نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره 1، بهار و تابستان1398، صفحه 104-93

بهبود مقاومت به ضربه فلز جوش فولاد کم آلیاژ استحکام بالای API X70 با اعمال لرزش الکترومغناطیس

مصطفی افضلی، رضا دهملایی*، اسماعیل حجاری

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

(دریافت مقاله: 1396/10/03 ؛ پذیرش مقاله: 1397/06/24)

چکیده

در این پژوهش تاثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس بر ریزساختار و مقاومت به ضربه فلز جوش فولاد API X70 بررسی گردید. جوشکاری با روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز و با دو فلز پرکننده ER80S-G و ER309L و اعمال هم زمان لرزش الکترومغناطیس تحت ولتاژهای از 30-0 ولت انجام گردید. ریزساختار فلزات پایه و جوش با استفاده از میکروسکوپ های نوری و الکترونی روبشی بررسی شد. چقرمگی فلزات جوش در دماهای محیط، 0°C و 20°C- توسط آزمون ضربه چارپی تعیین گردید. بررسی های میکروسکوپی نشان داد با اعمال لرزش، ریز ساختار فلز جوش ER80S-G، ظریف تر و جزایر مارتنزیتی - آستنیتی (M/A) ریزتر و از پراکندگی یکنواخت تری برخوردار گردیده اند. مشخص شد که در اثر اعمال لرزش ساختار فلز جوش ER309L ریزتر و متوسط اندازه دندریت ها در فلز جوش از18/19 µm به8/01 µm کاهش یافته و میزان فریت فلز جوش نیز حدود 13 درصد افزایش یافته است. نتایج آزمون ضربه نشان داد که افزایش لرزش اعمالی باعث بهبود مقاومت به ضربه هر دو فلز جوش گردیده است. بهترین نتایج پس از اعمال لرزش تحت ولتاژ 30 ولت بدست آمد، به طوریکه مقاومت به ضربه فلز جوش ER80S-G در دماهای محیط، 0°C و 20°C- به ترتیب به میزان 53، 29 و 36 درصد و برای فلز جوش ER309L در دماهای محیط و 20 °C- به ترتیب به میزان 18 و 5 درصد افزایش یافت.

کلمات کلیدی: لرزش الکترومغناطیس، مقاومت به ضربه، جزایر M/A، فریت سوزنی، فولاد API-X70.

Improvement of Impact Toughness of API-X70 Steel Weld Metals with Electromagnetic Vibration

M. Afzali, R. Dehmolaei*, E. Hajjari

Department of materials science and engineering, faculty of engineering, Shahid Chairman University of Ahvaz, Ahvaz,Iran

(Received 24 December 2017 ; Accepted 15 September 2018)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: Dehmolaei@scu.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

Abstract

The effect of electromagnetic vibration on the microstructure and impact toughness of API-X70 steel weld metal was investigated. The welding was carried out by gas tungsten arc welding process and using filler metals including ER80S-G and ER309L. Electromagnetic vibration under voltages 0- 30 volts concurrent with welding was applied. The microstructure of the base and weld metals using optical microscope and SEM was studied. The impact energy of weld metals at TR, 0°C and -20℃ using charpy impact test was measured. Microstructural investigations revealed that applying electromagnetic vibration have caused the finer and more uniform of Martensitic-Austenitic (MA) islands in the ER80S-G weld metal . The results showed that, due to electromagnetic vibration, the microstructure became finer and the average size of dendrites in the ER309L weld metal decreased from 18.19 to 8.01 µm.. The impact test result, illustrated that the applied vibration cause improvement of impact energy of weld metals at different temperature (TR, 0°C and -20℃). It was found that with vibration under 30V, impact energy of ER80S-D weld metal in TR, 0°C and -20℃ was increased equal to 53, 29 and 36 percents, respectively. Besides for ER309L weld metal, the impact energy in TR and -20℃ was increased equal to 18 and 5 percents, respectively. (TR= Room Temperature).

Keywords: Electromagnetic Vibration, Toughness, MA Islands, Acicular Ferrite, API-X70 Steel.

1- مقدمه

فولادهای API[1] از جمله فولادهای میکروآلیاژی هستند که به دلیل داشتن استحکام و چقرمگی مناسب و جوش پذیری مطلوب کاربردهای گسترده ای در ساخت ظروف تحت فشار و خطوط انتقال در صنایع نفت وگاز دارند. به این فولادها عناصر میکروآلیاژی وانادیم، نیوبیم و تیتانیم اضافه می شوند که با ریزکردن دانه ها مقاومت در برابر شکست ترد را افزایش می دهند [۱-۳]. فرآیند جوشکاری متداول ذوبی به طور گسترده در اتصال فولادهای API برای ساخت مخازن تحت فشار، خطوط لوله انتقال نفت و گاز، کشتی ها و شناورها، سکوهای دریایی و غیره استفاده می شود [۴-۵]. در تولید این فولادها جهت دستیابی به استحکام مورد نظر مطابق استانداردAPI، از تکنولوژی پیشرفته نورد گرم و سرد کردن کنترل شده که نوعی عملیات ترمومکانیکی محسوب می شود، استفاده می گردد. اولین و مهم ترین هدف در فرآیند تولید این فولادها دست یابی به استحکام و چقرمگی بالا است، که در خطوط لوله نفت وگاز از اهمیت بالایی برخوردار است [۶]. با توجه به کاربرد گسترده این آلیاژ در شرایط مختلف آب و هوایی استحکام و بویژه چقرمگی این فولادها در دمای پایین از اهمیت بالایی برخوردار است. تشکیل فریت سوزنی به طور مهمی چقرمگی فلز جوش را تحت تاثیر قرار می دهد. فاکتورهای غالب در جوانه زنی فریت سوزنی عبارتند از اندازه دانه ها، نرخ سرد شدن و توزیع ناخالصی ها، که در بین آنها بیشترین گزارش جوانه زنی فریت سوزنی مربوط به ناخالصی های غیرفلزی و چگونگی توزیع، اندازه و دانسیته آنهاست [۷-۱۰]. ریزساختار انجمادی فلز جوش و اندازه دانه ها به شدت بر خواص مکانیکی (انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه) و حساسیت به ترک داغ موثر هستند [۱۱]. از روش های مختلفی نظیر استفاده از فرایند جوشکاری با جریان پالسی، استفاده از مواد جوانه زا در حوضچه مذاب و تحریک خارجی (لرزش حوضچه جوش) در حین جوشکاری، برای ریز کردن دانه های فلز جوش استفاده می شود. برای تحریک خارجی و ایجاد لرزش در حوضچه مذاب از سه روش لرزش مکانیکی، امواج التراسونیک و لرزش الکترومغناطیسی استفاده می شود. برای اعمال لرزش الکترومغناطیس، با قرار دادن یک سیم پیچ در نزدیکی قطعات مورد اتصال و اعمال نیروی متناوب به آن، میدان مغناطیس ایجاد می گردد. خطوط میدان مغناطیس با ایجاد ارتعاش در مذاب باعث ایجاد تلاطم بیشتر در مذاب و آزاد شدن گازهای محبوس شده در مذاب، توزیع بهتر ناخالصی ها و عناصر حل شده در مذاب حوضچه جوش و ریز شدن دانه های فلز جوش پس از انجماد می گردد [۱۲]. ساکتیول و همکاران تاثیر لرزش بر خواص اتصال فولاد زنگ نزن ۳۱۶ را مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که اعمال لرزش باعث ریزشدن ساختار و بهبود خواص مکانیکی گردیده است [۱۳].

