نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره 1، بهار و تابستان1398، صفحه 149-137

تأثیر ارتعاش هارمونیک در حین جوشکاری GMAW روی خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم AA5083-H321

رضا تماس گوابری[1]، علیرضا ابراهیمی[2*]، سید مهدی عباسی[1]، علیرضا یزدی پور[1]

۱ – مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

*۲– دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۲ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۴)

چکیده

در تحقیق حاضر اثر ارتعاش محدوده رزونانس (تحت فرکانس ۷۵ هرتز) در حین جوشکاری GMAW آلیاژ آلومینیوم AA5083-H321 مورد بررسی قرار گرفت. نیروی ارتعاشی اعمالی در حدود ۸۵۰–۲۲۰۰ نیوتون بوده و سایر پارامترهای جوشکاری ثابت در نظر گرفته شدند. بررسی استحکام کششی و همچنین سختی سنجی نمونه های جوشکاری شده انجام شد. همچنین سطوح شکست نمونه ها بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش نیروی ارتعاش، استحکام کششی و استحکام شکست نمونه های جوشکاری شده در مقایسه با نمونه جوشکاری شده بدون ارتعاش به ترتیب در حدود ۳ و ۹ درصد افزایش یافته است. در نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش، اندازه متوسط دانه ها در حدود۲۰۰ میکرومتر و عرض ناحیه متأثر از حرارت در حدود ۱۸۰۰ میکرومتر است. در حالیکه با اعمال ارتعاش در حین جوشکاری و با افزایش نیروی ارتعاش از ۸۵۰ تا ۲۲۰۰ نیوتون، اندازه متوسط دانه ها به حدود ۷۵ میکرومتر کاهش یافته و نیز وسعت ناحیه متأثر از حرارت از حدود ۱۰۰۰ به ۷۰۰ میکرومتر، یعنی در حدود ۴۴ الی ۶۱ درصد کاهش یافت.

کلمات کلیدی: جوشکاری ارتعاشی، جوشکاری آلومینیوم، سختی سنجی، استحکام کششی، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳.

Effect of Harmonic Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of AA5083-H321 Aluminum Alloy GMAW Welds

R. Tamas Gavabari[1], A. Ebrahimi[2*], S. M. Abbasi[1] and A. Yazdipour[1]

1- Metallic Materials Research Center, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2*-Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

(Received 24 October 2018 ; Accepted 3 February 2019)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: arebrahimi@aut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

Abstract

In this research, the effect of vibration at the resonant range (75 Hz) on the hardness and tensile strength of AA5083-H321 aluminum alloy, were welded by gas metal arc welding (GMAW) investigated. Vibration forces were ranged from 850 N to 2200 N, under identical welding parameters. Tensile strength and hardness testing of welded samples were performed. After mechanical tests, the fracture surfaces of welds were examined using scanning electron microscope (SEM) and discussed. The results showed that with increasing vibration force, the tensile strength and fracture strength of the specimens were welded during vibration, were increased by about 3 and 9 percent, respectively, compared to the non-vibrated weld sample. However, no significant change was observed in the hardness of the welded specimens. Mean grains size and heat affected zone of the sample was welded was welded with conventional GMAW, were about 200 μm and 1800 μm, but due to inducing vibration, as vibration force increased from 850 N to N 2200 N, Mean grains size was reduced to about 75 μm and HAZ was reduced from about 1000 μm to 700 μm, that is, about 44 to 61%.

Keywords: Vibration Weld Conditioning (VWC), Aluminum Alloy Welding, Hardness Test, Tensile Strength, 5083 Aluminum Alloy.

1- مقدمه

آلومینیوم و آلیاژهای آن، به دلیل ترکیبی از ویژگی هایی جذاب خود مانند سبک بودن، استحکام متوسط، مقاومت به خوردگی خوب، کارپذیری، قابلیت جوش پذیری خوب و همچنین هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. ریزساختار آلیاژ ۵۰۸۳ AA در دمای محیط، شامل دو فاز α (به صورت محلول جامدی از منیزیم در آلومینیوم) و ترکیب بین فلزی Mg_2Al_3 (فاز سخت و ترد) است. مقاومت به خوردگی این آلیاژها آنها را برای بدنه قایق های کوچک و ساختمان اصلی کشتی های اقیانوس پیما مناسب می گرداند. روش GMAW بطور عمده برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار می گیرد. در جوشکاری، بدلیل توزیع غیر همگن دما در منطقه جوش و فلز اطراف، تنش پسماند کششی در سطح جوش بوجود می آید [۱-۳]. ترکیب تنش های پسماند با نیروهای اعمالی در حال کار قطعات، منجر به کاهش زمان جوانه زنی ترک [۴و۵]، ایجاد اعوجاج، افزایش احتمال شکست و افزایش احتمال خوردگی تنشی می شود [۶و۷].

