

بهبود خواص مکانیکی و حساسیت به ترک داغ در جوش‌های فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ با اعمال لرزش الکترومغناطیس همزمان با جوشکاری

امین قدم دزفولی^۱، سید رضا علوی زارع^{۲*}، رضا دهملایی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۰، ش.ص: ۱۴۸-۱۳۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۰۴)

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر اعمال همزمان لرزش الکترومغناطیس تحت ولتاژهای ۰، ۱۵، ۳۰ ولت همزمان با انجام فرآیند جوشکاری روی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ بر خواص ریزساختار، خواص مکانیکی و حساسیت به ترک گرم بوده است. بررسی‌های ریزساختاری انجام شده توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ روبشی الکترونی نشان داد که اعمال لرزش الکترومغناطیس همزمان باعث ریزتر شدن دانه‌ها و تغییر ساختار انجمادی از ستونی به هم محور و همچنین گسترش ناحیه دندریتی هم‌محور در فلز جوش گردیده است. دلیل این رویداد شکسته شدن نوک دندریت‌ها و افزایش مراکز جوانه‌زنی غیر همگن در مذاب و در نتیجه افزایش تعداد جوانه‌ها در حین انجماد مذاب جوش تشخیص داده شد. اندازه‌گیری سختی در فلز جوش حاکی از افزایش سختی در اثر اعمال لرزش حین انجماد بوده است. همچنین نتایج آزمون ضربه روی نمونه‌های جوش نشان داد که در اثر اعمال لرزش الکترومغناطیس تحت ولتاژهای متفاوت انرژی ضربه‌ای از ۱۱۲ ژول به ۱۳۶ ژول افزایش یافته است و به عبارت دیگر، بهبود چقرمگی شکست در نمونه‌های با لرزش رخ داده است. نتایج آزمون وارسترینت طولی نشان داد که با اعمال لرزش الکترومغناطیس در حین فرآیند جوشکاری این فلز حساسیت به ترک داغ فلز جوش کاهش و به عبارت دیگر جوش‌پذیری بهبود یافته و همچنین مجموع طول ترک‌ها در آن و طول بزرگ‌ترین ترک در جوش نیز کم‌تر گردیده است.

واژه‌های کلیدی: لرزش الکترومغناطیس، دندریت، ترک داغ، آزمون وارسترینت، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی.

^۱ - دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ - استادیار گروه مهندسی مواد دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز

*-نویسنده مسئول مقاله: alavizaree@gmail.com

پیشگفتار

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی متداول‌ترین نوع فولادهای زنگ‌نزن هستند که به دلیل مقاومت به خوردگی عالی و قابلیت جوش‌پذیری مناسب کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند [۱]. فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ AISI با دارا بودن ویژگی‌های مثبتی نظیر ارزان قیمت بودن و خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی خوب جزو پرکاربردترین آلیاژهای فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به شمار می‌رود [۲]. از روش‌های مختلف ذوبی و حالت جامد برای جوشکاری این فولادها استفاده می‌شود که مرسوم‌ترین این روش‌ها، جوشکاری قوس الکترود تنگستنی تحت گاز خنثی (GTAW) می‌باشد. ساختار انجمادی فلزات جوش عمدتاً به صورت دندریتی و همراه با مقادیر بالایی جدایش عنصری می‌باشد که این دو عامل باعث کاهش چشمگیر خواص مکانیکی فلز جوش نسبت به فلز پایه می‌شوند [۳]. برای جلوگیری از رشد دندریت‌ها و درشت شدن آن‌ها هنگام انجماد، از روش‌های مختلفی نظیر جوشکاری با جریان پالسی، استفاده از مواد جوانه‌زا در حوضچه مذاب و لرزش حوضچه جوش در حین جوشکاری، می‌توان بهره برد [۴]. با توجه به تأثیر بالای اعمال لرزش همزمان با جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی فلز جوش، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام گرفته است. لرزش در واقع یک پدیده مکانیکی است که به موجب آن در یک نقطه خاص نوسان اتفاق می‌افتد. برای ایجاد لرزش در حوضچه مذاب از روش‌های مختلفی از قبیل اعمال امواج مافوق صوت، لرزش مکانیکی و لرزش الکترومغناطیس در حین جوشکاری می‌توان استفاده کرد. در فرآیند لرزش الکترومغناطیس، قرار دادن یک سیم‌پیچ در نزدیکی قطعه هادی جریان الکتریکی، اعمال نیروی متناوب به آن، باعث ایجاد لرزش در حوضچه مذاب می‌گردد [۵ و ۶]. برخی از مزایای این روش عبارتند از: آزاد شدن گازهای محبوس شده در مذاب، توزیع مجدد عناصر حل شده در حوضچه جوش، مقاوم شدن در برابر ترک‌های انجمادی و بهبود ظاهر خط جوش [۷]. ترک خوردگی داغ یکی از مشکلات جدی در جوشکاری بسیاری از آلیاژها مانند فولادهای استحکام بالا، آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی می‌باشد. هنگام انجماد فلز جوش، در محدوده دمایی تردی، به دلیل انقباض ناشی از