1-Annealing and Pickling Line

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

واتاناب و همکاران نشان دادند که اعمال لرزش فراصوتی روی فولادهای زنگ نزن فریتی باعث کاهش اندازه دانه های فلز جوش در سرعت های پایین جوشکاری شده و دانه های هم محور در منطقه مرکزی جوش در سرعت های بالای جوشکاری را افزایش می دهد [۱۴]. مالینوسکی و همکاران نشان دادند که با اعمال میدان مغناطیسی با فرکانس های ۰ تا ۳۰ هرتز، اندازه دانه ها در منطقه جوش کاهش و مقاومت به ضربه و چقرمگی بهبود یافته است [۱۵]. دهملایی و همکاران نشان دادند که اعمال لرزش الکترومغناطیس بر اتصالات غیرمشابه فولاد مقاوم به حرارت HP و سوپرآلیاژ اینکولوی۸۰۰ باعث کاهش اندازه دانه فلز جوش و حذف ناحیه مخلوط نشده در کناره های خط جوش فلز HP گردیده است [۱۶].

اتصالات جوش فولاد API 5L- X70 اساساً دارای مقاومت به ضربه پایین بویژه در دمای زیر صفر بوده و حساس به تردی هیدروژنی هستند. از طرفی جوشکاری و اتصال این آلیاژها اجتناب ناپذیر است.

بنابراین انتخاب فلز پر کننده مناسب جهت دسترسی به اتصالات جوش با چقرمگی مناسب و خواص مطلوب ضروری است. فلزات پر کننده از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی نظیر ۳۰۹ L به دلیل داشتن استحکام مناسب، مقاومت به ضربه دمای پایین خوب، مقاومت به خوردگی عالی و کاهش حساسیت به تردی هیدروژنی در ناحیه متاثر از حرارت فولادهای API می‌تواند کاندیدای مناسبی برای اتصال این آلیازها باشد. بعلاوه پیش بینی می شود که اعمال لرزش با اصلاح ریزساختار و کسترش ناحیه دندریتی هم محور ریز در فلز جوش باعث بهبود خواص مکانیکی بویژه مقاومت به ضربه اتصالات جوش این آلیاژ در دمای زیر صفر گردد. از این رو در این پژوهش تاثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس تحت ولتاژهای اعمالی (۳۰-۰) ولت هم زمان با جوشکاری فولاد میکروآلیاژی API 5L- X70 بر ریزساختار و مقاومت به ضربه فلز جوش مورد بررسی قرار گرفته است.

2-روش تحقیق

در این پژوهش از ورق فولاد API X70 با ضخامت ۱۱ mm و دو فلز پرکننده ER80S-G و ER309L با قطر ۴/۲ mm استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده در جدول(۱) نشان داده شده است. طرح اتصال قطعات به صورت لب به لب و جناغی یک طرفه با زاویه پخ ۷۰° با فاصله ریشه ۲ mm و ارتفاع ریشه ۱ mm مطابق با استاندارد ASME Sec.IX در نظر گرفته شد. عملیات جوشکاری با فرآیند قوس تنگستن گاز و با قطبیت مستقیم(GTAW-DCEN) تحت محافظت گاز آرگون با درصد خلوص ۹۹/۵ درصد، دبی ۱۵ lit/mm و با جریان جوشکاری ۱۳۵ آمپر، ولتاژ ۱۵ ولت و سرعت متوسط ۰/۹ mm/s انجام شد.

اعمال لرزش حین جوشکاری با استفاده از یک میدان مغناطیسی متغییر تحت ولتاژهای اعمالی ۰، ۱۲، ۲۰ و۳۰ ولت انجام گردید. شکل(۱) شماتیکی از دستگاه اعمال لرزش الکترومغناطیس را نشان می دهد. جهت ارزیابی ریزساختار نمونه هایی به ابعاد ۱۰×۲۰ mmبه طوری که خط جوش در وسط آن بود، جدا گردید. نمونه ها با استفاده از سنباده های کاربید سیلیسیوم از شماره ۶۰ تا ۲۰۰۰ سنباده زنی شده و سپس به کمک پودر آلومینا با اندازه ذرات۱ میکرون پولیش داده شدند.

جهت حکاکی فلز پایه و فلز پرکننده ER80S-G از محلول نایتال ۲٪ (۲ میلی لیتر اسید نیتریک و ۹۸ میلی لیتر الکل اتیلیک) و جهت حکاکی فلز پرکننده ER309L از محلول اسید اگزالیک ۱۰ درصد (۹۰ میلی لیتر آب مقطر و ۱۰ گرم اسید اگزالیک) استفاده شد.

جهت مطالعه ربزساختار از میکروسکوپ های نوری و الکترونی SEM مجهز به سیستم تحلیل نقطه ای EDS استفاده گردید. جهت تعیین میزان فریت فلز جوشER309L از فریت اسکوپ و نمودار ساختاری WRC-1992استفاده گردید. سپس متوسط اندازه دندریت های موجود در فلزات جوش با استفاده از نرم افزار Image-Pro Plus اندازه گیری شدند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

جدول۱- ترکیب شیمیایی فلزات پایه و پرکننده (درصد وزنی)

عناصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Ti	Mo	Ni	Fe
X70	۰/۰۷	۰/۲۸	۱/۶۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۰/۰۱۲	۰/۰۵۱	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	-	۹۷/۹۳
ER80S-G	۰/۱۵	۰/۶۱	۱/۱۷	۰/۰۲۵	۰/۰۰۶	۰/۰۴۶	۰/۰۱۷	۰/۰۰۵	۰/۴۸	-	۹۷/۵۴
ER309L	۰/۰۳	۰/۴۵	۱/۷۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۲۵/۵	-	-	۰/۷۵	۱۴/۸	۵۶/۶۶

جدول۲- اندازه متوسط دندریت ها در فلز جوش ER309L

اندازه‌ی متوسط دندریت‌ها (µm)	شرایط مختلف لرزش
۱۸/۱۹	بدون لرزش
۸/۰۱	با لرزش ۳۰۷

جدول۳- میانگین عدد فریت فلز جوش ER309l حاصل از فریتوسکوپ

میانگین عدد فریت	نمونه
۵/۳	نمونه بدون لرزش
۶	نمونه تحت ولتاژ اعمالی ۳۰ ولت

جهت ارزیابی خواص ضربه فلزات جوش از آزمون ضربه چارپی طبق استاندارد ASTM E23 استفاده شد. از فلز جوش ER80S-G تعداد ۹ نمونه تهیه شد. آزمون ضربه در سه دمای محیط، ۰°C و ۲۰ °C- و در هر دما برای سه نمونه انجام گردید. از فلز جوش ER309L تعداد ۶ نمونه تهیه گردید که ۳ نمونه در دمای محیط و ۳ نمونه در دمای ۲۰°C- تحت آزمون ضربه قرار گرفت.