اعمال ارتعاش در حین جوشکاری (VWC) از جمله روش‌های مبتنی بر تنش زدایی ارتعاشی قطعات جوشکاری شده است و سازه در حین اعمال بارهای دینامیکی حاصل از ارتعاش جوشکاری می شود. اعمال ارتعاش به سازه توسط یک موتور ارتعاشی و با تغییر مکان جرم های خارج از مرکز نسبت به محور موتور ارتعاشی، انجام می شود. در این روش با توجه به ایجاد اغتشاش و اختلاط در حوضچه مذاب در اثر اعمال ارتعاش، تغییرات ریزساختاری و همچنین تغییرات خواص مکانیکی ایجاد می شود [۱و۲]. ارتعاش در حین جوشکاری، با تأثیر بر حوضچه مذاب، انتقال حرارت را تسریع می بخشد و به این ترتیب روی جوانه‌زنی تأثیر می‌گذارد [۱، ۲، ۸ و ۹].

جوشکاری تحت ارتعاش در زمان کوتاهتر، با صرف انرژی کمتر، عدم تولید آلایندگی و صرف هزینه کمتر انجام پذیر است [۱۰و۱۱].

تاکنون مطالعاتی در خصوص بررسی اثر بخشی اعمال ارتعاش در حین جوشکاری روی تنش پسماند و خواص مکانیکی مقاطع جوشکاری شده، انجام شده است، که از آن جمله می‌توان به افزایش ریزدانگی و سختی مرکز جوش، مقاطع جوشکاری شده فولاد کم کربن [۱۲و۱۳]، بهبود استحکام ضربه مقاطع جوشکاری شده فولاد کم کربن۱۰۸ A [۲و۸]، افزایش استحکام تسلیم نمونه های جوشکاری شده فولاد ۱۰۱۸ AISI [۱۴] اشاره کرد. همچنین افزایش استحکام ضربه نمونه های جوشکاری شده فولادی ۳۰۴ و ۱۰۱۸ AISI [۱۵و۱۶]، افزایش سختی قطعات جوشکاری شده فولاد کم کربن B-2026 [۱۷]، افزایش سختی و استحکام نمونه های فولادی جوشکاری شده [۱۸و۱۹] از موارد قابل ذکر هستند. کاهش تنش پسماند در نمونه های جوشکاری شده آلومینیومی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

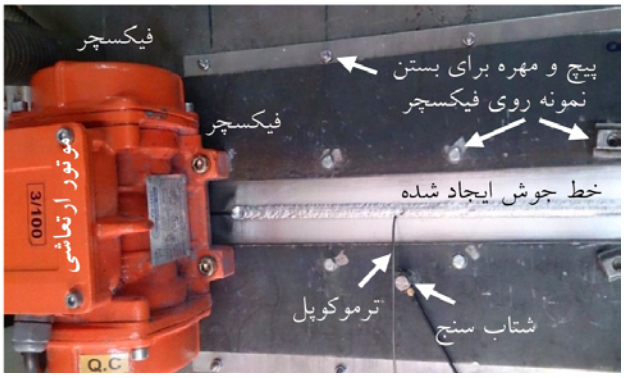
از آلیاژ [۲۰] AA6061-T6 ، افزایش سختی و ریزدانگی و نیز کاهش حساسیت به ترک گرم نمونه های آلومینیومی AA ۷۰۷۵ [۲۱] و افزایش سختی و استحکام کششی نمونه های آلومینیومی AA-5052-H32 [۲۲و۲۳] نیز مورد بررسی قرار گرفته اند.

