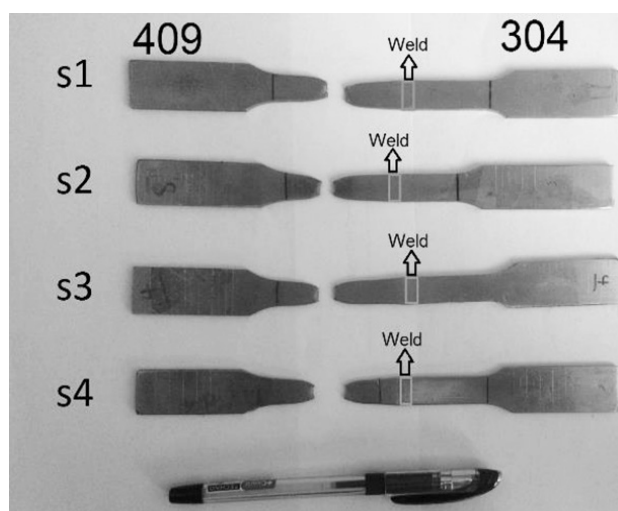
فولاد ۳۰۴L تاثیر مثبتی بر پیش‌گیری از رشد دانه خواهد داشت. میکروسکوپی الکترونی روبشی منطقه تحت تاثیر حرارت فلز پایه ۴۰۹ نشان‌دهنده دو نوع رسوب بود. نوع اول به نظر از همان رسوب‌هایی بود که در فلز پایه وجود داشت. رسوب A در شکل (الف-۱۰) نمونه‌ای از این رسوب‌ها را نشان می‌دهد.

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

این ترتیب رسوبها در امتداد صفحات خاص کریستالی رشد می کنند که نتیجه آن شکل سوزنی رسوبها خواهد بود [۱۳]. جهت گیری منظم این رسوبها (عمود بودن جهت رشد آنها بر هم) می تواند اثبات کننده رشد این رسوبها در امتداد صفحات مشخص کریستالی باشد.

### 3-4- ویژگی های مکانیکی

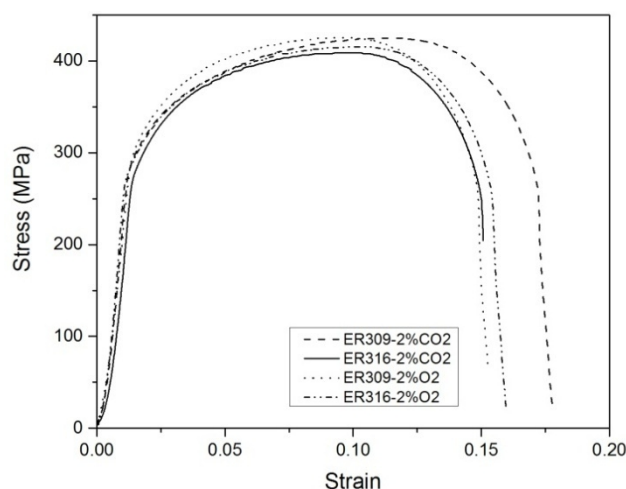
شکل ۱۱ منحنی های تنش- کرنش مهندسی را برای نمونه های مختلف نشان می دهد. تنش تسلیم و استحکام کششی نمونه ها به تقریب برابر ۲۸۸ و ۴۲۴ MPa منطبق بر خواص استحکامی فولاد ۴۰۹ بود. با بررسی نمونه ها مشخص شد که تمام نمونه ها از منطقه فلز پایه ۴۰۹ شکسته شده اند (شکل ۱۲). بنابراین، به نظر می رسد سیم جوش های بکار رفته می توانند استحکام مورد نظر را برآورده سازند.



شکل ۱۲- محل شکست نمونه های کشش.

شکل (۱۳-الف) ریزسختی های بدست آمده از نمونه های جوشکاری شده با پرکننده ER309LMo را نشان می دهد. با توجه به ریزسختی های بدست آمده، کمترین مقدار سختی مربوط به منطقه تحت تاثیر حرارت فلز پایه ۴۰۹ می باشد. این پدیده می تواند به دلیل رشد دانه ها در این منطقه باشد. سختی در منطقه تحت تاثیر حرارت در سمت فلز پایه ۳۰۴L نیز از کمتر از فلز پایه می باشد، اما همچنان بیش از سختی منطقه تحت تاثیر حرارت فولاد ۴۰۹ است. بیشترین عدد ریزسختی

شکل (۱۰-ب) نتیجه آنالیز نقطه ای این رسوب را به تصویر کشیده است. چنان که 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 می گردد. 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 نمونه ای از این رسوبها (رسوب B) در شکل (۱۰-ج) نشان داده شده است. با بررسی عناصر موجود، می توان به این نتیجه رسید که این رسوبها از تیتانیوم و کربن تشکیل شده اند.



شکل ۱۱- منحنی های تنش - کرنش نمونه های جوشکاری شده.