3-نتایج و بحث

3-1- بررسی های ریز ساختاری

3-1-1- ریزساختار فلز پایه

شکل(۲) تصویر میکروسکوپ نوری و الکترونی از فلز پایه فولاد API X70 را نشان می دهد. مطابق شکل فولاد X70 دارای ساختار ریزدانه و حاوی دو فاز فریت و پرلیت است. در تصویرمناطق تیره نشان دهنده پرلیت و مناطق روشن فاز فریت را نشان می دهند.

همان طور که از شکل مشاهده می شود فریت موجود در ریزساختار به شکل های فریت پرویوتکتوئید، فریت چندوجهی و فریت هم محور بوده که در مرحله تولید فولاد تشکیل گردیده اند فرآیند تولید فولادهای میکروآلیاژی، فرآیند نورد کنترل شده است که شامل عملیات نورد در دمای بالای تبلور مجدد آستنیت و هم‌زمان کاهش ضخامت می‌باشد.

دانه‌های ریز آستنیت توسط رسوبات نیترید تیتانیم، که از رشد دانه‌های آستنیت جلوگیری می‌کند، ایجاد می‌شود. با کاهش دما، تبلور مجدد به‌طور جزئی و یا کامل متوقف می‌شود و دانه‌های کرنش یافته به‌صورت کشیده تولید می‌شوند. پس از آن در مرحله پایانی نورد، برای رسیدن به ضخامت نهایی، کاهش ضخامت صورت می‌پذیرد و اندازه دانه‌های آستنیت توسط رسوبات کربونیتریدی نظیر (Ti,Nb)C کاهش می‌یابد. پس از پایان نورد هسته‌های فریت در مرزدانه‌های آستنیت جوانه زده و این امر منجر به ساختار ریزدانه فریت هم‌محور و پرلیت می‌شود [۱۷].

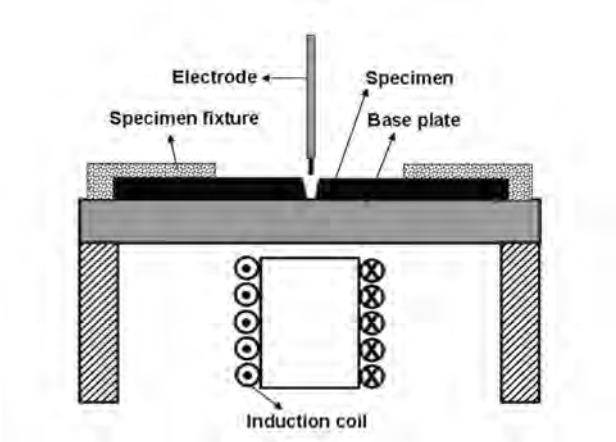
3-1-2- ریزساختار فلزات جوش

شکل(۴) تصاویر میکروسکوپ نوری از فلز جوش ER80S-G در شرایط بدون لرزش و تحت شدت های مختلف لرزش الکترومغناطیس را نشان می دهد. همان طور که دیده می شود با افزایش شدت لرزش اعمالی ریز ساختار ظریف تر و اندازه دانه ها کوچک تر شده است.

استفاده از هم زدن حوضچه مذاب به روش الکترومغناطیس، به دو دلیل می تواند منجر به ریز شدن دانه های فلز جوش شود. اول، به دلیل شکسته شدن نوک دندریت ها در ناحیه خمیری و جدا شدن دانه‌های نیمه ذوب شده در مرز ذوب و ورود آنها به حوضچه ی مذاب حین اعمال لرزش می تواند مراکز

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

جوانه زنی ناهمگن در مذاب را افزایش داده و منجر به ریزدانگی شود [۱۹]. دلیل دیگر می تواند کاهش دمای حوضچه مذاب و پایداری بیشتر جوانه های ناهمگن در حوضچه مذاب ناشی از تلاطم بیشتر و همزدن حوضچه جوش و در نتیجه انتقال همرفتی حرارت حوضچه جوش در اثر اعمال لرزش الکترومغناطیس باشد. جوانه زنی ناهمگن بر روی رسوبات موجود در فلز جوش، حاصل از عناصر آلیاژی کاربیدزا و نیتریدزا (نظیر نیوبیوم، تیتانیوم و کروم) نیز می‌تواند صورت گیرد). لذا با اعمال لرزش این جوانه ها به میزان بیشتری در حوضچه ی جوش پایدار شده و مراکز جوانه‌زنی را افزایش می دهد و منجر به ریزدانگی می شود.



شکل۱- تصویر شماتیک دستگاه لرزش الکترومغناطیس [۱۶].

شکل(۴-الف) نشان می دهد که ریزساختار نمونه بدون لرزش شامل فریت مرزدانه‌ای، فریت ویدمن اشتاتن و جزایر M/A است، که در مرزدانه‌های فریت قرار گرفته اند. از شکل مشاهده می شود که جزایر M/A در نمونه بدون لرزش به صورت یک شبکه پیوسته بوده و از آن‌جا که این جزایر مناطق تردی هستند باعث افت خواص مکانیکی از جمله خواص ضربه می‌شود [۲۰].

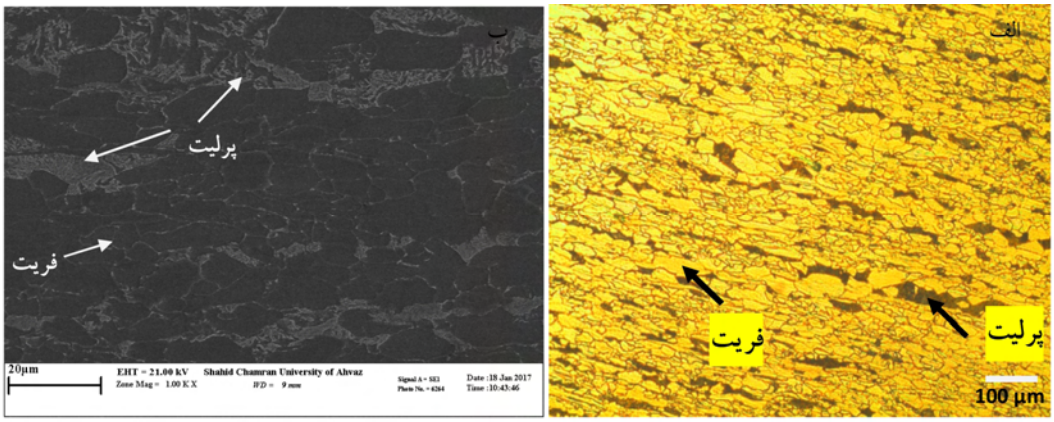
شکل(۴-ب) نشان می دهد که ریزساختار نمونه تحت ولتاژ لرزش۱۲ ولت، بیشتر شامل فریت چندوجهی به همراه جزایر M/A است که این جزایر در این شکل برخلاف نمونه بدون لرزش، فاقد شبکه پیوسته بوده و به‌صورت پراکنده شکل گرفته‌اند. این مورد می‌تواند به دلیل تلاطم بیشتر مذاب و سرد شدن سریع‌تر جوش به‌دلیل اعمال لرزش باشد(شکل۴-ج). ریزساختار نمونه تحت ولتاژ لرزش ۲۰ ولت را نشان می‌دهد که مشابه نمونه(۴-ب) بوده با این تفاوت که به دلیل لرزش شدیدتر و تلاطم بیشتر مذاب، جزایر M/A کوچک‌تر و اندازه‌ی دانه‌ها ظریف‌تر شده است. ریزساختار نمونه تحت ولتاژ لرزش۳۰ ولت در شکل(۴-د) نشان داده شده است. در این شکل ریزساختار نسبت به نمونه‌های قبلی ظریف‌تر و ریزتر بوده و شامل فریت سوزنی است. حضور فریت سوزنی در این شرایط نشان دهنده مکان‌های بیشتر جوانه‌زنی ناشی از اعمال لرزش۳۰ ولت است. اعمال لرزش تحت ولتاژ۳۰ ولت از طرفی باعث ریزتر شدن رسوبات (جدول۲) و توزیع یکنواخت تر آنها در فلز جوش و از طرف دیگر باعث شکست بیشتر نوک دندریت ها و جدا شدن دانه های نیمه ذوب شده در مرز ذوب می شود که هر دو عامل بویژه رسوبات باعث افزایش مراکز جوانه زنی فریت سوزنی و لذا سهولت تشکیل آن می گردند [۱۸]. تصاویر SEM مربوط به فلز جوش ER80S-G قبل وبعد از اعمال لرزش در شکل(۵) نشان داده شده است.