انجماد فلز جوش و نیز انقباض فلز پایه به دلیل سرد شدن، تنش‌های کششی به فلز جوش وارد می‌شود. چنانچه مقاومت فلز جوش در برابر ترک کم‌تر از نیرو محرکه ایجاد ترک باشد، ترک داغ ایجاد می‌شود [۸]. آزمون وارسترینت از جمله آزمایش‌های مهم جوش‌پذیری است که به منظور ارزیابی حساسیت به ترک داغ فلزات پایه و اتصالات جوش استفاده می‌شود. اساس این آزمون بر مبنای اندازه‌گیری حداکثر طول ترک یا مجموع طول ترک‌های ایجاد شده در حین انجام آزمون است [۹]. پیرس و کر [۱۰] با استفاده از همزدن حوضچه مذاب به روش الکترومغناطیس، میزان ریزدانه شدن آلیاژهای آلومینیوم حاوی مقدار کمی تیتانیوم را افزایش دادند. دیویس و گارلند [۱۰] با ایجاد لرزش در مشعل جوشکاری توانستند به ساختار ریز دانه در فلز جوش آلیاژ ۲.۵Mg-AI جوشکاری دست یابند. نتایج بیانگر بهبود مقاومت فلز جوش در برابر ترک‌های انجمادی بود. در تحقیقی دیگر، اثر لرزش الکترومغناطیس بر جوش‌پذیری آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد لرزش الکترومغناطیس با افزایش انتقال حرارت، سبب افزایش سرعت سرد شدن و نهایتاً ریزدانه‌گی فلز جوش شد که نتیجه آن جلوگیری از ایجاد ترک‌های انجمادی گردید [۱۲]. دانگ و همکاران [۱۳] طی پژوهشی ثابت کردند که اعمال لرزش الکترومغناطیس در حین جوشکاری به دلیل کم کردن محدوده دمایی تردی سبب افزایش مقاومت فلز جوش در برابر ترک خوردگی داغ می‌شود. در پژوهشی دیگر، بالاسابرامانین و همکاران [۱۴] تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس در حین جوشکاری بر ایجاد ترک‌های داغ در آلیاژ آلومینیوم AA7075 را بررسی کردند. نتایج نشان داد اعمال لرزش الکترومغناطیس با ریزدانه کردن فلز جوش، مقاومت در برابر ترک داغ را به طور چشمگیر بهبود بخشید. دهملایی و همکاران [۱۵] با اعمال لرزش الکترومغناطیس در حین جوشکاری توانستند منطقه مخلوط نشده در جوشکاری غیر مشابه آلیاژ مقاوم به حرارت 25Cr-35Ni به سوپر آلیاژ ۸۰۰ را به طور کامل حذف نمایند. در پژوهش حاضر، اثرات اعمال لرزش الکترومغناطیس همزمان با جوشکاری بر خواص مکانیکی و حساسیت به ترک داغ اتصالات جوش فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

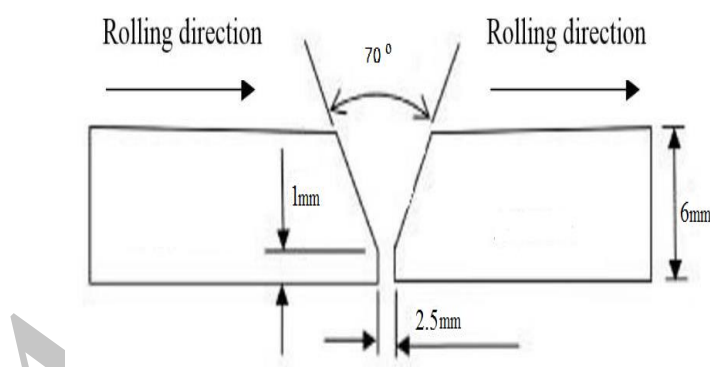
همزمان لرزش الکترومغناطیس در حین جوشکاری بدون پیشگرم و با قطبیت منفی مطابق با متغیرهای آورده شده در جدول ۲ انجام شد. جهت ایجاد شدت‌های متفاوت از لرزش الکترومغناطیس، سه ولتاژ ۰، ۱۵ و ۳۰ ولت به دستگاه لرزش اعمال گردید. تصویر شماتیکی از دستگاه اعمال کننده لرزش در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این پژوهش از ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ به ضخامت ۶ میلی‌متر به عنوان فلز پایه و سیم جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ER309L به عنوان فلز پرکننده استفاده شده است. جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده را نشان می‌دهد.

طرح اتصال به صورت جناغی یک طرفه با زاویه پخ 70° با فاصله ریشه ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد (شکل ۱). جوشکاری نمونه‌ها به روش GTAW به همراه اعمال

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

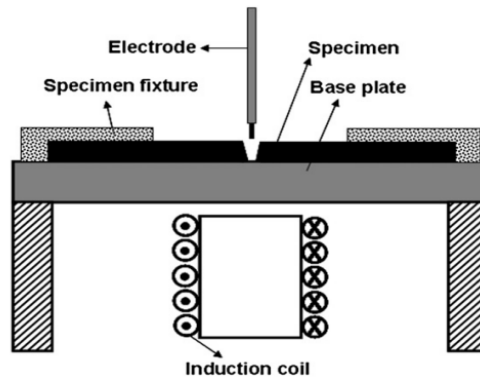
درصد وزنی	C	Si	Mn	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Fe
SS ۳۰۴	۰/۰۴	۰/۳۴	۱/۱	۰/۰۲	۰/۱۹	۱۷/۹	۸/۳	۰/۱۲	Bal
ER۳۰۹L	۰/۰۲	۰/۷۵	۰/۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۲۳/۷	۱۳/۹	۰/۰۴	Bal



شکل ۱- شماتیک طراحی اتصال

جدول ۲- مشخصات و متغیرهای جوشکاری

شماره نمونه	جریان (A)	سرعت جوشکاری (mm/s)	ولتاژ جوشکاری (V)	ولتاژ اعمالی به ترانس (V)	حرارت ورودی (KJ/mm)
۱	۱۱۰	۳/۳	۱۵	۰	۰/۳
۲	۱۱۰	۳/۸	۱۵	۱۵	۰/۳۳۶
۳	۱۱۰	۳/۱	۱۵	۳۰	۰/۳۹۰



