



ارزیابی حساسیت به ترک گرم و خواص مکانیکی فلز جوش ER310 در اتصالات جوش فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ با اعمال لرزش الکترومغناطیس

محمد امین قدم دزفولی^۱، رضا دهملائی^{۲*}، سید رضا علوی زارع^۲
۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲. گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

* ایمیل نویسنده مسول: dehmlaei@scu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس همزمان با جوشکاری بر ریزساختار، خواص مکانیکی و حساسیت به ترک گرم فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ مورد مطالعه قرار گرفته است. جوشکاری با روش GTAW و با فلز پرکننده آستنیتی ER310 تحت اعمال لرزش الکترومغناطیس با ولتاژهای مختلف انجام گردید. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی SEM انجام شد. خواص مکانیکی اتصال با آزمون‌های ضربه و سختی سنجی و حساسیت به ترک گرم با آزمون وارسترینت طولی ارزیابی گردید. مطالعات ریزساختاری نشان داد که اعمال لرزش الکترومغناطیس باعث ریزتر شدن ریزساختار فلز جوش و تغییر حالت انجمادی از دندریتی ستونی درشت به دندریتی هم‌محور گردیده است. دلیل تغییر حالت انجمادی، ریز شدن ریزساختار ناشی از شکسته شدن نوک دندریت‌های در حال رشد و افزایش مراکز جوانه‌زنی غیر همگن در مذاب و در نتیجه افزایش تعداد جوانه‌ها در حین انجماد مذاب جوش تشخیص داده شد. نتایج نشان داد که در اثر اعمال لرزش الکترومغناطیس انرژی ضربه‌ای از ۱۰۴ به ۱۶۵ ژول و سختی از ۲۳۰ به ۲۵۳ ویکرز در فلز جوش افزایش یافته است. نتایج آزمون وارسترینت طولی نشان داد که اعمال لرزش باعث کاهش حساسیت به ترک گرم در فلز جوش گردیده است و مجموع طول ترک از ۱۸/۸ میلی‌متر در نمونه بدون لرزش به ۸/۳ میلی‌متر در نمونه تحت لرزش ۳۰ ولت کاهش پیدا کرده است.

کلمات کلیدی: لرزش الکترومغناطیس، دندریت ستونی و هم‌محور، ترک گرم، آزمون وارسترینت، فولاد زنگ‌زن آستنیتی.

مقدمه

فولادهای زنگ‌زن آستنیتی به دلیل دارا بودن مزایایی همچون مقاومت به خوردگی عالی و جوش‌پذیری و شکل‌پذیری مطلوب، کاربرد گسترده‌ای در صنعت پیدا کرده‌اند. کاربرد این فولادها در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و صنایع غذایی روز به روز در حال افزایش است [۱ و ۲]. از آنجا که غالباً قطعات این آلیاژها به صورت جوشکاری شده در صنعت به کار می‌روند، توجه به کیفیت خواص مکانیکی فلز جوش از اهمیت زیادی برخوردار است. وجود دندریت‌های ستونی درشت و مقادیر بالای جدایش عنصری در ساختار انجمادی فلز جوش باعث کاهش چشمگیر استحکام و چقرمگی آن نسبت به فلز پایه می‌شود [۳ و ۴]. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی به منظور بهبود خواص مکانیکی قطعات جوشکاری شده صورت گرفته است. 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 [۵]. اساس این روش‌ها بر پایه افزایش مراکز جوانه‌زنی غیر همگن در حوضچه مذاب و ریزدانه شدن ساختار فلز جوش است. از آنجا که ریزدانگی باعث افزایش همزمان استحکام و انعطاف‌پذیری می‌شود، تأثیر فراوانی بر بهبود خواص مکانیکی فلز جوش خواهد داشت [۶]. 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. اعمال لرزش الکترومغناطیس به مذاب فلز جوش در حال انجماد از طرفی باعث شکسته شدن نوک دندریت‌های ستونی که از نواحی مرز ذوب به سمت مرکز جوش در حال رشد هستند، می‌شود. از طرف دیگر موجب



جابجایی بهتر مذاب، نفوذ راحت‌تر آن در بین دندریتها و نیز انتقال همرفتی بیشتر حرارت و کاهش دمای حوضچه مذاب جوش و در نتیجه کوتاه‌تر شدن زمان انجماد می‌گردد. بنابراین اعمال لرزش الکترومغناطیس با افزایش بیشتر تعداد نوک دندریتها شکسته شده و پایداری بیشتر آنها مراکز جوانه زنی غیر همگن در مذاب جوش را افزایش داده و در نهایت باعث ریز شدن دانه‌ها و تشکیل بیشتر دندریتها می‌گردد [۷]. ترک خوردگی گرم 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 گرم ایجاد می‌شود [۸و۹]. آزمون وارسترینت از جمله آزمون‌های مهم جوش‌پذیری است که به منظور ارزیابی حساسیت به ترک گرم 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 [۱۰و۱۱]. دانگ و همکاران طی پژوهشی ثابت کردند که اعمال لرزش الکترومغناطیس در حین جوشکاری به دلیل کم کردن محدوده دمایی تردی باعث افزایش مقاومت فلز جوش در برابر ترک خوردن گرم می‌شود [۱۲]. در پژوهشی دیگر بالاسابرامانیا و همکاران [۱۳] تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس در حین جوشکاری بر ایجاد ترک‌های گرم در آلیاژ آلومینیوم AA7075 را بررسی کردند. نتایج نشان داد اعمال لرزش الکترومغناطیس با ریزدانه کردن فلز جوش مقاومت در برابر ترک گرم را طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. قدم دزفولی و همکاران [۱۴]، با اعمال لرزش الکترومغناطیس در حین جوشکاری GTAW مشاهده کردند که با افزایش لرزش الکترومغناطیس تعداد و طول دندریتهاستونی کاهش یافته و ریزساختار از دندریتهاستونی به دندریتها هم‌محور ریز تغییر کرده است. در پژوهشی دیگر دهملایی و همکاران [۳] تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس را بر منطقه مخلوط نشده در جوشکاری غیرمشابه سوپر آلیاژ اینکولوی ۸۰۰ و فولاد مقاوم به حرارت HP مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که اعمال لرزش الکترومغناطیس به دلیل متلاطم کردن حوضچه مذاب باعث حذف منطقه مخلوط نشده گردیده است. چی کو و همکارانش [۱۵]، تأثیر هم زدن حوضچه مذاب در حین جوشکاری GTAW فولاد زنگ نزن ۳۰۴، بر اندازه فریت دلتا در قطعه جوشکاری شده را بررسی کردند. نتایج، افزایش تعداد جوانه‌ها و ریز شدن فریت دلتا در اثر افزایش تحت انجماد ترکیبی ناشی از هم خوردن مذاب را نشان داد.

در پژوهش حاضر تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس هم‌زمان با جوشکاری بر روی ریزساختار، خواص مکانیکی و حساسیت به ترک گرم فلز جوش (فلز پرکننده ER310) اتصالات فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ حاصل از فرآیند GTAW مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است.