ریز شدن و توزیع بهتر جزایر M/A با افزایش شدت لرزش اعمالی در این تصاویر به وضوح قابل مشاهده است. شکل(۶) ریز ساختار میکروسکوپ نوری فلز جوش ER309L بدون لرزش و با لرزش اعمالی۳۰ ولت را نشان می دهد. فلز جوش ER309Lدر مد انجمادی فریتی- آستنیتی(FA) انجماد می یابد.

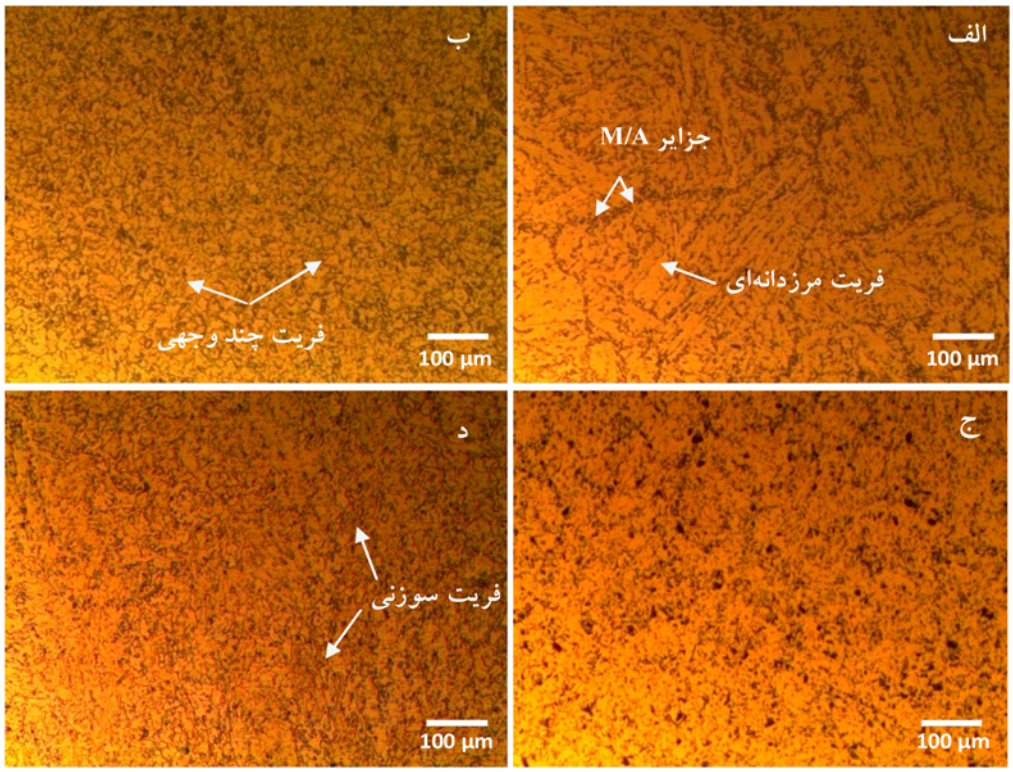
در این مد انجمادی، انجماد با جوانه زنی فریت دلتا شروع می‌شود و در ادامه طی یک واکنش پریتکتیک- یوتکتیک، آستنیت در طول مرزهای سلولی و اسکلتی فریت ایجاد می شود [۱۱]. تصاویر SEM مربوط به فلز جوش ER309L قبل وبعد از اعمال لرزش در شکل(۷) نشان داده شده است. شکسته شدن و ریزتر شدن دندریت ها به وضوح در شکل قابل مشاهده است. شکل(۶) نشان می دهد که میزان فریت فلز جوش بعد از اعمال لرزش افزایش یافته است.

برای بررسی تاثیر لرزش الکترومغناطیس بر میزان فریت فلز

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]



شکل۲ – تصاویر میکروسکوپی از ریزساختار فلز پایه فولاد X70 الف– میکروسکوپ نوری، ب– میکروسکوپ الکترونی