شکل ۲- تصویر شماتیک دستگاه اعمال لرزش الکترومغناطیس

پرکننده بر روی جوش حاصله ایجاد شد. هنگامی که قوس جوشکاری به مکان از پیش تعیین شده‌ای روی بلوک فلزی رسید، نیرو توسط یک پیستون هیدرولیکی اعمال گردید تا نمونه کاملاً بر بلوک خمیده شده با شعاع انحنای معادل کرنش ۳٪ منطبق گردید. سپس نمونه مدت زمان محدودی در همان موقعیت خمیده نگهداری شد. در مرحله آخر توسط میکروسکوپ استریو در بزرگنمایی ۲۵ برابر از سطح قطعات عکس گرفته شد. طول بزرگ‌ترین ترک و مجموع طول ترک‌ها روی هر نمونه اندازه‌گیری شد [۱۶]. هر آزمون وارسترینت برای سه نمونه یکسان انجام گردید و میانگین نتایج حاصل به عنوان نتیجه نهایی گزارش شد.

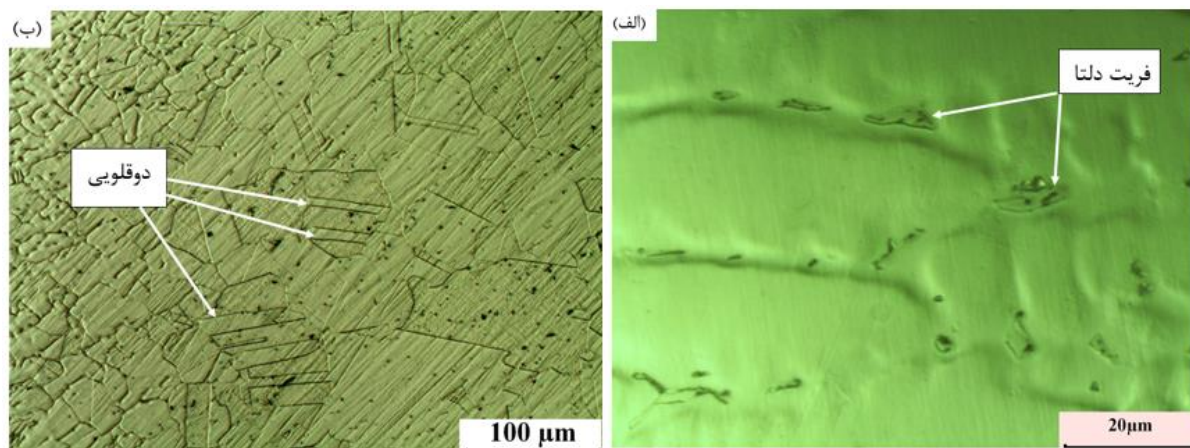
نتایج و بحث

شکل ۳ ریزساختار فلز پایه تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ریزساختار این فولاد شامل دانه‌های هم‌محور شده کاملاً آستنیتی به همراه مقادیر ناچیزی فریت‌دلتا در مرزدانه‌های آستنیت می‌باشد. این فریت از جدایش عناصر فریت‌زا (به ویژه کروم) در طی انجماد و عملیات ترمومکانیکی ناشی شده است [۱۷]. در تصویر میکروسکوپ نوری (شکل ۳-ب) از فلز پایه فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، دوقلوهای آنیلی نیز مشاهده می‌شوند. این دوقلوها هنگامی تشکیل می‌شوند که در ضمن تبلور مجدد و رشد دانه‌ها، در چینش اتم‌ها و استقرار آن‌ها بر روی صفحات