مبانی تجربی

در این پژوهش، از ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ به ضخامت ۶ میلی‌متر به عنوان فلز پایه و سیم جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ER310 به عنوان فلز پرکننده استفاده شده است. جدول (۱) ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده (wt.%) را نشان می‌دهد.

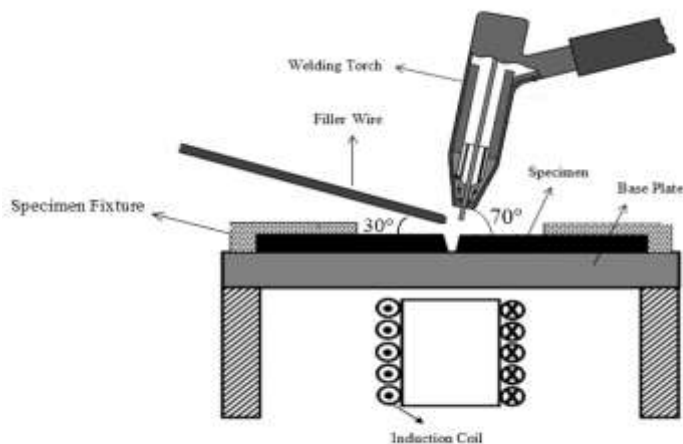
جدول ۱. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده (wt.%).

	C	Si	Mn	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Fe
SS 304	۰/۰۴	۰/۳۴	۱/۱	۰/۰۲	۰/۱۹	۱۷/۹	۸/۳	۰/۱۲	مابقی
ER 310	۰/۱	۰/۴۵	۱/۷۵	۰/۰۳	۰/۷۵	۲۶	۲۱	۰/۷۵	مابقی

ابتدا نمونه‌هایی به ابعاد $100 \times 50 \text{ mm}^2$ از فلز پایه با ماشینکاری جدا گردید. طرح اتصال به صورت جناغی یک‌طرفه با زاویه پخ ۷۰ درجه، فاصله ریشه ۲ میلی‌متر و پای ریشه ۱ میلی‌متر آماده گردید. جوشکاری نمونه‌ها بدون پیشگرم به روش



GTAW تحت لرزش الکترومغناطیس با ولتاژهای خروجی ۰، ۱۵ و ۳۰ ولت با فلز پرکننده ER310 انجام شد. لرزش الکترومغناطیس توسط یک میدان مغناطیسی متغیر (با اعمال نیروی متناوب به فلز هادی حامل جریان الکتریکی) با هسته E



شکل ۱. تصویر شماتیک از نحوه اعمال ارتعاش الکترومغناطیس به قطعه در حال جوشکاری توسط سیم پیچ مسی.

شکل و از جنس سیلیس با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر با دور سیم‌پیچ‌های تک رشته‌ای ۱۲۵، ۲۲۵، ۴۰۰ و ۵۰۰ دور ایجاد گردید. جهت تغییر ولتاژ ورودی به دستگاه از دو عدد سلکتور با مشخصات ۲۲۰ ولت و ۳۰ آمپر استفاده شد. دستگاه اعمال لرزش در زیر میز کار اتصال نمونه‌ها قرار گرفت و در حین جوشکاری لرزش مناسب را در حوضچه جوش ایجاد نمود. تصویر شماتیکی از دستگاه اعمال کننده لرزش در شکل (۱) نشان داده شده است.

جهت مطالعات ریزساختاری، نمونه‌هایی به ابعاد $20 \times 10 \text{ mm}^2$ از قطعات جوش به طوریکه در برگیرنده فلز پایه، ناحیه HAZ و فلز جوش بودند جدا گردید. پس از پرداخت کاری با سنباده‌های ۸۰ تا ۲۰۰۰ سنباده‌زنی شدند. سپس به کمک پودر آلومینا با دانه‌بندی ۱ میکرومتر تحت پولیش قرار گرفتند تا سطح آنها کاملاً صاف و صیقلی شد. در ادامه توسط محلول اسید اگزالیگ ۱۰٪ الکترو اچ گردیدند. ریزساختار فلز جوش توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت. جهت تعیین درصد فاز فریت فلز جوش در نمونه‌های مختلف به روش مغناطیسی از دستگاه فریت اسکوپ ساخت شرکت Fischer مدل FMP30 استفاده شد. این دستگاه قابل حمل بوده و دارای یک پروب است که با استفاده از القای مغناطیسی کسر حجمی فاز مغناطیسی در فولادهای متشکل از فازهای مغناطیسی و غیر مغناطیسی را بر اساس استاندارد ANSI/AWS A4.2M/A4.2:1997 اندازه‌گیری می‌کند. سختی سنجی فلزات پایه و جوش با روش ویکرز انجام گردید. برای بررسی تغییرات سختی در نواحی مختلف قطعات جوش از آزمون ریزسختی سنجی ویکرز تحت بار اعمالی ۱۰۰ گرم و زمان بارگذاری ۱۰ ثانیه استفاده شد. ریزسختی سنجی بر اساس استاندارد ASTM E384 در دو طرف خط ذوب (به طرف فلزات پایه و جوش) با فواصل مساوی ۲۰۰ میکرومتر تا یکنواخت شدن تغییرات سختی انجام گردید. آزمون ضربه چارپی بر اساس استاندارد ASTM E23 بر روی نمونه‌هایی به ابعاد $55 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ انجام گردید. برای هر آزمون ضربه سه نمونه یکسان به طوریکه خط جوش در وسط نمونه‌ها قرار داشت تهیه گردید. برای هر نمونه شیاری به عمق ۱ میلی‌متر و زاویه ۴۵ درجه در مرکز خط جوش ایجاد گردید. جهت بررسی جوش‌پذیری و ارزیابی حساسیت به ترک گرم از آزمون وارسترینت طولی استفاده شد. به این منظور ابتدا نمونه‌هایی به ابعاد $150 \times 25 \times 3/2 \text{ mm}^3$ از فلز پایه جدا گردید. پس از پرداخت قطعات در سطح فوقانی هر قطعه شیاری به عمق ۲ میلی‌متر و پهنای ۱۰ میلی‌متر توسط دستگاه فرز ایجاد گردید. شیاری ایجاد شده روی نمونه‌ها با روش GTAW و سیم جوش ER310 طی یک پاس جوش پر گردید. همزمان با جوشکاری لرزش الکترومغناطیس با شدت‌های مختلف حاصل از ولتاژهای ۰، ۱۵ و ۳۰ ولت اعمال گردید. سپس جوش اضافی توسط ماشینکاری از سطح نمونه‌ها بر طرف گردید. نمونه‌ها در دستگاه آزمایش وارسترینت قرار داده شدند و خط جوش با روش GTAW بدون استفاده از پر