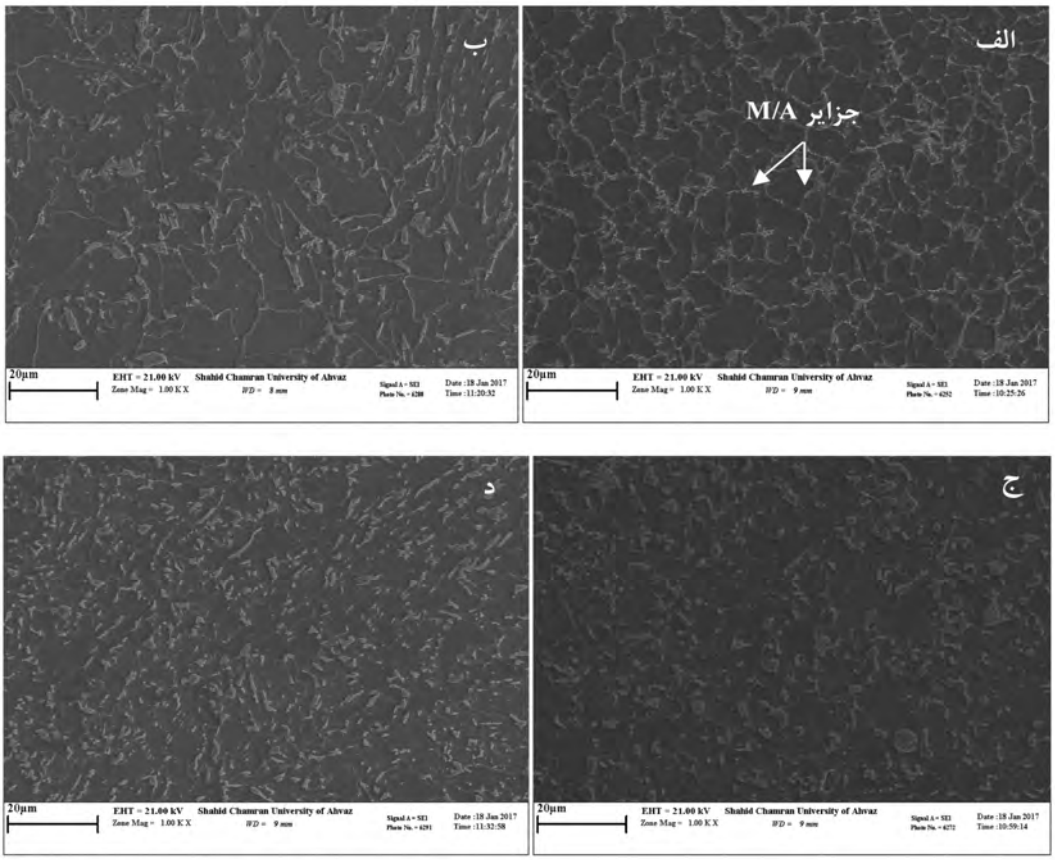
شکل۳– ریز ساختار فلز جوش ER80S-G در شرایط مختلف الف– بدون لرزش، ب– با لرزش تحت ولتاژ ۱۲ولت، ج– با لرزش تحت ولتاژ ۲۰ ولت و د– با لرزش تحت ولتاژ ۳۰ ولت

جوش از فریتوسکوپ و نمودار ساختاری WRC-1992 استفاده شد. نتایج در جدول(۳) نشان داده شده است. نتایج فریتوسکوپ نشان می دهد که با اعمال لرزش، فریت فلز جوش افزایش یافته است. در اثر انجماد و سرد شدن سریع فلز جوش، فرصت جوانه زنی آستنیت و تبدیل فریت به آستنیت کاهش می یابد. از طرفی با اعمال لرزش (شکل۶– ب) به دلیل تلاطم و جابجایی بیشتر مذاب، دمای حوضچه کاهش و شیب دمایی افزایش می یابد.

بنابراین سرعت سرد شدن مذاب نیز افزایش می یابد که این باعث کاهش زمان جهت تبدیل فریت به آستنیت می شود و لذا از آنجا که ادامه استحاله و تشکیل آستنیت نیازمند نفوذ است، با افزایش سرعت انجماد و سرد شدن سریع تر حوضچه جوش، نفوذ کمتر می شود و مقدار آستنیت در ساختار فلز جوش به میزان بیشتری کاهش می یابد.

افزایش فریت فلز جوش می‌تواند باعث بهبود خواص مکانیکی و کاهش‌حساسیت به ترک داغ فلز جوش‌گردد [۱۱و۱۲].

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]



شکل۴- تصاویرSEM از فلز جوش ER80S-G در شرایط مختلف الف- بدون لرزش، ب- با لرزش تحت ولتاژ ۱۲ولت، ج- با لرزش تحت ولتاژ ۲۰ ولت و د- با لرزش تحت ولتاژ ۳۰ ولت

3-2- مقاومت به ضربه فلزات جوش

نتایج آزمون ضربه مربوط به فلز جوش ER80S-G در جدول(۴) آورده شده است. از جدول(۴) مشاهده می شود که با اعمال و افزایش شدت لرزش الکترومغناطیس در هر سه دمای محیط، ۰°C و ۲۰°C- انرژی ضربه فلز جوش افزایش یافته است و کمترین انرژی ضربه در تمام دماها مربوط به نمونه بدون لرزش و بیشترین آن در نمونه تحت لرزش با ولتاژ ۳۰ ولت است. نتایج نشان می دهد که انرژی ضربه فلز جوش حاصل از اعمال لرزش تحت ولتاژ ۳۰ ولت در دماهای محیط، ۰°C و ۲۰°C- به ترتیب ۵۳، ۲۹ و ۳۶ درصد افزایش یافته است. همان طور که در مباحث ریز ساختاری (شکل۴) بیان شد ریزساختار نمونه بدون لرزش شامل فریت مرزدانه ای و فریت ویدمن اشتاتن و جزایر M/A که بصورت شبکه پیوسته بوده است.

از آنجا که نرخ سرد شدن حوضچه جوش در نمونه بدون لرزش کم تر بوده است، در نتیجه استحاله آستنیت به فریت، به دلیل افزایش میزان نفوذ، کربن بیشتری به آستنیت پس زده می‌شود و در نهایت آستنیت باقیمانده که به جزایر M/A تبدیل می‌شود از کربن غنی تر می گردد و باعث ترد تر شدن مناطق M/A می‌شود و در نتیجه باعث کاهش مقاومت به ضربه جوش می شود [۲۰].

هم چنین در کنار جزایر M/A ، وجود فریت مرزدانه ای و فریت ویدمن اشتاتن به دلیل فراهم آوردن مسیرهای آسان برای انتشار ترک، برای چقرمگی فلز جوش مضر هستند [۱۲]. با افزایش شدت لرزش به ۱۲ و ۲۰ ولت فریت چند وجهی در ساختار شکل گرفته است و جزایر M/A بصورت ریزتر و با توزیع بهتر شکل گرفته اند که این عامل باعث بهبود چقرمگی فلز جوش شده است.

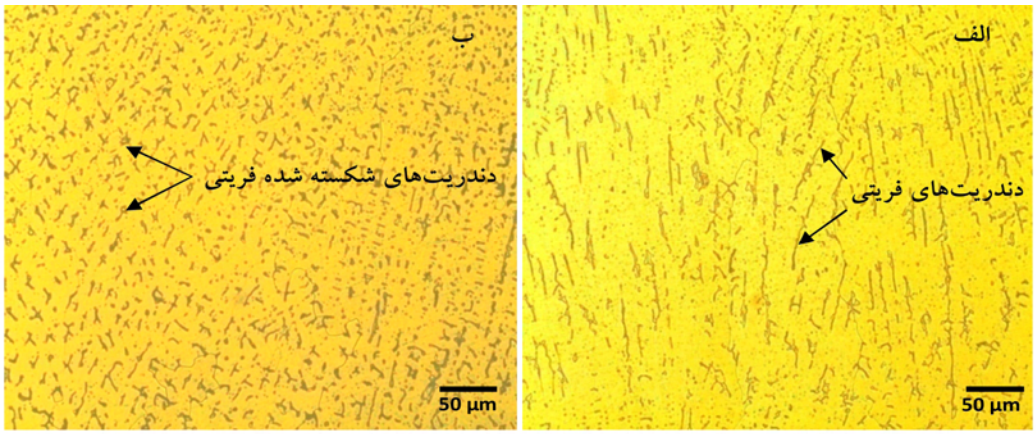
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