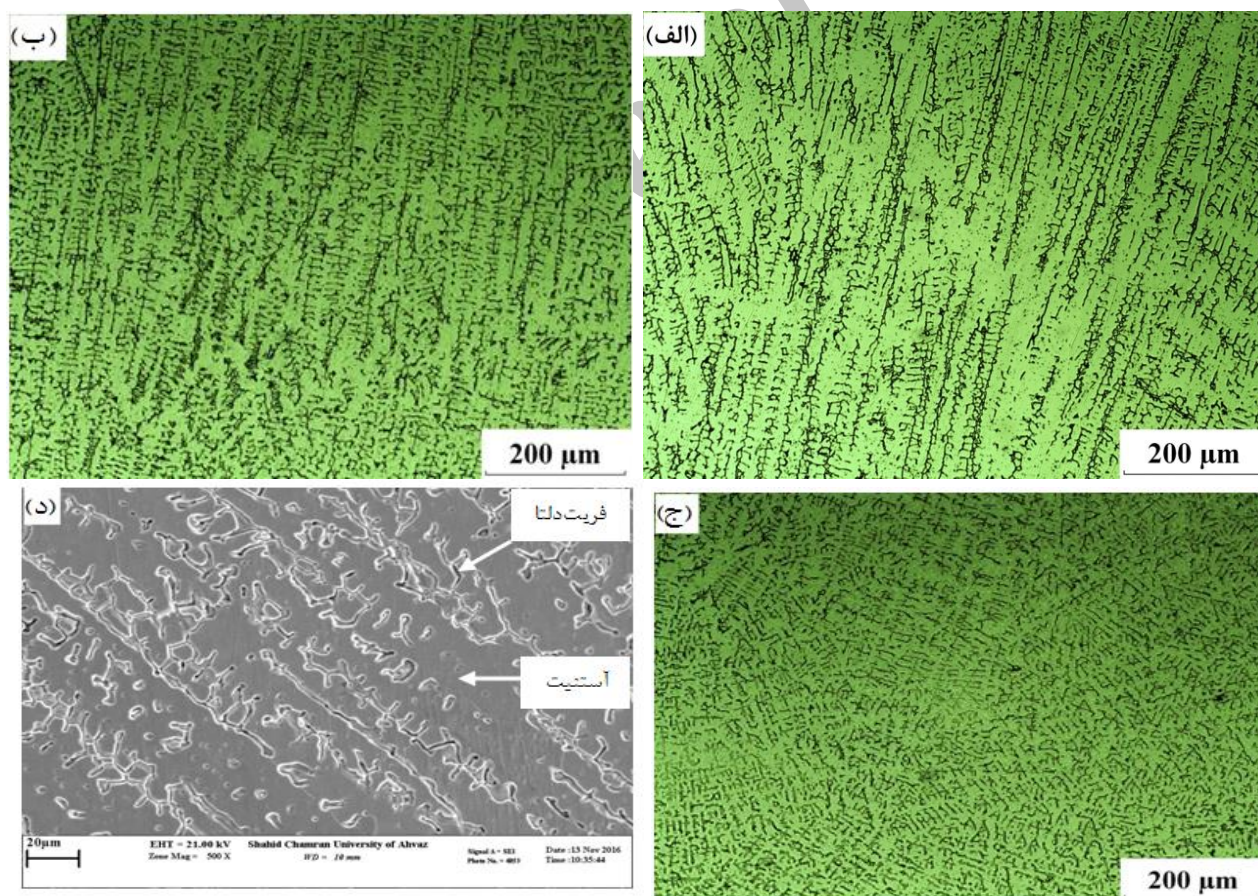
بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. به این منظور ابتدا سطح نمونه‌ها به وسیله سنباده‌های ۸۰ تا ۳۰۰۰ سنباده‌زنی و سپس با استفاده از پودر آلومینا با اندازه ذرات ۳ میکرومتر پولیش گردید. از محلول اسید اگزالیک ۱۰٪ برای الکترواچ نمونه‌ها استفاده شد. سختی نواحی مختلف فلزات جوش و پایه، با استفاده از آزمون سختی سنجی و پیکرز تحت بار اعمالی ۱۰۰ گرم و زمان بارگذاری ۱۰ ثانیه تعیین شد. برای اندازه‌گیری انرژی ضربه‌ای فلز جوش از آزمون ضربه شارپی طبق استاندارد ASTM E23 استفاده شد. از هر اتصال جوش، سه نمونه به ابعاد $۵۵ \times ۱۰ \times ۶$ میلی‌متر به طوری که جوش در وسط نمونه قرار داشت، تهیه گردید و ناچ آن در مقطع عرضی جوش ایجاد شد. ارزیابی جوش‌پذیری و حساسیت به ترک داغ با استفاده از آزمون وارسترینت طولی انجام شد. به این منظور نمونه‌های استاندارد به ابعاد $۱۵۰ \times ۲۵ \times ۳/۲$ میلی‌متر برش داده شد. سپس در وسط هر یک از این قطعات توسط دستگاه فرز شیاری به عمق ۲ میلی‌متر ایجاد شد. در مرحله بعد به روش GTAW و با استفاده از دستگاه اعمال کننده لرزش، با یک پاس جوشکاری، شیار ایجاد شده پر گردید تا گرده جوشی از فلز پرکننده بر روی سطح نمونه ایجاد شود. سپس گرده جوش ایجاد شده با استفاده از ماشینکاری از سطح نمونه حذف گردید. برای انجام آزمایش حساسیت به ترک داغ، نمونه در دستگاه آزمون وارسترینت قرار داده شد. در مرحله بعد یک خط جوش با روش GTAW بدون فلز

همراه مقداری فریت دلتا دیده می‌شود که به صورت کرمی‌شکل روی مرز دانه‌های آستنیت قرار گرفته است (مناطق تیره روی شاخه‌های دندریتی).

فشرده (۱۱۱) تغییراتی رخ دهد [۱۸]. در شکل ۴ ریزساختار فلز جوش قبل و بعد از اعمال لرزش را آورده شده است. در شکل ۴-الف ریزساختار فلز جوش ER309L شامل مناطق آستنیتی (مناطق روشن) به



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴: (الف) فریت دلتا در مرز دانه‌های آستنیت (بزرگنمایی بالاتر)، (ب) دوقلویی‌های آنیلی در فلز پایه (بزرگنمایی کم‌تر)



شکل ۴- تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس بر ریزساختار فلز جوش: (الف) بدون اعمال لرزش، (ب) با لرزش ۱۵ ولت، (ج) با لرزش ۳۰ ولت، (د) تصویر SEM از ریزساختار فلز جوش بدون اعمال لرزش

در این رابطه D ، رقت و X_F ، X_B ، X_W و X_F به ترتیب درصد کروم یا نیکل در فلز جوش (حاصل از آنالیز کوانتومتری)، فلز پایه و فلز پرکننده هستند که با استفاده از کروم و نیکل معادل، میزان رقت ۳۰ درصد به دست آمد. با استفاده از دیاگرام WRC-1992 (شکل ۵) و میزان رقت ۳۰ درصد، مد انجمادی فلز جوش FA تعیین گردید و عدد فریت آن ۱۲ به دست آمد. بنابراین انجماد فلز جوش با تشکیل فریت‌دلتا به صورت دندردیتی آغاز شده و در ادامه آستنیت در مرزدهانه‌های فریت‌دلتا و مرز ذوب جوانه زده و رشد می‌کند. در طی سرد شدن بخش زیادی از فریت‌دلتا به آستنیت استحاله یافته، به گونه‌ای که ساختار نهایی (مطابق نمودار WRC-1992) شامل زمینه آستنیتی به همراه فریت‌دلتا (حدود ۸/۴ درصد معادل ۷۰ درصد عدد فریت) در مرزدهانه‌ها و روی شاخه‌های دندردیتی می‌باشد. استفاده از فریت‌اسکوپ نیز نشان داد که فلز جوش حاوی ۷/۶ درصد فریت است که تطابق نسبتاً خوبی را با نتایج حاصل از نمودار WRC-1992 نشان می‌دهد.