اکثر محققین به مطالعه در خصوص تأثیر ارتعاش روی کاهش تنش پسماند پرداخته و یا برخی از آنها خواص مکانیکی نمونه های فولادی را بررسی کرده اند. دیگر اینکه تغییرات فرکانسی نسبت به فرکانس رزونانس سازه مورد بررسی قرار نگرفته و با توجه به اینکه بررسی دقیقی در خصوص اثر بخشی اعمال ارتعاش در حین جوشکاری روی خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیومی بخصوص آلیاژ AA ۵۰۸۳ انجام نشده، لذا در این پژوهش اثر اعمال ارتعاش با فرکانس محدوده رزونانس در حین جوشکاری GMAW روی خواص مکانیکی (استحکام کششی و سختی) آلیاژ AA5083-H321 و مقایسه آن با روش جوشکاری مرسوم GMAW مورد بررسی قرار گرفته است.

2- مواد و روش تحقیق

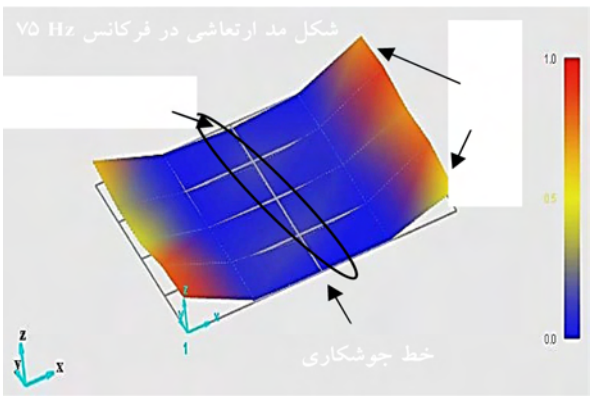
نمونه های مورد استفاده جهت انجام جوشکاری از آلیاژ AA-5052-H32 با ابعاد ۵×۱۵۰×۴۰۰ میلی متر مکعب بوده و جنس الکترود مصرفی AWS D5.10 Al 5183 [۲۴] است. برای بستن نمونه ها جهت دستیابی به سازه ارتعاشی یکپارچه، از سه ورق فولادی St۳۷ ، به این ترتیب که یک ورق به ابعاد ۳×۵۰۰×۵۰۰ میلی متر مکعب به عنوان تکیه گاه پایین و دو قطعه ورق به ابعاد ابعاد ۵×۱۰۰×۵۰۰ میلی متر مکعب به عنوان تکیه گاه بالایی نمونه های مورد جوشکاری، استفاده شد (شکل۱).

ترکیب شیمیایی نمونه ها بررسی به روش طیف سنجی نشری معروف به کوانتومتری انجام شده توسط دستگاه (PMI) و الکترود جوشکاری مورد استفاده مطابق با جدول(۱) است. پارامترهای جوشکاری ثابت نگه داشته شده و در جدول(۲) نشان داده شده است.



شکل۱- وضعیت قرارگیری نمونه ها و موتور ارتعاشی جهت جوشکاری GMAW آلیاژ AA5083-H321

جهت بررسی اثر ارتعاش روی خواص مکانیکی نمونه ها، سه سری نمونه با نیروهای ارتعاشی اعمالی ۸۵۰ نیوتون، ۱۶۵۰ نیوتون و ۲۲۰۰ نیوتون، و یک نمونه بدون اعمال ارتعاش به روش GMAW جوشکاری شدند. به منظور انجام جوشکاری در حین اعمال ارتعاش، از یک موتور ارتعاشی جریان متناوب و فرکانس تحریک ۷۵ هرتز استفاده شد. در ابتدا فرکانس های طبیعی این سازه اندازه گیری شدند. به این منظور از آزمایش ضربه چکش و دریافت پاسخ ارتعاشی استفاده شد. در شکل(۲) نحوه پاسخ سازه به ارتعاش تحت فرکانس ۷۵ هرتز نشان داده شده است. با توجه به شکل، تغییر مکان فیزیکی اجزاء سازه تحت تأثیر اعمال نیروی ارتعاش مشخص است.