جدول۴- نتایج آزمون ضربه فلز جوش ER80S-G در شرایط مختلف بر حسب ژول

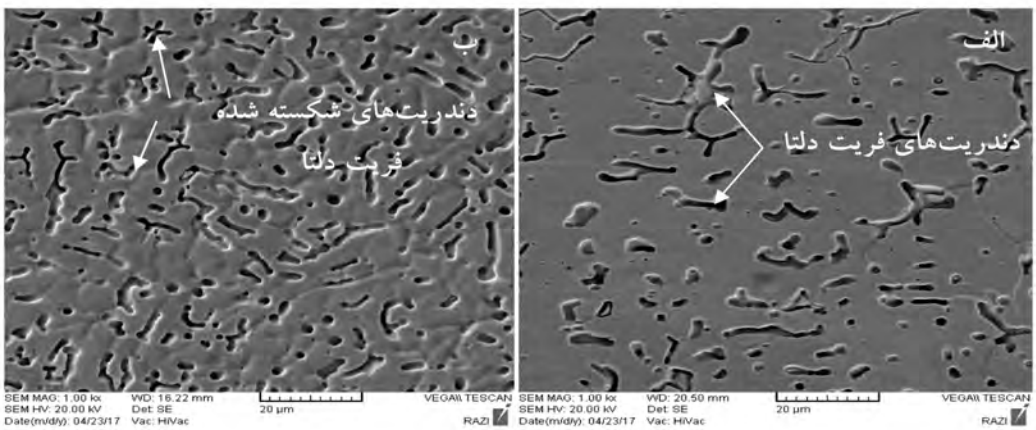
انرژی ضربه در دمای ۲۰- درجه سانتیگراد	انرژی ضربه در دمای صفر درجه سانتیگراد	انرژی ضربه در دمای محیط	انرژی ضربه در شرایط مختلف لرزش
۵/۵	۷	۱۴	نمونه بدون لرزش
۶	۸	۱۷	نمونه با لرزش ۱۲ ولت
۶/۵	۸/۵	۲۰	نمونه با لرزش ۲۰ ولت
۷/۵	۹	۲۱/۵	نمونه با لرزش ۳۰ ولت

جدول ۵- نتایج آزمون ضربه فلز جوش ER309L بر حسب ژول

انرژی ضربه در دمای ۲۰- درجه سانتی گراد	انرژی ضربه در دمای محیط	انرژی ضربه در شرایط مختلف لرزش
۹۹/۵	۱۰۴/۵	نمونه بدون لرزش
۱۰۴/۵	۱۲۴	نمونه با لرزش ۳۰ ولت



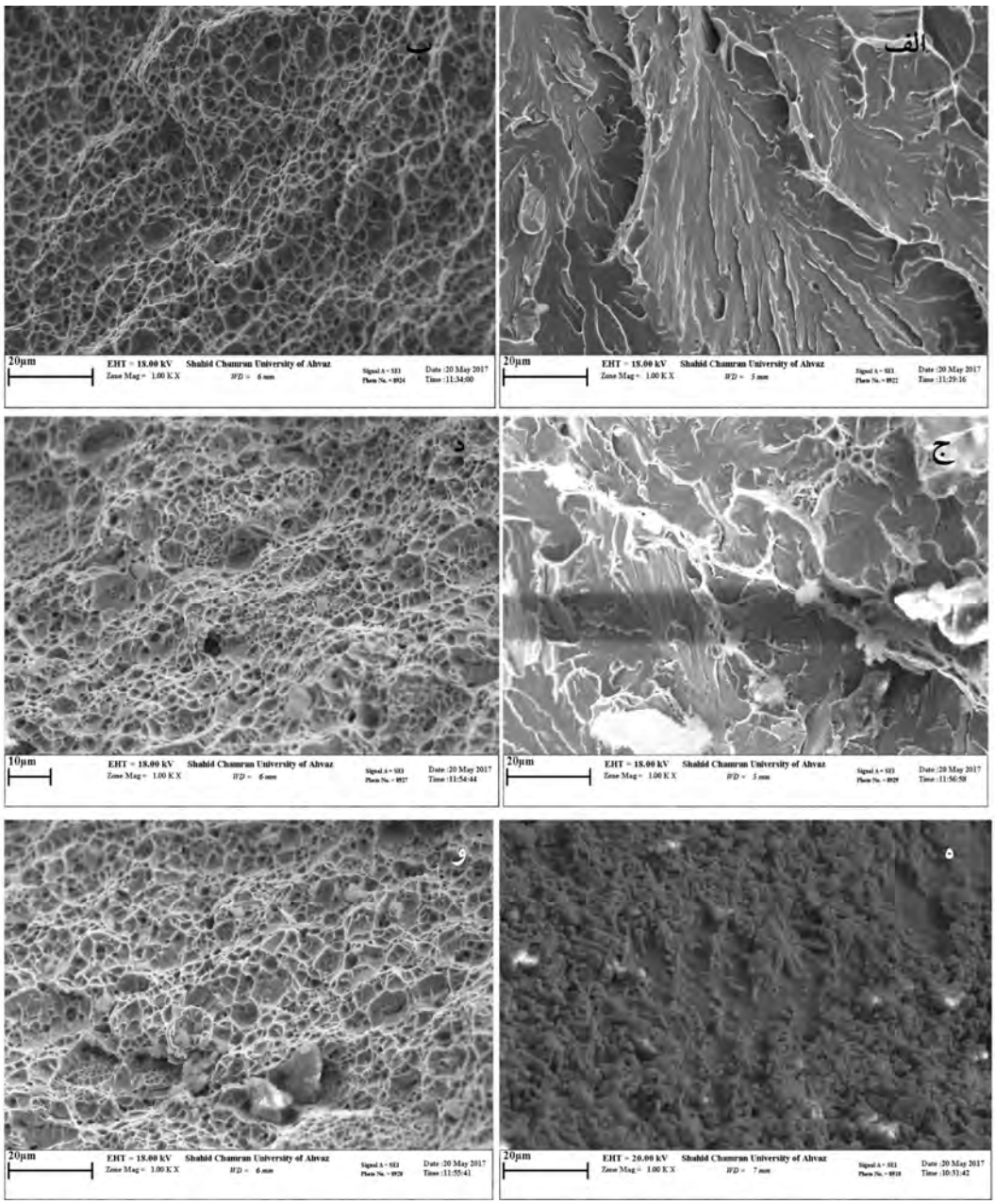
شکل۵- تصاویر میکروسکوپ نوری از فلز جوش ER309L الف- بدون لرزش و ب- با لرزش تحت ولتاژ اعمالی ۳۰ ولت