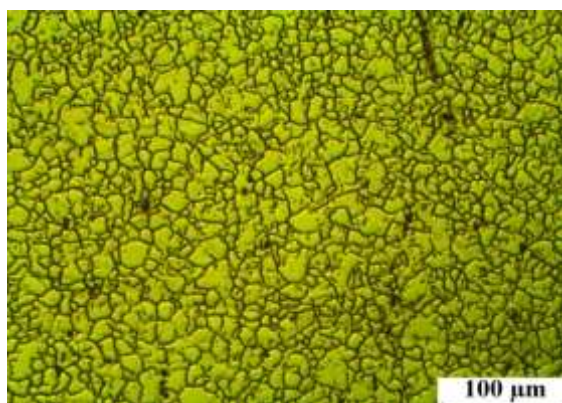


کننده دقیقاً در مرکز فلز جوش تولید شده از قبل ایجاد گردید. برای مشاهده ترک‌های احتمالی ایجاد شده، سطح نمونه‌ها با سنباده‌زنی کاملاً تمیز گردید و به مدت ۲۰ دقیقه درون دستگاه اولتراسونیک قرار داده شدند. سپس توسط میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی کم از نمونه‌ها تصویربرداری گردید و طول ترک‌های ایجاد شده اندازه‌گیری شد. هر آزمایش بر روی سه نمونه انجام و میانگین مجموع طول ترک‌های ایجاد شده جهت ارزیابی و مقایسه حساسیت به ترک گرم فلزات جوش گزارش گردید.

نتایج و بحث

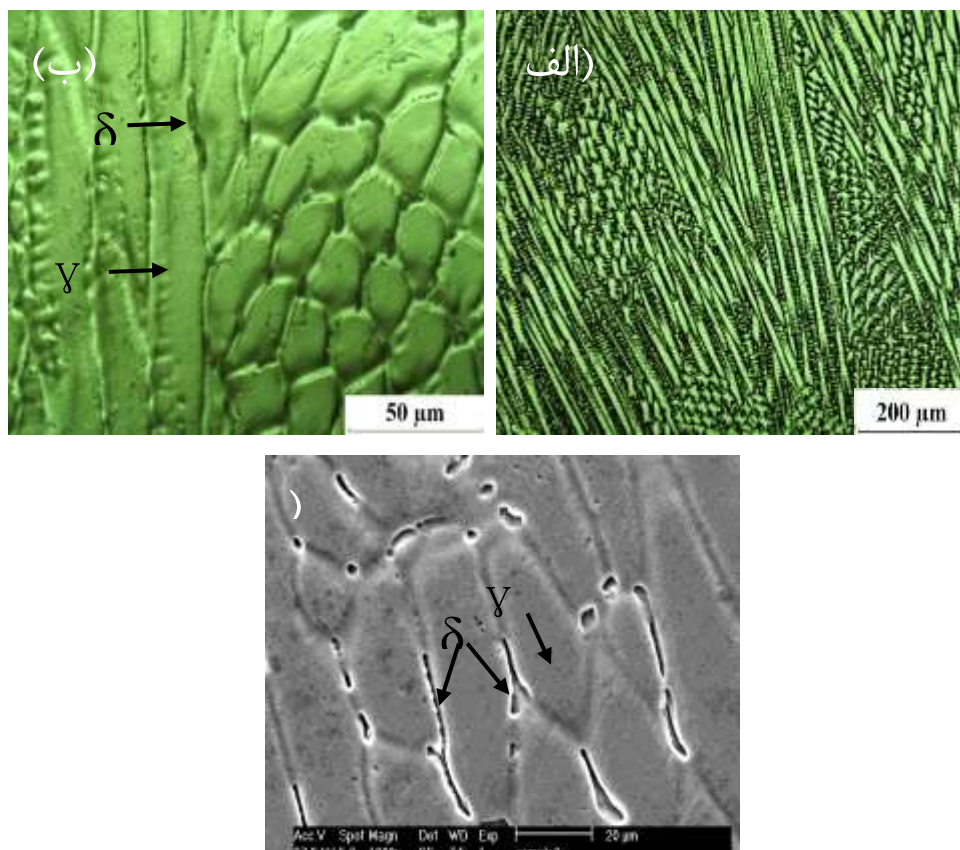
بررسی‌های ریزساختاری

تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ در شکل (۲) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که ریزساختار این فولاد، آستنیتی و از دانه‌های هم‌محور شده آستنیت تشکیل شده است. کروم و نیکل، مهمترین و تأثیرگذارترین عناصر آلیاژی این فولاد هستند. نیکل عنصری آستنیت‌زاست و اثر فریت‌زایی کروم را خنثی می‌کند. نسبت کروم به نیکل نقش تعیین‌کننده‌ای در ریزساختار فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی دارد که با توجه به مقدار نیکل بالای این آلیاژ ساختار آن کاملاً آستنیتی می‌باشد و شرایط تشکیل فریت در آن حداقل است. از آنجا که نیکل یک عنصر آستنیت‌زا است، وجود ۸ درصد از آن در فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری فاز آستنیت و عدم پایداری و وجود فریت بازی می‌کند.



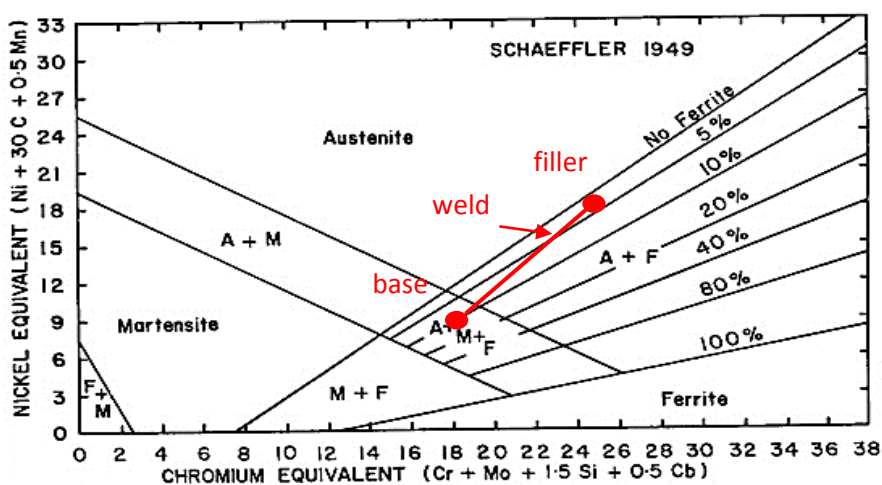
شکل ۲. تصویر میکروسکوپ نوری از فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴.

شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی از ریزساختار ناحیه مرکزی فلز جوش ER310 را قبل از اعمال لرزش الکترومغناطیس نشان می‌دهد. شکل (۳الف) نشان می‌دهد که ریزساختار از دندریتهای درشت ستونی تشکیل گردیده که از مرز ذوب به طرف مرکز جوش رشد کرده‌اند. تشکیل و حضور دندریتهای ستونی بزرگ نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش خواص مکانیکی فلز جوش به‌ویژه انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه دارند [۵]. تصاویر همچنین نشان می‌دهند که ساختار کاملاً آستنیتی به همراه مقدار بسیار کمی فریت‌دلتهای بر روی مرزهای آستنیت و بین شاخه‌های دندریتی است. محاسبه نیکل معادل (۲۴/۶) و کروم معادل (۲۶/۷۵) برای فلز جوش، استفاده از دیاگرام شیفلر (شکل ۴) و رقت ۲۱/۵ نشان می‌دهد که نوع انجماد، AF بوده و عدد فریت فلز جوش برابر ۵ است. در اثر رقت فلز جوش توسط فلز پایه و افزایش عناصر پایدار کننده فریت نظیر کروم و مولیبدن در فلز جوش، در پایان انجماد این عناصر در مرزهای دانه‌های فرعی انجماد (بین بازوهای دندریتی) تجمع یافته و در اثر یک واکنش یوتکتیک، مقدار کمی فریت‌دلتهای در بین بازوهای دندریتی تشکیل می‌گردد. تشکیل این مقدار از فریت‌دلتهای می‌تواند باعث تمایل انجماد از نوع آستنیتی (A) به آستنیتی فریتی (AF) گردد. نتایج فریت‌اسکوپ مقدار فریت فلز جوش را ۴/۵ درصد نشان داد که تطابق خوبی با نتایج حاصل از دیاگرام شیفلر دارد. حضور مؤثر عناصر نیکل، مس، کربن و منگنز در ترکیب شیمیایی



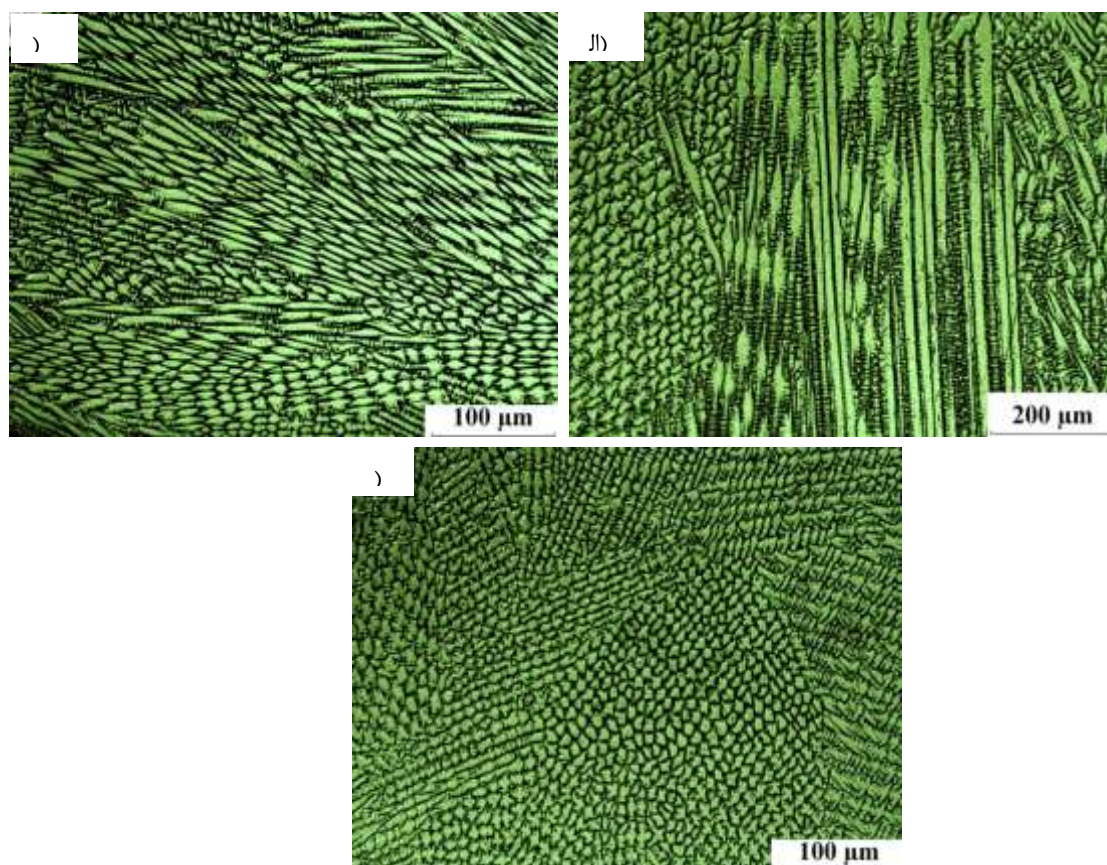
شکل ۳. (الف) و (ب) تصاویر میکروسکوپ نوری و (ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار فلز جوش ER310 قبل از اعمال لرزش الکترومغناطیس.

فلز جوش ER310 (جدول ۱) باعث می‌شود که انجماد آن به صورت کاملاً آستنیتی صورت گیرد. افزایش رقت فلز جوش توسط فلز پایه ۳۰۴ تا حدود ۲۱/۵ درصد باعث کاهش میزان عناصر آستنیت‌زا در فلز جوش گردیده و مقدار فریت را تا ۴/۵ درصد در فلز جوش افزایش می‌دهد. زمینه آستنیتی و حضور فاز فریت‌دلتا در ریزساختار فلز جوش توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) نیز به وضوح در شکل (۳ج) مشاهده می‌شود.



شکل ۴. دیاگرام شیفلر برای پیش‌بینی ریزساختار فلز جوش [۲].

ریزساختار ناحیه مرکزی فلز جوش در ولتاژهای لرزشی ۰، ۱۵ و ۳۰ ولت نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ریزساختار فلز جوش کاملاً آستنیتی با مورفولوژی دندریتی است. جهت گیری رشد دانه در مرزدانه متفاوت است و رشد رقابتی بین دانه‌های مختلف رخ داده است. مورفولوژی ساختار دندریتی متأثر از چندین پدیده متالورژیکی است که به طور همزمان در هنگام انجماد حوضچه جوش اتفاق می‌افتند، مانند جوانه‌زنی همگن و ناهمگن، توزیع مجدد عناصر حل شده، جریان سیال بین دندریتی، حرکت جامد و هم‌سیمایی دندریتی [۵]. این پدیده‌های متالورژیکی به نوبه خود تحت تأثیر عواملی مانند ترکیب شیمیایی آلیاژ، سرعت سرد شدن، گرادیان دمایی و اختلاف چگالی در مذاب در حال انجماد کنترل می‌شوند. در صورت اعمال لرزش خارجی به حوضچه جوش، اگر شدت هم‌زدن ملایم باشد، فرآیند اساسی انجماد ثابت خواهد ماند. در صورت قوی بودن هم‌زدن، مانند لرزش الکترومغناطیس، تکه تکه شدن دندریت‌ها (شکست نوک دندریت‌ها) می‌تواند رخ دهد [۷و۶]. (شکل ۵) نشان می‌دهد که اعمال لرزش الکترومغناطیس منجر به تغییرات قابل توجهی در ریزساختار فلز جوش شده است. به وضوح مشاهده می‌شود که ریزساختار از دندریتی ستونی به هم‌محور تغییر کرده است و با افزایش شدت لرزش این تغییر با وضوح بیشتری مشاهده می‌گردد. به اضافه مشاهده می‌شود که با اعمال و افزایش شدت لرزش حوضچه جوش اندازه دندریت‌های ستونی کوچک‌تر شده است.