در جدول ۳ مقادیر نیکل و کروم معادل برای هر دو فلز پایه و فلز جوش ER309L محاسبه شده بر اساس روابط ۱ و ۲ و همچنین عدد فریت و مقادیر فریت در لرزش‌های مختلف برای هر دو فلز پرکننده آورده شده است.

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu \quad (1)$$

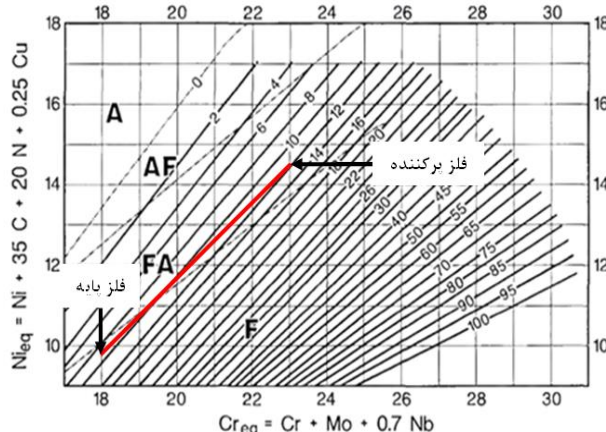
$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb \quad (2)$$

بر اساس داده‌های این جدول، فلز پایه و فلز جوش به ترتیب دارای نیکل معادل ۹/۷۴ و ۱۴/۶۱ و کروم معادل برابر ۱۸/۰۲ و ۲۳/۷۴ هستند. درصد رقت بر مبنای ۱۰۰ گرم فلز جوش و با استفاده از رابطه ۳ محاسبه گردید.

$$X_W = DX_B + (1-D)X_F \quad (3)$$

جدول ۳- مقادیر کروم، نیکل، رقت، فریت و عدد فریت فلز پرکننده ER309L در لرزش‌های مختلف

	۰ ولت	۱۵ ولت	۳۰ ولت	
Cr_W	۲۲/۰۱	۲۱/۹۹	۲۲/۲۶	
Ni_W	۱۲/۱۳	۱۲/۲۰	۱۲/۵۰	
ER309L	D	۳۰	۲۹/۵۰	۲۴/۲۰
	F_N	۱۲	۱۳	۱۵
	F	۷/۶۰	۸/۴۰	۱۰/۷۰



شکل ۵- دیاگرام WRC-1992 برای پیش‌بینی ریزساختار فلز جوش ER309L [۱۶]

توجه به تشکیل و پایداری فریت دلتا در دماهای بالاتر نسبت به آستنیت که فازی پایدار در دماهای کم‌تر می‌باشد، حد حلالیت عناصر آلیاژی در فریت دلتا نیز بیش‌تر از آستنیت خواهد بود و در نتیجه سختی بالاتری از فریت دلتا نسبت به فاز آستنیت انتظار می‌رود [۱۷]. بنابراین افزایش میزان فاز فریت‌دلتا در ساختار، سبب افزایش سختی گردیده است. از طرف دیگر، در حالت بدون اعمال لرزش الکترومغناطیس، دندریتهای فریت‌دلتا به صورت درشت و کشیده در زمینه آستنیت امتداد یافته‌اند. به دلیل عدم چسبندگی و پیوستگی مناسب فریت‌دلتا با آستنیت زمینه، چنانچه ترک در مرز بین فریت‌دلتا و آستنیت ایجاد شود به راحتی می‌تواند رشد کند و باعث شکست گردد. با افزایش ولتاژ لرزش الکترومغناطیس از ۰ تا ۳۰ ولت، دندریتهای فریت‌دلتا می‌شکنند و توزیع و پراکندگی آن‌ها در ساختار بیش‌تر خواهد شد. دندریتهای فریت‌دلتا نقش ماده تقویت‌کننده در مواد کامپوزیتی را دارند و به عنوان مانع در برابر رشد ترک عمل خواهند کرد که این اتفاق نیز سختی فلز جوش را بالاتر خواهد برد. از شکل ۶ مشاهده می‌شود که با اعمال لرزش الکترومغناطیس انرژی ضربه‌ای فلز جوش از ۱۱۲ ژول (بدون لرزش) به ۱۳۶ ژول (با لرزش تحت ولتاژ ۳۰ ولت) افزایش یافته است. دلیل این امر ریزتر بودن ساختار و بالطبع آن افزایش میزان انعطاف‌پذیری فلز جوش در اثر اعمال لرزش الکترومغناطیس می‌باشد. با افزایش ارتعاش اعمالی دندریتهای هم‌محور ریز در مرکز فلز جوش افزایش یافته و فاصله بین بازوهای دندریتی کاهش می‌یابد و این باعث بهبود انعطاف‌پذیری فلز جوش می‌گردد، لذا این موضوع باعث افزایش چشمگیر انرژی جذب شده در هنگام شکست نمونه‌ها شده است. با ریز دانه شدن ساختار تعداد مرزدانه‌ها افزایش می‌یابد و از آنجاکه مرزدانه‌ها جزو مکان‌های پر انرژی به حساب می‌آیند، به عنوان مانع محکمی در برابر اشاعه ترک عمل می‌کنند به گونه‌ای که برای رشد ترک نیاز به انرژی بالاتری می‌باشد. به اضافه با ریزتر شدن دانه‌ها، اندازه ترک اولیه کم‌تر می‌شود، زمان شکست به تعویق می‌افتد و در نهایت چقرمگی افزایش می‌یابد.