شکل۶- تصاویر SEM از فلز جوش ER309L الف- بدون لرزش و ب- با لرزش تحت ولتاژ ۳۰ ولت

سرد شدن بیشتر حوضچه جوش و بیشتر شدن مراکز جوانه‌زنی و پایدار شدن جوانه های تشکیل شده در نمونه با لرزش۳۰ ولت منجر به ایجاد ریز ساختار ظریف تر و تشکیل فریت سوزنی شده است و از این طریق چقـرمگی فلـز جوش افزایش یافته است. فریت سوزنی باعث افزایش مقاومت در برابر انتشار ترک در فلز جوش می گردد. از طرفی اندازه و توزیع رسوبات فلز جوش نیز دارای اثرات مهمی بر انرژی ضربه فلز جوش است. بررسی ها نشان داده است که با کاهش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

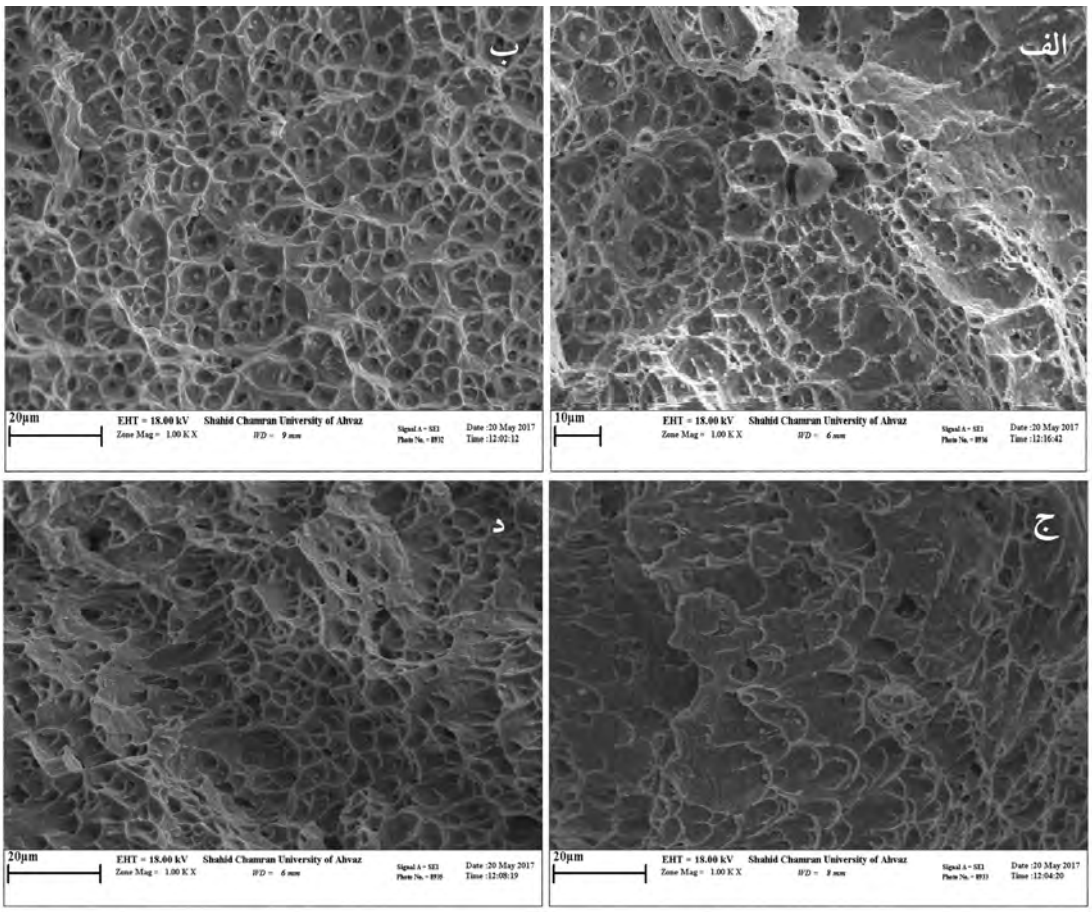


شکل۷- تصاویر SEM از سطح مقطع شکست فلز جوش ER80S-G در شرایط مختلف الف- دمای محیط بدون لرزش، ب- دمای محیط و لرزش ۳۰ ولت، ج- دمای ۰°C و بدون لرزش، د- دمای ۰°C و لرزش ۳۰ ولت، ه- دمای ۲۰°C- و بدون لرزش و و- دمای ۲۰°C- و لرزش ۳۰ ولت

اندازه ی رسوبات و توزیع یکنواخت تر آنها، شرایط انتشار ترک مشکل می گردد [۱۸]. افزایش لرزش الکترومغناطیس باعث ریزتر شدن و توزیع بهتر رسوبات و لذا بهبود مقاومت به ضربه فلز جوش گردیده است. تصاویر شکست نگاری از فلز جوشER80S-G در شکل(۸) نشان داده شده است. از شکل مشاهده می شود که با افزایش لرزش اعمال شده تمایل به شکست نـرم افـــزایش یـافته است. شکل دیمپـل های موجود در شکل(۸)، تغییرات فوق را تائید می کند. تصاویر نشان می‌دهد که اعمال لرزش الکترومغناطیس بر اندازه و شکل دیمپل ها موثر بوده است.

جدول(۵) نتایج آزمون ضربه فلز جوش ER309L را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که با اعمال لرزش الکترومغناطیس انرژی ضربه فلز جوش ER309L در دمای محیط و در دمای ۲۰°C- به ترتیب ۱۸ و ۵ درصد افزایش یافته است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]



شکل۸- تصاویر SEM از سطح مقطع شکست فلز جوش ER309L در شرایط مختلف الف- دمای محیط بدون لرزش ب- دمای محیط و لرزش ۳۰ ولت ج- دمای ۲۰°C- و بدون لرزش د- دمای ۲۰°C- و لرزش۳۰ ولت

مقایسه این نتایج با جدول(۴) نشان می دهد که اعمال لرزش الکترومغناطیس اثرات بیشتری را در بهبود مقاومت به ضربه ER80S-Gدر مقایسه با ER309L داشته است که این مسئله می تواند به تشکیل فریت سوزنی در فلز جوش ER80S-G در اثر اعمال ارتعاش مربوط گردد. مشخصات ریز ساختاری فلز جوش شامل اندازه ی دانه ها، شکل، اندازه، مقدار وتوزیع رسوبات و نوع و مقدار فریت بویژه فریت سوزنی بر انرژی ضربه موثر است. همانگونه که در مباحث ریزساختاری فلز جوش ER309L بیان شد، لرزش موجب شکسته شدن دندریت ها و افزایش ریزساختار ریز و هم محور در فلز جوش گردید. در جوشکاری ارتعاشی شکست نوک دندریت‌ها و جدا شدن دانه های نیمه ذوب شده باعث افزایش مراکز جوانه زنی غیرهمگن و توزیع آنها در حوضچه مذاب می گردد.