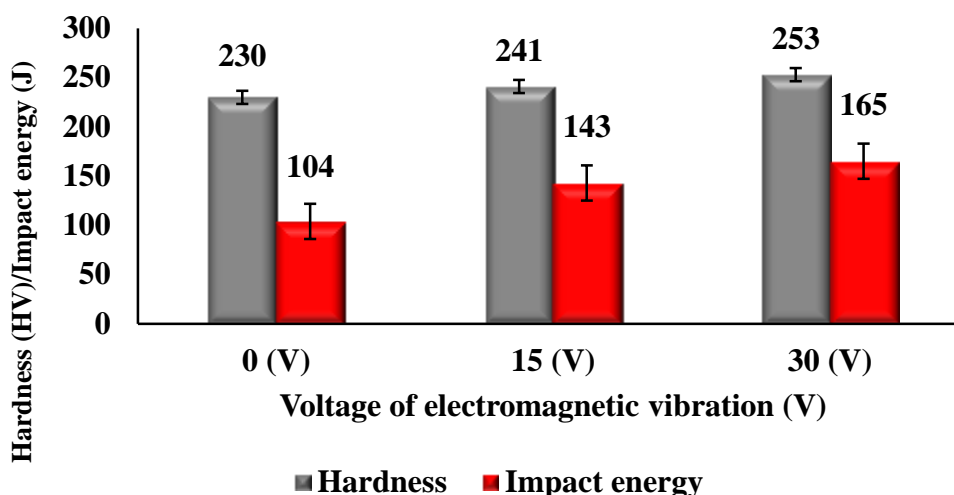
شکل ۵. ریزساختار مرکز فلز جوش با ولتاژهای لرزش مختلف: الف) 0V، ب) 15V، ج) 30V.

ارتعاش با افزایش تلاطم و حرکت مذاب باعث شکست نوک دندریت‌ها و افزایش کنده شدن دانه‌های نیمه ذوب شده و ورود آنها به حوضچه جوش و لذا افزایش مراکز جوانه‌زنی غیر همگن گردیده و مانع از رشد دانه‌های ستونی در حین انجماد فلز جوش می‌گردد. به اضافه، اعمال لرزش در اثر تلاطم و هم‌زدن مذاب باعث کاهش دمایی حوضچه جوش و افزایش سرعت سرد شدن مذاب فلز جوش می‌گردد که این نیز به ریزدانه‌گی ساختار کمک می‌کند.



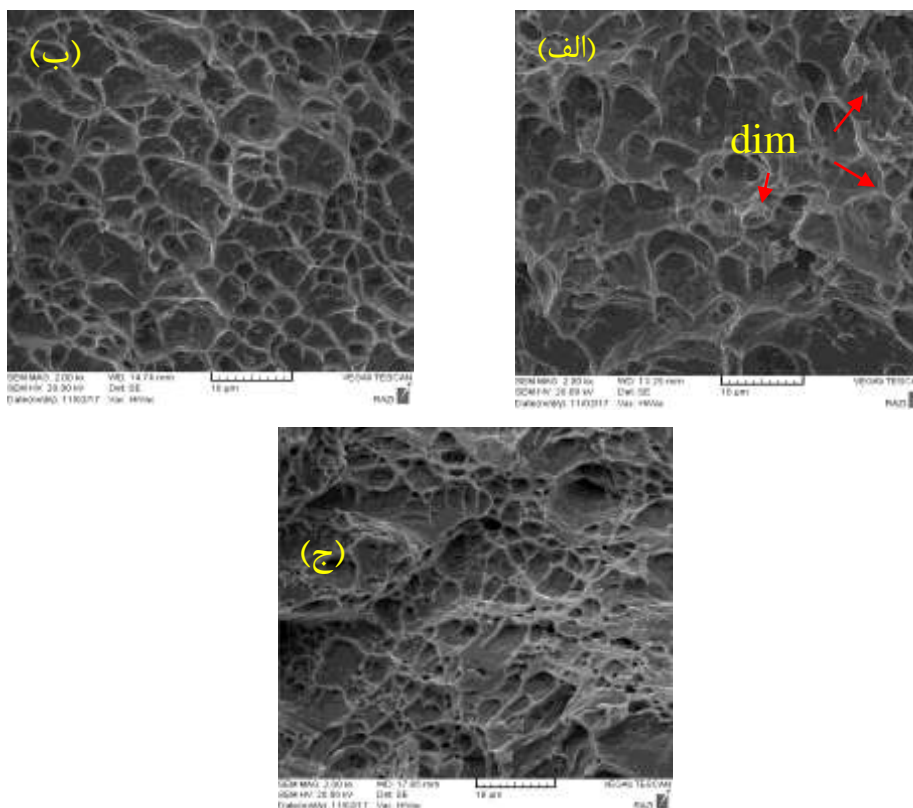
خواص مکانیکی

شکل (۶) میانگین انرژی ضربه نمونه‌های مختلف را بر حسب لرزش اعمالی و شکل (۷) تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح شکست فلز جوش را نشان می‌دهد.



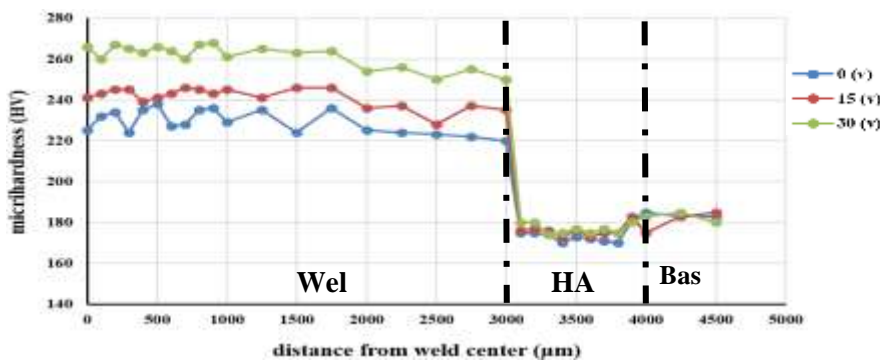
شکل ۶. تأثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس بر انرژی ضربه و سختی فلز جوش.