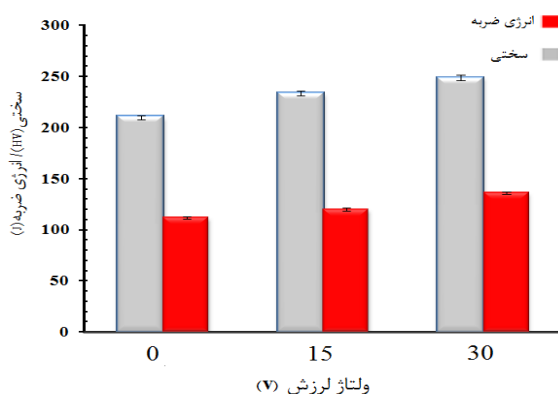
ساختار دندریتی و حضور فریت‌دلتا در ریزساختار فلز جوش توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM (شکل ۴-د) نیز مورد تأیید قرار گرفته است. مقایسه بین تصاویر میکروسکوپ نوری تحت لرزش‌های مختلف (۱۵ و ۳۰ ولت) نشان می‌دهد که اعمال لرزش الکترومغناطیس باعث ریز شدن دانه‌ها و تشکیل بیش‌تر ساختار دندریتی ریز هم‌محور و تا حدودی افزایش مقدار فریت و توزیع یکنواخت‌تر آن در فلز جوش شده است. همچنین دندریتهای ستونی درشتی که در راستای عمود بر مرز حوضچه رشد کرده‌اند (شکل ۴-الف) در اثر اعمال لرزش الکترومغناطیس (شکل ۴-ج) شکسته شده و به دندریتهای هم‌محور تبدیل شده‌اند. در واقع اعمال لرزش الکترومغناطیس باعث شکسته شدن نوک دندریتهای و جدا شدن دانه‌های نیمه ذوب شده و شناور شدن آن‌ها در حوضچه جوش می‌گردد. بنابراین مراکز جوانه‌زنی غیرهمگن افزایش یافته و این باعث ریز شدن دانه‌ها، افزایش دندریتهای هم‌محور ریز و کاهش فاصله بین بازوهای دندریتی^۱ از ۳۲/۳ به ۱۵/۱ میکرومتر (جدول ۴) در فلز جوش شده است. در شکل ۶ تغییرات سختی اتصالات جوش در شدت‌های مختلف لرزش الکترومغناطیسی را نشان داده شده است. مقایسه سختی‌های به‌دست آمده در ارتعاشات مختلف از منطقه جوش نمونه‌ها، نشان می‌دهد که بالاترین میزان سختی مربوط به نمونه ۳۰ ولت و کم‌ترین آن‌ها در نمونه بدون اعمال لرزش می‌باشد.

دلیل این افزایش سختی ساختار دندریتی ریز هم‌محور و ریز شدن دانه‌ها در نمونه‌های حاصل از لرزش با ولتاژ ۳۰ ولت نسبت به نمونه‌های بدون اعمال لرزش و نمونه‌های جوشکاری شده با لرزش ۱۵ ولت می‌باشد. این موضوع را با رابطه هال-پیچ به خوبی می‌توان تشریح کرد. بر اساس این رابطه استحکام و سختی با اندازه دانه رابطه عکس دارد؛ زیرا فاز آستنیت به دلیل داشتن ساختار FCC، انعطاف‌پذیرتر و نرم‌تر از فاز فریت‌دلتا با ساختار BCC می‌باشد که دلیل آن وجود صفحات لغزش فعال بیش‌تر در ساختار FCC است. بنابراین با کاهش اندازه دانه، سختی فلز جوش افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با

^۱ -Dendritic Arm Spacing

جدول ۴- تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس بر فاصله بین بازوهای دندریتی در فلز جوش ER309L

فاصله بین بازوهای دندریتی (میکرومتر)	ولتاژ لرزش الکترومغناطیس
۳۲/۳	۰ ولت
۲۶/۴	۱۵ ولت
۱۵/۱	۳۰ ولت

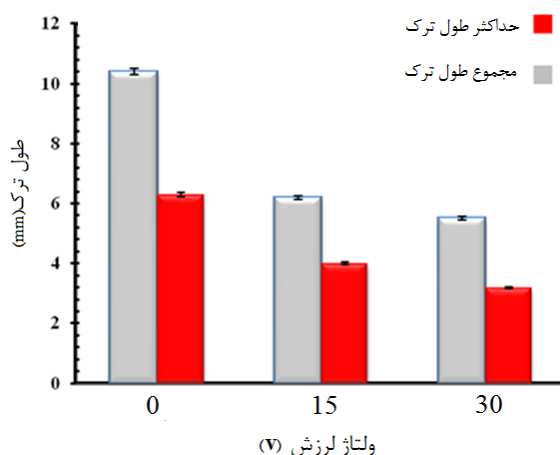


شکل ۶- تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس بر انرژی ضربه و سختی فلز جوش ER309L