بنابراین، گمان می رود این رسوبها ذرات TiC باشند. با توجه به حضور تیتانیوم در ترکیب شیمیایی فولاد ۴۰۹ وجود این رسوبها پیش از جوشکاری در ریزساختار محتمل به نظر می رسد. گرمایش حاصل از جوشکاری تمایل به انحلال را در این رسوبها (که دارای پایداری حرارتی کمتری از TiN هستند) بوجود می آورد. چنان که در متون متالورژی فیزیکی تصریح شده، پیش از انحلال، رسوبها درشت می شوند به گونه ای که رسوبهای ریز حل شده و رسوبهای بزرگ درشت می شوند. این پدیده Ostwald Ripening نامیده می شود [۱۱ و ۱۲]. با این حال، سرعت بالای گرمایش در جوشکاری، فرصت کافی برای رشد یکنواخت را به رسوبها نمی دهد. به



## ۴- نتیجه گیری

۱- سیم جوش های ER309LMo و ER316LSi جوش های قابل قبولی را برای اتصال فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴L و فریتی ۴۰۹ ایجاد کرد. علاوه بر این، استفاده از گاز محافظ  $Ar-20\%CO_2$  در مقایسه با  $Ar-2\%CO_2$  پاشش کم تر و ظاهر جوش بهتری را موجب شده است.

۲- ساختار نهایی انجماد برای هر دو سیم جوش ER309LMo و ER316LSi شامل فریت اسکلتی بود. با توجه به این که نسبت کروم معادل به نیکل معادل ( $Cr_{Eq}/Ni_{Eq}$ ) برای هر دو سیم جوش 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.

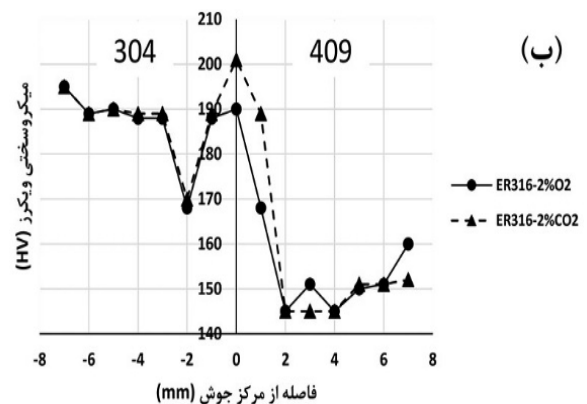
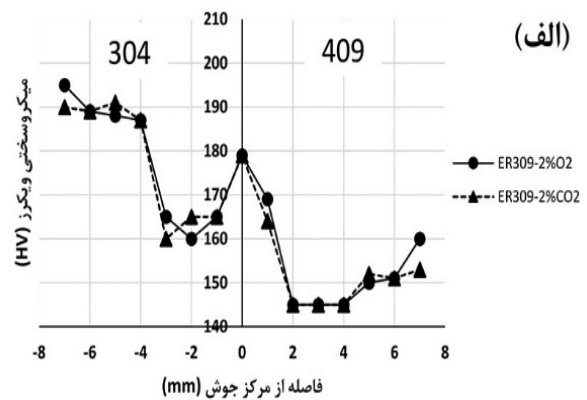
۳- رشد دانه در ناحیه تحت تاثیر حرارت هر دو فلز پایه قابل مشاهده بود. با این حال، رشد دانه در فلز پایه ۴۰۹ بسیار بیشتر از آلیاژ ۳۰۴L بود. تشکیل فریت دلتا در راستای مرز دانه ها موجب جلوگیری از رشد دانه های منطقه تحت تاثیر حرارت ۳۰۴L شده است.

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

۵- تنش تسلیم و استحکام کششی نمونه های کشش منطبق بر خواص استحکامی فولاد ۴۰۹ بود و شکست تمام نمونه ها 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 می تواند 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 سیم جوش ER309LMo کم تر از سختی در

نیز در فلز جوش بدست آمد. شکل (۱۳-ب) ریزسختی های بدست آمده از نمونه جوشکاری شده با سیم جوش ER316LSi را نشان می دهد که سختی در آن به ۲۰۰ HV رسیده است. عدد سختی بدست آمده برای مناطق تحت تاثیر حرارت در هر دو فلز پایه مشابه اعداد بدست آمده با سیم جوش ER309LMo می باشد.



شکل 13- پروفیل سختی:

(الف) نمونه های 1 و 2 و (ب) نمونه های 3 و 4.

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

- 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", 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2003, p. 216, 279-281.
- 10- Davis, J.R., "Metals Handbook: Desk Edition", 2<sup>nd</sup> edition, ASM International, Ohio, 1998.
- 12- Cahn, R.W. and Hansen, P., "Physical Metallurgy", 4<sup>th</sup> edition, North-Holland, Amsterdam, pp. 1437, 1996.
- 13- Humphreys, F.J. and Hatherly, M., "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", 2<sup>nd</sup> edition, Elsevier, Amsterdam, pp. 363, 2004.

سیم جوش ER316LSi است. این پدیده می تواند بر اثر فریت 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 Austenitic Stainless Steel Sheet in Warm Deep Drawing", *Journal of Materials Processing and Technology*, Vol. 143-144, pp. 242-248, 2003.
- 3- Carry, H.B., *Modern Welding Technology*, 2<sup>nd</sup> edition, American Welding Society, NJ, USA, 1981, p. 497.
- 4- Karc, F., Kacar, R. and Gunduz, 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.