بررسی نتایج آزمون ضربه نشان می‌دهد که نمونه با حداکثر ارتعاش (۳۰ ولت)، بیشترین میزان انرژی را در هنگام شکست نسبت به نمونه فاقد ارتعاش (۰ ولت)، جذب نموده است که این امر با توجه به ریزتر بودن ساختار و بالطبع افزایش میزان انعطاف‌پذیری فلز جوش، قابل پیش‌بینی بود. افزایش ارتعاش اعمالی باعث افزایش دندریته‌های هم‌محور ریز در مرکز فلز جوش، کاهش فاصله بین بازوهای دندریته‌ی و در نتیجه افزایش چقرمگی گردید که این امر منجر به افزایش چشمگیر انرژی جذب شده در هنگام شکست نمونه‌ها شده است. هانگ و لین [۱۶]. گزارش کردند که در اتصالات جوشکاری شده با لرزش الکترومغناطیس تعداد نابیجایی‌ها به میزان قابل‌توجهی بیشتر از اتصالات ایجاد شده بدون لرزش الکترومغناطیس است. افزایش تعداد نابیجایی‌ها منجر به تشکیل سلهای نابیجایی می‌شود. پس از آن، این سلهای نابیجایی مرزدانه‌های با زاویه کم یا زیاد تشکیل می‌دهند و در نتیجه، دانه‌های آستنیت به دانه‌های کوچک‌تر و زیردانه‌ها تقسیم می‌شوند. با ریز دانه شدن ساختار تعداد مرزدانه‌ها افزایش می‌یابد. از آنجاکه مرزدانه‌ها جزو مکان‌های پر انرژی به حساب می‌آیند، به عنوان سد و مانع محکمی در برابر اشاعه ترک عمل می‌کنند به طوری‌که برای رشد ترک نیاز به انرژی بالاتری می‌باشد. همچنین با ریزتر شدن دانه‌ها، اندازه ترک اولیه کمتر می‌شود، زمان شکست به تعویق می‌افتد و در نهایت چقرمگی افزایش می‌یابد [۱۷]. تصاویر سطح شکست نشان می‌دهد که نوع شکست در تمامی فلزات جوش از نوع نرم است اما در سطح شکست نمونه‌هایی که تحت ارتعاش قرار داشتند، با افزایش ولتاژ، اثرات تغییر فرم پلاستیک و حفرات و دیپل‌های عمیق با تعداد زیاد مشاهده می‌شود. از آنجا که این حفره‌ها در محل ذرات رسوبی ریز پراکنده جوانه‌زنی می‌کنند، هرچه قطر این حفرات کمتر و عمق و پراکندگی آنها بیشتر باشد، انعطاف‌پذیری ساختار حاصل نیز بیشتر می‌شود. ارتعاش حوضچه مذاب با کمک به ریزتر شدن رسوبات و توزیع پراکنده آنها نقش بسزایی در تعدد این محل‌های جوانه زنی داشته و با افزایش ریزدانه‌گی و کاهش عیوب تأثیر مهمی در افزایش انرژی جذب شده در هنگام ضربه دارد. به طور میانگین، نمونه با شدت ارتعاش ۳۰ ولت، دارای ۵۸٪ انرژی جذب شده بیشتر، نسبت به نمونه فاقد ارتعاش، در هنگام شکست بود که این نتیجه مؤید مطالب فوق است.



شکل ۷. تصویر SEM از سطح شکست نمونه‌های جوشکاری شده تحت ولتاژهای الف) 0V، ب) 15V، ج) 30V.

نتایج سحی به دست آمده از منصفه جوس در وساره‌های برس محف در سحس (۲) سان داده سده اسب. این شکل نشان می‌دهد که در شرایط بدون اعمال لرزش الکترومغناطیس، میانگین سختی فلز جوش ۲۳۰ ویکرز است که با اعمال لرزش الکترومغناطیس به میزان ۳۰ ولت، به ۲۵۳ ویکرز رسیده است. به نظر می‌رسد که اعمال لرزش با تشویق و کمک به تشکیل ساختار دندریتی ظریف و دانه‌های هم‌محور (به‌ویژه در نمونه تحت لرزش ۳۰ ولت) سبب افزایش سختی در فلز جوش گردیده است. بنابراین، کاهش اندازه دانه و تبدیل دندریتهای ستونی خشن به دندریتهای هم‌محور ریز می‌تواند دلیل افزایش مقدار سختی در فلز جوش در اتصالات جوش داده شده تحت لرزش الکترومغناطیس (به‌ویژه تحت ولتاژ ۳۰ ولت) باشد. شکل (۸) تغییرات ریزسختی در نواحی مختلف اتصالات ایجاد شده در ولتاژهای لرزش ۰، ۱۵ و ۳۰ ولت را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که کمترین و بیشترین ریزسختی فلز جوش، به ترتیب در اتصالات ایجاد شده با ولتاژ لرزش 0 (V) و 30 (V) ایجاد شده است.



شکل ۸. تغییرات ریزسختی بر حسب فاصله از مرکز جوش برای نمونه‌های جوشکاری شده در ولتاژهای لرزش مختلف.



این اتفاق را می‌توان با ریزدانه شدن ساختار فلز جوش در اثر شکسته شدن دندریته‌های آستنیت و ایجاد دندریته‌های ریز هم‌محور، با کمترین فاصله بین بازویی با اعمال و افزایش ولتاژ لرزش الکترومغناطیس مرتبط دانست. به دلیل ریزدانه شدن ساختار و افزایش مرزدانه‌ها، موانع موجود در مقابل حرکت نابجایی‌ها افزایش می‌یابند. از آنجایی که برای تغییر شکل فلز، حرکت نابجایی‌ها ضروری است، بنابراین نیروی بیشتری صرف فرو رفتن فرو رونده الماسه در آزمون ریزسختی سنجی شده و مقدار میانگین ریز سختی بیشتری را نشان می‌دهد. این موضوع را با رابطه هال-پیچ (رابطه ۱) نیز به خوبی می‌توان تشریح کرد. بر اساس این رابطه استحکام و سختی با اندازه دانه رابطه عکس دارد. بنابراین با کاهش اندازه دانه سختی فلز جوش افزایش می‌یابد [۱۸-۲۰].

$$\sigma_0 = \sigma_i + \frac{K}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