داغ با معیارهای مجموع طول ترک و طول بزرگ‌ترین ترک حاصل از آزمایش وارسترینت طولی استفاده گردید. شکل ۷ نتایج آزمایش وارسترینت را برای فلزات جوش، قبل و بعد از اعمال لرزش الکترومغناطیس نشان می‌دهد. در اثر اعمال لرزش الکترومغناطیس حساسیت به ترک داغ فلز جوش ER309L کاهش یافته است. اعمال لرزش، سبب کاهش مجموع طول ترک از ۱۰/۴ میلی‌متر (بدون لرزش) به ۵/۵ میلی‌متر (با لرزش ۳۰ ولت) شده است. ترک داغ فلز جوش یکی از مشکلات رایج در جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، مخصوصاً آلیاژهایی که با مد انجمادی آستنیت (A) یا آستنیتی - فریتی (AF) منجمد می‌شوند، می‌باشد. هنگام انجماد فلز جوش در محدوده دمایی تدریجی به سبب انقباض ناشی از انجماد فلز جوش و نیز انقباض فلز پایه تنش‌های کششی به فلز جوش وارد می‌شود.

وجود مقدار کم فریت‌دلتا در ریزساختار فلز جوش اثرات مثبت و منفی متفاوتی را در پی دارد. فریت‌دلتا از طرفی باعث کاهش استعداد به ترک‌های انجمادی و بهبود مقاومت به خوردگی تنش‌ی (SCC¹) می‌شود. از سوی دیگر به دلیل عدم پیوستگی فریت‌دلتا و چسبندگی نامناسب آن با زمینه آستنیتی، اثر مخربی بر مقاومت در برابر ضربه و سختی فلز جوش دارد. همچنین از آنجا که فریت‌دلتا، فازی سخت‌تر از آستنیت است، افزایش بیش از اندازه مقدار آن در ساختار، انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه فلز جوش را کاهش خواهد داد. اعمال لرزش الکترومغناطیس، باعث توزیع بهتر و یکنواخت‌تر فریت‌دلتا در زمینه آستنیتی شده و در نتیجه افزایش مقاومت در برابر ضربه و بهبود انعطاف‌پذیری فلز جوش خواهد شد. برای ارزیابی جوش‌پذیری از شاخص حساسیت به ترک

¹ -Stress Corrosion Cracking



شکل ۷- تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس بر ایجاد ترک‌های داغ فلز جوش

ستونی درشت تغییر شکل می‌دهد. ریزساختار با دانه‌های هم‌محور ریز به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر در برابر کرنش‌ها، امکان تغذیه مؤثرتر مذاب و ترمیم ترک‌های اولیه، حساسیت کمتری نسبت به ترک داغ دارد. همچنین دانه‌های ریز به دلیل سطح دانه بیشتر، امکان تجمع کم‌تر عناصر مضر در مرز دانه را فراهم می‌نماید و در مجموع، باعث بهبود مقاومت در برابر ترک داغ می‌شوند. بنابراین اعمال لرزش الکترومغناطیس به دلیل گسترش ریزساختار دندریتی ریز هم‌محور و کاهش اندازه دانه‌ها و نیز افزایش جزئی فریت در فلز جوش، باعث کاهش حساسیت به ترک داغ گردیده است.

نتیجه‌گیری

- ۱- مد انجماد فلز جوش ER309L به صورت FA بوده و اعمال لرزش الکترومغناطیس تأثیر چندانی بر تغییر مد انجمادی نداشت.
- ۲- ریزساختار فلز جوش ER309L شامل زمینه آستنیتی به همراه فریت کرمی شکل بر روی شاخه‌های دندریتی و بین آن‌ها بوده که اعمال لرزش الکترومغناطیس اضافه بر ریز کردن دانه‌ها، باعث افزایش فریت در فلز جوش به میزان ۳/۱ درصد و توزیع یکنواخت‌تر فریت در زمینه آستنیتی گردید.

چنانچه مقاومت فلز جوش کم‌تر از تنش‌های کششی ایجاد شده باشد، ترک داغ ایجاد می‌شود. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی که در حالت فریتی - آستنیتی (FA) منجمد می‌شوند، مقاومت بالاتری در برابر ترک داغ نسبت به دیگر حالت‌های انجمادی دارند. دلیل اصلی این مقاومت خوب، حضور مخلوط دو فازی فریت و آستنیت در طول مرز دانه‌های انجمادی (SGB¹) در پایان انجماد بوده که در برابر ترشوندگی با فیلم‌های مذاب مقاومت کرده و مرزهای پیچیده (نه صاف و مستقیم) در طول مناطقی که ترک‌ها بیشتر رشد می‌کنند، به وجود می‌آورد. در نتیجه وقتی که یک ترک جوانه‌زنی می‌کند، رشد آن در طول مرزهای پیچیده بسیار مشکل است. حضور عناصر ناخالصی مانند فسفر و گوگرد، حتی در غلظت‌های پایین، ترک خوردن داغ در جوش‌های فولاد زنگ‌نزن آستنیتی را تشویق می‌کند. ناخالصی‌ها حلالیت بیشتری در فریت دلتا به عنوان فاز پایدار در دمای بالا نسبت به آستنیت به عنوان فاز پایدار در دمای کم‌تر، داشته [۱۷] که با حضور بیشتر فریت دلتا در ساختار به علت افزایش ولتاژ لرزش الکترومغناطیس، غلظت ناخالصی‌ها در مرز دانه‌های آستنیت و در نتیجه اثرات مخرب آن‌ها بر ترک خوردن داغ کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، ریزساختار دندریتی هم‌محور با مقدار زیاد مذاب در بین دانه‌ها، بسیار راحت‌تر از ساختار دندریتی

¹- Solidification Grain Boundary

۵- اعمال لرزش الکترومغناطیس، باعث کاهش حساسیت به ترک داغ (بهبود جوش‌پذیری) فلز جوش گردید و مجموع طول ترک را از ۱۰/۴ میلی‌متر در نمونه بدون لرزش به ۵/۵ میلی‌متر در نمونه تحت لرزش ۳۰ ولت کاهش داد.