افزایش محل‌های جوانه‌زنی باعث ریز شدن دانه‌ها و یکنواخت و یکنواخت و هم محوری شدن آنها می گردد [۱۹]. تشکیل دانه‌های هم‌محور ریز در ناحیه جوش باعث پیچیدگی ساختار و افزایش موانع در مقابل انتشار ترک می شود، و لذا باعث بهبود چقرمگی فلز جوش می گردد [۱۹و۲۱]. از طرفی با اعمال لرزش بدلیل سریع سرد شدن فلز جوش استحاله فریت دلتا به آستنیت به تاخیر می افتد و در نتیجه لرزش باعث افزایش فریت فلز جوش می گردد. فاز آستنیت به دلیل داشتن شبکه کریستالی مکعبی وجوه مرکزدار، انعطاف پذیرتر از فاز فریت با شبکه کریستالی مکعبی مرکزدار است. که این مسئله به دلیل صفحات لغزش فعال تر در شبکه کریستالی مکعبی وجوه مرکزدار نسبت به شبکه کریستالی مکعبی مرکزدار است. از این رو با افزایش فریت چقرمگی کاهش می یابد. ولی ریزشدن دندریت های فلز جوش و ایجاد دانه های هم محور ریز منجر به افزایش چقرمگی فلز جوش می گردد. در واقع

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

این دو عامل اثر گذار در مقابل هم قرار می گیرند که در نهایت می‌توان دریافت که اثر ریزدانگی بر افزایش حجم فریت در نمونه با لرزش غالب آمده و منجر به افزایش چقرمگی فلز جوش می شود. شکل(۹) نتایج شکست نگاری فلز جوش ER309L را نشان می دهد. از شکل مشاهده می شود که شکست نمونه ها در دماهای محیط و ۲۰°C- هر دو به صورت داکتیل صورت گرفته است. شکل و اندازه دیمپل ها در تصاویر نشان می دهد که با اعمال لرزش الکترومغناطیس تمایل به شکست نرم افزایش یافته است.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر اعمال لرزش الکترومغناطیس تحت ولتاژهای مختلف (۰، ۱۲، ۲۰و۳۰) ولت بر ریزساختار و مقاومت به ضربه فلز جوش در اتصالات جوشکاری شده فولاد API X70 به روش GTAW با دو فلز پرکننده ER80S-G و ER309L مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.

-در اثر اعمال لرزش روی فلز جوشER80S-G، دانه ها ظریف تر و جزایر M/A ریزتر و توزیع آنها یکنواخت تر گردید. بیشترین ریزدانگی فلز جوش ER80S-G در لرزش اعمالی تحت ولتاژ ۳۰ ولت مشاهده گردید .

- در اثر اعمال لرزش الکترومغناطیس فریت فلز جوش ER309L به میزان ۱۳درصد افزایش یافت و اندازه متوسط دندریت ها در فلز جوش ازμm ۱۸/۱۹ به μm۸/۰۱ کاهش یافت .

-اعمال لرزش الکترومغناطیس باعث افزایش انرژی ضربه فلز جوش ER80S-G به میزان ۵۳، ۲۹ و ۳۶ درصد به ترتیب در دماهای محیط، ۰°C و ۲۰°C- گردید.

-اعمال لرزش الکترومغناطیس باعث افزایش انرژی ضربه فلز جوش ER309L به میزان ۱۸ و ۵ درصد به ترتیب در دماهای محیط و ۲۰°C- گردید.

منابع

1-Kneissl. A.C, et al." HSLA Steels, Processing, Properties and Applications", Miner.Met. Mater. pp 99–105, 1992.

2-Gladman.T, " The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels". London: The Insti-tute of Material, Ed. Iustrated, 1997.

3-Pouraliakbar. H, et al. " Prediction of HAZ with Chemical Composition and Tensile Test of X70 Pipeline steels", J. Iron. Steel Res. Int;22(5.), 2015.

4-Wei Liu, et al." Hybrid Laser-Arc Welding of Advanced High-Strength Steel", J.Mater. Process. Technol;214(12):2823–33, 2014.

5-Atabaki MM, et al. " Hybrid Laser/Arc Welding of Advanced High Strength Steel to Aluminum Alloy by using Structural Transition" insert. Mater.;75(15):120–35, 2015.

6-Fereidouni.F, Halvaee.A, Pourkia.N, "Effect of Wire Chemical Composition on Microstructure and Mechanical Properties of Submerged Arc- Welded API X70 Weld Metal". IIWC intetnational congress on welding joining, 2009.

7-Zhang. Z, Farrar. RA," Influence of Mn and Ni on the Microstructure and Toughness of C-Mn-Ni Weld Metals ", mater. Sci. Technol 1996.

8-Barbaro. F.J, Krauklis. P, Easterling. KE, " Formation of Acicular Ferrite at Oxide Particles in Steels". Mater. Sci. Technol 1989 .

9-Nedjad. SH, Farzaneh. A, " Formation of Fine Intragranular Ferrite in Cast Plain Carbon Steel Inoculated by Titanium Oxide Nano Powder", Scr. Mater 2007.

10-Shim. JH, et al. " Nucleation of Intragranular Ferrite at Ti2O3 Particle in Low Carbon Steel ". Acta Mater 1999.

11-Lippold.J.C, Kotecki.D.J, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel", 2005.

12-Kou.S, "Welding Metallurgy", 2nd ed, John Wiley and Sons, 2003.

13-Sakthivel.P and P Sivakumar," Effect of Vibration in TIG and Arc Welding using AISI316 Stainless Steel"Int.J. ngg. Res. & Sci. & Tech. 2014.

14-watanabe.T،Shiroki.M،Yanagisawa.A، Sasaki.T "Improvement of Mechanical Properties of Ferritic Stainless Steel Weld Metal by Ultrasonic Vibration" . Journal Of Material Processing Technology, pp1646-1651,2010.

15-Malinowski.M, Den.G, Vink, W.J.P, " Effect of Electromagnetic Stirring on GTA Welds in Austenitic Stainless Steel " , welding research supplement , pp

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

52-59, 1990.

16-Dehmolaei.R,.Shamaniana.M,Kermanpur.A," Effect of Electromagnetic Vibration on the Unmixed Zone Formation in 25Cr–35Ni Heat Resistant Steel/alloy 800 Dissimilar Welds", material characterization , vol. 59, pp 1814-1817,2008.

17-Sampath.K, " An Understanding of HSLA-65 Plate Steels",Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 15(1), 2006.

18-Pamnani.R, Jayakumar.T, Vasudevan.M, Sakthivel.T, " Investigation on the Impact Ttoughness of HSLA Steel Arc Welded Joints ".Journal of manufacturing processes, pp 75-86, 2016.

19-Zeidabadi.H, Mirdamadi.S, Godarzi.M, "Effect of Vibration During GTAW Welding on Microstructure and Mechanical Properties of Ti6Al4V", Russian Journal of Non Ferrous Metals, Vol. 56, No.2, pp 217-221, 2015.

20-Xu.W.W, Wang.Q.F, Pant.T, Su.H, Yang.C.F, "Effect of Welding Heat input on Simulated HAZ Microstructure and Toughness of a V-N Micro alloyed Steel", Proceedings of Sino-Swedish Structural Materials Symposium, pp 234-239, 2007.

21-Bala Srinivasan.P, Muthupandi.V, Dietzel.W, Sivan.V, "Microstructure and Corrosion Behavior of Shielded Metal Arc-Welded Dissimilar Joints Comprising Duplex Stainless Steel and Low Alloy Steel", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol 15, Issue 6, pp 758-764, 2006.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]