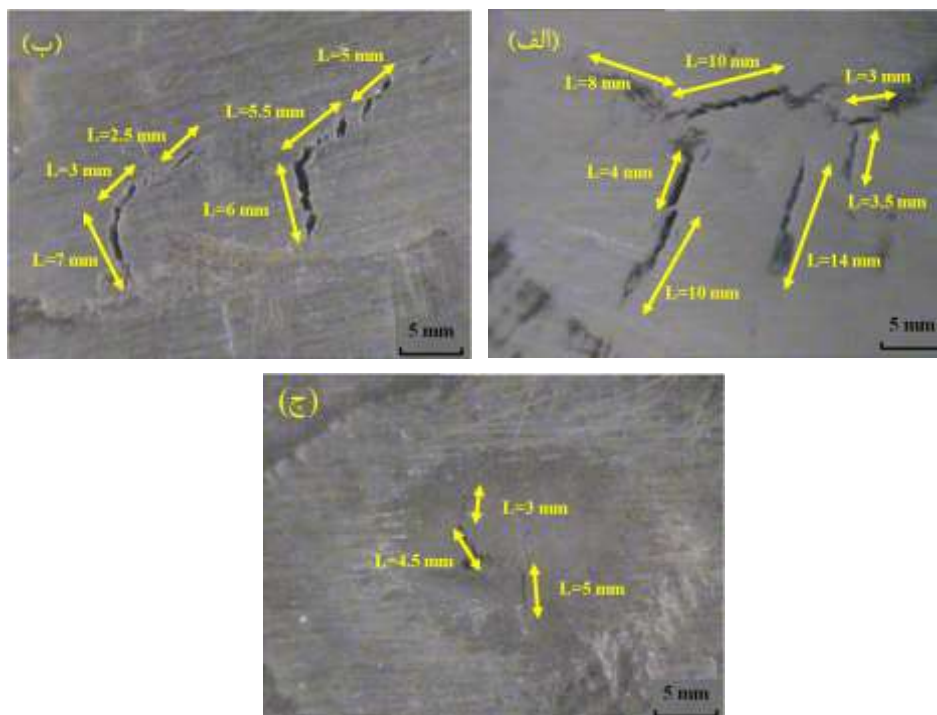
در این رابطه σ_0 ، تنش تسلیم، σ_i تنش اصطکاکی، K یک عدد ثابت است که میزان تجمع نابجایی پشت مرزدانه‌ها را تعریف می‌کند، و D قطر متوسط دانه‌ها است. بر طبق رابطه (۱)، تنش تسلیم و میزان سختی رابطه معکوس با اندازه دانه در فلز جوش دارد. در نتیجه، کاهش در اندازه دندریته‌ها دلیل اصلی افزایش مقدار سختی فلز جوش فولاد زنگ‌نزن ER310 با افزایش اعمال لرزش الکترومغناطیس است. این موضوع را به وضوح می‌توان در شکل (۸) مشاهده کرد. همچنین از شکل مشخص است که در تمامی نمونه‌ها کاهش جزئی در سختی منطقه متأثر از حرارت (HAZ) اتفاق افتاده است که این کاهش سختی را می‌توان به درشت شدن دانه‌ها در این منطقه نسبت داد. از سویی میانگین سختی مناطق مرکزی جوش بیشتر از مناطق کناری و نواحی نزدیک به خط ذوب است. ساختار ریزتر مناطق مرکزی به همراه وجود دانه‌های هم‌محور مرکزی، دلیل سختی بیشتر این مناطق و حضور دانه‌های ستونی در نزدیکی خط ذوب، علت سختی کمتر در کناره‌های منطقه جوش می‌باشد.

ارزیابی حساسیت به ترک داغ فلز جوش

شکل (۹) نتایج ارزیابی حساسیت به ترک گرم فلز جوش ER310 را بر اساس آزمایش وارسترینت نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اعمال لرزش الکترومغناطیس باعث کاهش طول بزرگترین ترک و مجموع طول ترک‌ها در فلز جوش گردیده است. از این رو اعمال لرزش الکترومغناطیس به طور قابل توجهی باعث کاهش حساسیت به ترک داغ فلز جوش شده است. ترک خوردن انجمادی فلز جوش یکی از مشکلات رایج در جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، مخصوصاً آلیاژی‌هایی که با مد انجمادی A یا AF منجمد می‌شوند، می‌باشد. این نوع ترک خوردن از نوع بین دانه‌ای است، به طوریکه ترک در امتداد مرزهای دانه در فلز جوش و در مراحل پایانی انجماد رخ می‌دهد [۱۹-۲۱]. در فلز جوش ER310، جدایش ناخالصی‌ها (خصوصاً گوگرد و فسفر) و عناصر آلیاژی (مانند مولیبدن)، در مرزدانه و تشکیل ترکیبات با نقطه ذوب پایین، باعث گسترش دامنه انجماد و تشویق ترک‌های انجمادی خواهد شد. حضور ۵ تا ۱۰ درصد فریت دلتا در ساختار فلز جوش فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، به دلیل ایجاد مرزهای پیچیده (نه صاف و مستقیم) بین فریت دلتا و آستنیت و همچنین تمایل زیاد فسفر و گوگرد برای حل شدن در آن، مقاومت خوبی در برابر ترک‌های انجمادی ایجاد می‌نماید [۲۲]. از آنجا که فلز پرکننده ER310 با مد انجماد AF منجمد می‌شود و بر اساس نتایج آزمون فریت‌سنجی، ۴/۵ درصد فریت دلتا در ساختار فلز جوش در شرایط بدون اعمال لرزش الکترومغناطیس وجود دارد، فلز جوش ER310، مستعد به ترک خوردن انجمادی می‌باشد. اعمال لرزش الکترومغناطیس در حین جوشکاری علاوه بر شکستن دندریته‌های آستنیت و ریزدانه کردن ساختار، باعث همگن شدن مذاب جلوی جبهه انجماد و کاهش جدایش عنصری می‌شود. از طرف دیگر ریزساختار دندریته هم‌محور با مقدار زیاد مذاب در بین دانه‌ها، بسیار راحت‌تر از ساختار دندریته ستونی درشت در برابر کرنش‌های ناشی از انقباض 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 گرم دارد. همچنین دانه‌های ریز به دلیل سطح دانه بیشتر، امکان تجمع کمتر عناصر مضر در مرزدانه را فراهم می‌نماید. تحقیقات نشان داده است به دلیل زاویه تند سطوح مجاور بین دانه‌های ستونی که از جهات مقابل حوضچه جوش رشد می‌کنند، حساسیت بیشتری به ترک خوردن انجمادی در خط مرکزی جوش نسبت به جوش‌های با دانه‌های هم‌محور دارند [۲۳]. به نظر می‌رسد یک زاویه تند، برخورد دندریته‌های ستونی رشد کننده از جهات مقابل حوضچه جوش و تشکیل لایه مذاب پیوسته از جدایش‌های با نقطه ذوب پایین در خط مرکزی جوش را تشدید می‌کند. در نتیجه ترک خوردن انجمادی در خط مرکزی جوش تحت اثر تنش‌های انقباضی عرضی رخ می‌دهد. مشخص گردیده است که ریزدانه‌گی و تکه شدن دندریته‌ها ناشی از اعمال لرزش الکترومغناطیس، مورفولوژی دانه‌ها را از ستونی به هم‌محور تغییر می‌دهد و در نتیجه، مقیاس طول نفوذپذیری را از فاصله بین بازوهای دندریته ثانویه (برای دندریته‌های ستونی) به اندازه دانه (برای دانه‌های هم‌محور) تغییر می‌دهد که باعث بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی گرم می‌گردد [۲۴-۲۶]. به دلیل کوچک‌تر بودن اندازه دانه، لایه مذاب بین دانه‌ها، نازک‌تر می‌شود و بنابراین فشارهای مویبندی که از گسترش ترک جلوگیری می‌کنند، بزرگ‌تر می‌شوند. در نتیجه این عوامل، طول بزرگترین ترک از $10/5$ میلی‌متر به 4 میلی‌متر و مجموع طول ترک از $18/8$ میلی‌متر به $8/3$ میلی‌متر در فلز جوش ER310 با افزایش ولتاژ لرزش الکترومغناطیس از 0 تا 30 ولت کاهش می‌یابد. تصویر میکروسکوپ نوری از ترک‌های گرم حاصل از آزمون وارسترینت طولی در فلز جوش ER310 در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹. تصویر میکروسکوپ نوری از ترک‌های گرم در فلز جوش (الف) 0V، (ب) 15V، (ج) 30V.