۳- انجماد فلز جوش به صورت دندریتی ستونی و محوری بود که اعمال لرزش الکترومغناطیس، باعث شکست بیش‌تر دندریت‌های درشت ستونی و تشکیل بیش‌تر دندریت‌های هم‌محور ریز شد.

۴- اعمال لرزش الکترومغناطیس علاوه بر افزایش انرژی ضربه‌ای از ۱۱۲ ژول به ۱۳۶ ژول و سبب بیش‌تر شدن سختی نمونه‌ها از ۲۱۰/۶ به ۲۴۹ ویکرز به ترتیب در نمونه‌های بدون لرزش و تحت لرزش ۳۰ ولت گردید.

References:

- 1-W. S. Lee, J. I. Cheng, C. F. Lin, C. Y. Liu, "Dynamic Mechanical Properties and Fracture Behavior of a 304L Stainless Steel GTAW Joint under Shear Conditions", Material Transactions, Vol. 44, No. 12, pp. 2637-2645, 2003.
- 2-S. Kumar, A.S. Shahi, "Effect of Heat Input on The Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded AISI 304 Stainless Steel Joints", Materials & Design, Vol. 32, No. 6, pp. 3617-3622, 2011 .
- 3-P. Mithilesh, D. Varun, A.R.G. Reddy, K.D. Ramkumar, N. Arivazhagan, S. Narayanan, "Investigations on Dissimilar Weldments of Inconel 625 and AISI 304", Procedia Engineering, Vol. 75, No. 23, pp. 66-70, 2014.
- 4- S. Kou, Welding metallurgy, John Wiley & Sons, 2003.
- 5-F. Matsuda, K. Nakata, N. Sano, "Effect of Electromagnetic Stirring on Weld Solidification Structure of Austenitic Stainless Steels", Materials, Metallurgy & Weldability, Vol.23, No. 45, pp. 135-142, 1986.
- 6-C.C. Hsieh, P.S. Wang, J.S. Wang, W. Wu, "Evolution of Microstructure and Residual Stress Under Various Vibration Modes In 304 Stainless Steel Welds", Scientific World Journal, Vol. 34, No. 23, pp. 89-96, 2014.
- 7-T. Watanabe, M. Shiroki, A. Yanagisawa, T. Sasaki, "Improvement of Mechanical Properties of Ferritic Stainless Steel Weld Metal By Ultrasonic vibration", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, No. 12, pp. 1646-1651, 2010.
- 8-M. El Wahabi, J.M. Cabrera, J.M. Prado, "Hot Working of Two AISI 304 Steels: a Comparative Study", Materials Science and Engineering: A, Vol. 343, No. 1-2, 2003, pp. 116-12, 2003.
- 9-C. Lundin, C. Chou, C. Sullivan, "Hot Cracking Resistance of Austenitic Stainless Steel Weld Metals", Weld Journal, Vol. 59, No. 8, pp. 226-232, 1980.
- 10- B. P. Pearce, H. W. Kerr., "Grain Refinement in Magnetically GTA Welds of Aluminum Alloys Stirred", Metallurgical Transactions, Vol. 12B, pp. 479-486, 1981.
- 11-G.J. Davis, J.G. Garland., "Solidification Structure and Properties of Fusion Welds", International Metallurgical

Reviews, vol. 20, pp. 83–106, 1975.

12-S. Nikzad, H. Ashuri, A. Kokabi, M. Shafizadeh, K. Ferasati., "Newly developed technique to eliminate hot cracking with electromagnetic vibration for joining of 2024 aluminum alloy", *Metallography, Microstructure, and Analysis*, Vol. 5, No. 1, pp.7–15, 2016.

13-Z. Dong, Y. Wei, Y. Xu, "Predicting Weld Solidification Cracks in Multipass Welds of SUS310 Stainless Steel", *Computational Materials Science*, Vol. 38, No. 2, pp. 459-466, 2006.

14-V. Balasubramanian, V. Ravisankar, G.M. Reddy, "Effect of Pulsed Current Welding on Mechanical Properties of High Strength Aluminum Alloy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, No. 3-4, pp. 254-262, 2008.

15-R. Dehmlaei, M. Shamanian, A. Kermanpur, "Effect of Electromagnetic Vibration on The Unmixed Zone Formation In 25Cr–35Ni Heat Resistant Steel/Alloy 800 Dissimilar Welds", *Materials Characterization*, Vol. 59, No. 12, pp. 1814-1817, 2008.

16-C. Lundin, W. Savage, "Application of the Vareststraint Technique to The Study of Weldability (Augmented Strain Concept and Vareststraint Test for Hot-Cracking Sensitivity and Weldability of Filler Metals)", *Welding Journal, Research Supplement*, Vol. 45, No.23, pp 125-136, 1966.

17-J.C. Lippold, *Welding Metallurgy and Weldability*, John Wiley & Sons, 2014.

۱۸- م. گلغذار، " اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها"، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ویرایش دوم، ۱۳۸۲.

19- V. Kujanpää, S. David, C. White, "Formation of Hot Cracks in Austenitic Stainless Steel Welds-Solidification Cracking", *Welding Journal*, Vol. 65, No. 8, pp. 203-212, 1986.