شکل۲- پاسخ ارتعاشی سازه در فرکانس ۷۵ هرتز

شکل مد ارتعاشی سازه نشان دهنده پاسخ خمشی سازه در فرکانس ۷۵ هرتز است و این خمش در لبه ها بیشترین مقدار را داشته و در قسمت وسط سازه، کمترین مقدار را دارد (شکل۲). در این حالت با توجه به اینکه سازه از دو طرف

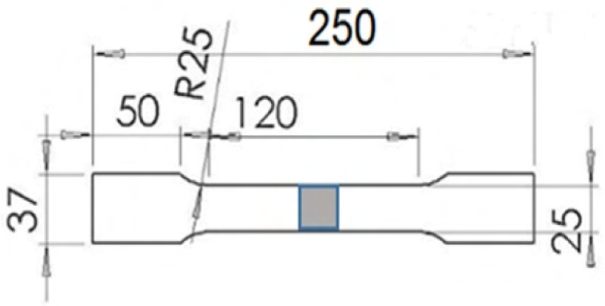
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

روی تکیه گاهی که از لحاظ ارتعاشی ایزوله است، قرار دارد، خمش ناحیه مرکزی آن که خط جوشکاری نمونه ها در آنجا قرار دارد، کنترل شده است. به نحوی که خیز ناحیه مرکزی شرایط را برای انجام جوشکاری مهیا کند. جنبش بیش از حد منطقه مربوط به خط جوش باعث تغییرات شدید در طول قوس شده و جوشکاری امکان پذیر نخواهد آمد.جهت بررسی تغییرات دامنه ارتعاش بر حسب زمان، در حین انجام جوشکاری، از پراب شتاب سنج CA-۱۱۸۱۴ (SINOCERA) YD- که روی سازه نصب می شود، استفاده شد. برای ثبت داده های مربوط به ارتعاش سازه در حین جوشکاری، پراب شتاب سنج به دیتالاگر novus متصل شد.

جدول۱- ترکیب شیمیایی نمونه و الکترود جوشکاری (درصد وزنی.٪)

عنصر	AA-۵۰۸۳	Al ۵۱۸۳
Si	۰/۳۲	۰/۴۱
Fe	۰/۲۹	۰/۳۸
Cu	۰/۴۴	۰/۱۱
Mn	۰/۸۸	۰/۷۵
Mg	۴/۷۳	۴/۷۸
Cr	۰/۰۹	۰/۱۱
Ti	۰/۰۲	۰/۱۵
Zn	۰/۲۲	۰/۲۵
Al	base	

ریزسختی سنجی، پس از برش مقاطع عرضی نمونه های جوشکاری شده با اعمال نیروی۵۰ گرم در فواصل ۵۰۰ میکرومتر از سمت فلز پایه به سمت مرکز خط جوش و در امتداد خط مرکزی نمونه ها، انجام شد. آزمایش کشش با دستگاه INSTRON ۸۵۰۳انجام شد.برای آماده‌سازی نمونه‌های کشش، مقطع عرضی نمونه های جوشکاری شده طبق نقشه شکل(۳) مطابق با استاندارد DIN-EN-۸۹۵ [۲۵] با وایرکات برش داده شدند. سپس گرده جوش نمونه ها با فرز باربرداری شدند. همچنین سطوح شکست نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی(LEO ۱۴۵۰ VP) مورد بررسی قرار گرفت.



شکل۳- نمونه کشش عرضی (ابعاد mm)

بررسی ریزساختار مقاطع عرضی نمونه ها پس از برش و آماده سازی با میکروسکوپ نوری ZIESS (Axioplan ۲) انجام شد. به منظور آماده سازی نمونه ها جهت انجام مطالعات میکروسکوپی، در ابتدا مقطع عرضی از نمونه های جوشکاری پس از برشکاری و انجام مانت گرم، سنباده زنی شدند. در مرحله سنباده زنی، به ترتیب از سنباده های با شماره ۴۰۰، ۸۰۰، ۱۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ و در مرحله پولیش کاری از پارچه ماهوت و محلول پودر آلومینا با ابعاد ۰/۲۵ میکرومتر استفاده شد.همچنین جهت بررسی دقیق مرزمناطق‌مختلف ریزساختاری از محلول تازه اچ با ترکیب 50ml (1 ml H_2O + 6 ml HNO_3 + 1ml HF +12 ml HCl) + 25mlH_2O +40 ml HNO_3 +12 gCrO_3 و به مدت ۱۰ ثانیه استفاده شد. اندازه گیری اندازه متوسط دانه‌ها به روش مقایسه ای انجام شد.