نتیجه‌گیری

- ۱- مد انجماد ER310، به صورت AF بوده و اعمال لرزش الکترومغناطیس تأثیر چندانی بر تغییر مد انجمادی نشان نداد.
- ۲- انجماد فلز جوش به صورت دندریته ستونی و محوری بود که اعمال لرزش الکترومغناطیس، باعث شکست بیشتر دندریته‌های درشت ستونی و تشکیل بیشتر دندریته‌های هم‌محور ریز به‌ویژه در نواحی مرکزی جوش گردید.



- ۳- اعمال لرزش الکترومغناطیس سبب افزایش انرژی ضربه‌ای از ۱۰۴ ژول به ۱۶۵ ژول، افزایش سختی نمونه‌ها از ۲۳۰ به ۲۵۳ ویکرز به ترتیب در نمونه‌های بدون لرزش و تحت لرزش ۳۰ ولت گردید.
- ۴- اعمال لرزش الکترومغناطیس، باعث کاهش حساسیت به ترک گرم (بهبود جوش‌پذیری) فلز جوش گردید و مجموع طول ترک را از ۱۸/۸ میلی‌متر در نمونه بدون لرزش به ۸/۳ میلی‌متر در نمونه تحت لرزش ۳۰ ولت کاهش داد.

مراجع:

- [1] Jia-long, Y. Ying, L. Fu, W. Zheng-gui, Z. Si-jun, L., (2006), New Application of Stainless Steel, *Journal of Iron and Steel Research, International* 13(1) pp 62-66.
- [2] Lippold, J.C., (2014), *Welding metallurgy and weldability*, John Wiley & Sons.
- [3] Dehmlaei, R. Shamanian, M. Kermanpur, A., (2008), Effect of Electromagnetic Vibration on the Unmixed Zone Formation in 25Cr-35Ni Heat Resistant Steel/Alloy 800 Dissimilar Welds, *Materials Characterization* 59(12) pp 1814-1817.
- [4] Kumar, S. Shahi, A.S., (2011), Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded AISI 304 Stainless Steel Joints, *Materials & Design* 32(6) pp 3617-3623.
- [5] Kou, S., (2003), *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons.
- [6] Zheng, P., Lu, Q., Zhang, P., Yan, H., Zhao, j., Shi, H., (2021), Effect of Vibration on Microstructure and Fatigue Properties of 6082 CMT-Welded Joints, *Transactions of the Indian Institute of Metals* 74(9) pp 2149 - 2159.
- [7] Singh, P.K., Prasad, S.B., Patel, S., (2021), Effect of Vibrations on Solidification Behavior and Mechanical Properties of Shielded Metal Arc Weld, *Next Generation Materials and Processing Technologies* 9 pp 209-219.
- [8] Amra, M. Alavi Zaree, S. R. Dehmlaei, R., (2021), Dissimilar Welding Between 1.4742 Ferritic and 310S Austenitic Stainless Steels: Assessment of Oxidation Behaviour, *Metals and Materials International* 27 pp 931-945.
- [9] Pourjafar, A. Dehmlaei, R., (2017), the Influence of Electromagnetic Vibration on the Microstructure and Corrosion Behavior of Incoloy 825 Superalloy Weld Metal, *Journal of Environmental Friendly Materials* 1(2) pp 7-13.
- [10] Wahabi, M. El., Cabrera, J.M., Prado, J.M., (2003), Hot working of Two AISI 304 Steels: a Comparative Study, *Materials Science and Engineering: A* 343(1-2) pp 116-125.
- [11] Lundin, C. Chou, C. Sullivan, C., (1980), Hot Cracking Resistance of Austenitic Stainless Steel Weld Metals, *Welding Journal* 59(8) pp 226s-232s.
- [12] Dong, Z. Wei, Y. Xu, Y., (2006), Predicting Weld Solidification Cracks in Multipass Welds of SUS310 Stainless Steel, *Computational Materials Science* 38(2) pp 459-466.
- [13] Balasubramanian, V. Ravisankar, V. Reddy, G.M., (2008), Effect of Pulsed Current Welding on Mechanical Properties of High Strength Aluminum Alloy, *the International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36(3-4) pp 254-262.
- [14] Ghadam Dezfuli, M. A. Dehmlaei, R. Alavi Zaree, S. R., (2019), Microstructural Aspects of 304 Stainless Steel Weld Joints with the Simultaneous Application of Electromagnetic Vibration, *Metallography, Microstructure, and Analysis* 8 pp 226-232.
- [15] Kuo, Ch. Lin, C. M. Lai, G. H. Chen, Y. C. Chang, Y. T. Wu, W., (2007), Characterization and Mechanism of 304 Stainless Steel Vibration Welding, *Materials Transactions* 48(9) pp 2319-2323.
- [16] Hung, J.C., Lin, C.C., (2013), Investigations on the Material Property Changes of Ultrasonic Vibration Assisted Aluminum Alloy Upsetting, *Materials & Design* 45 pp 412-420.



- [17] Cui, Y. Xu, C.L. Han, Q., (2006), Effect of Ultrasonic Vibration on Unmixed Zone Formation, *Scripta Materialia* 55 pp 975–978.
- [18] Curiel, F.F. Garcia, R. Lopez, V.H. Gonzalez, J., (2011), Effect of Magnetic Field Applied During Gas Metal Arc Welding on the Resistance to Localised Corrosion of the Heat Affected Zone in AISI 304 Stainless Steel, *Corrosion Science* 53 pp 2393–2399.
- [19] Wu, W., (2000), Influence of Vibration Frequency on Solidification of Weldments, *Scripta mater* 42 pp 661–665.
- [20] Zhang, C., Zheng, S.Y., (2009), Effect of Ultrasonic Cavitation and its Application, *Journal of Water Resources and Water Engineering* 20 pp. 136–138.
- [21] Wahabi, M. El. Cabrera, J.M. Prado, J.M., (2003), Hot Working of Two AISI 304 Steels: a Comparative Study, *Materials Science and Engineering: A* 343(1-2) pp 116-125.
- [22] Lundin, C. Chou, C. Sullivan, C., (1980), Hot Cracking Resistance of Austenitic Stainless Steel Weld Metals, *Welding Journal* 59(8) pp 226s-232s.
- [23] Jeng, Sh. L. Su, D.P. Lee, J. T. Huang, J.Y., (2018), Effects of Electromagnetic Stirring on the Cast Austenitic Stainless Steel Weldments by Gas Tungsten ArcWelding, *Metals* 8(8) 630.
- [24] Watanabe, T. Shiroki, M. Yanagisawa, A. Sasaki, T., (2010), Improvement of Mechanical Properties of Ferritic Stainless Steel Weld Metal by Ultrasonic Vibration, *Journal of Materials Processing Technology* 210(12) pp 1646-1651.
- [25] Thavamani, R. Balusamy, V. Nampoothiri, J. Subramanian, R. Ravi, K.R., (2018), Mitigation of Hot Cracking in Inconel 718 Superalloy by Ultrasonic Vibration During Gas Tungsten Arc Welding, *Journal of Alloys and Compounds* 740, pp 870-878.
- [26] Liu, G., Du, D., Wang, K., Pu, Z., Chang, B., (2020), Hot cracking behavior and mechanism of the IC10 directionally solidified superalloy during laser re-melting, *Vacuum* 181, pp 257-271.