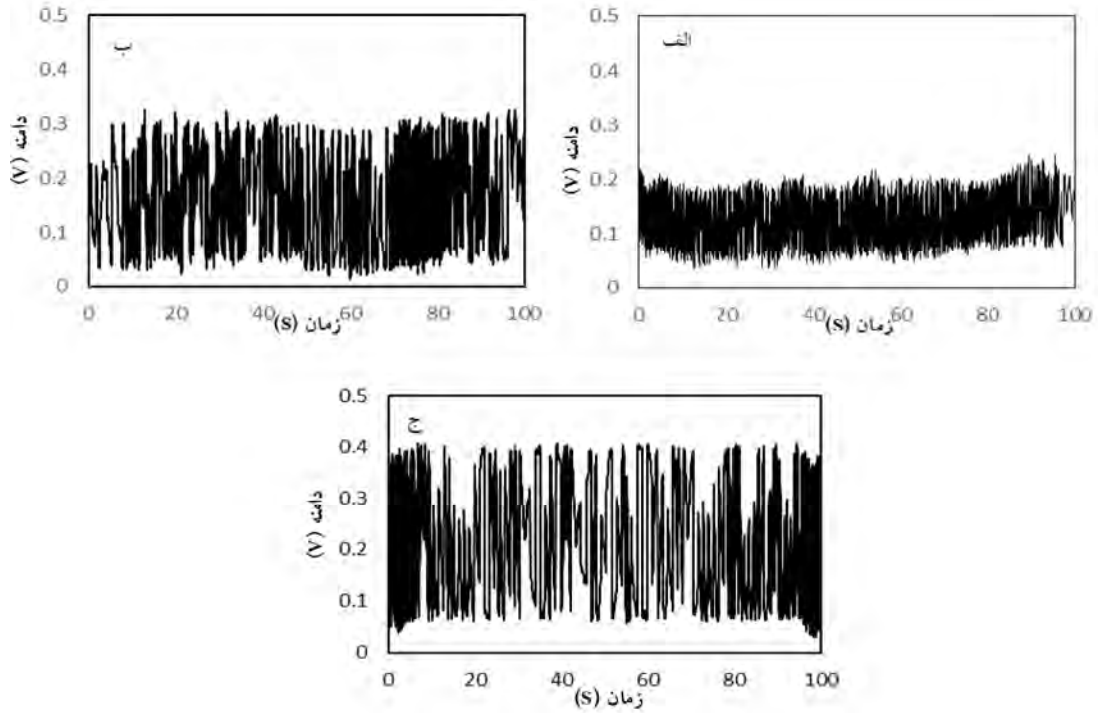
3- نتایج و بحث

تغییرات دامنه حاصل شده با توجه به تغییر نیروی ارتعاش اعمال شده در فرکانس ۷۵ هرتز در شکل(۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل که تغییرات دامنه ارتعاش (V) برحسب زمان اعمال ارتعاش (s) را نشان می‌دهد، افزایش نیروی ارتعاشی، سبب افزایش دامنه از حدود ۰/۰۵ V الی۰/۰۴ V می‌شود. در شکل(۴) ماهیت موجی شکل تغییرات دامنه بر حسب زمان مشخص است. آنچه که توسط دیتالاگر ثبت می‌شود روند تغییرات ولتاژ بر حسب زمان است. با توجه به شکل تغییرات دامنه ولتاژ تحت تأثیر نیروی ارتعاش اعمالی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

جدول۲- پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش

روش	موقعیت جوشکاری	شدت جریان (A)	قطر الکترود (mm)	فاصله ریشه (mm)
GMAW	Flat	۱۶۶	۱/۲	۱/۲
		دبی گاز (L/min)	سرعت (cm/min)	ولتاژ (V)
		۱۴	۴۵	۲۲



شکل۴- تغییرات دامنه ارتعاش ایجاد شده در فرکانس ۷۵ هرتز تحت نیروی ارتعاش اعمالی
الف) ۸۵۰ نیوتون، ب) ۱۶۵۰ نیوتون و ج) ۲۲۰۰ نیوتون

است بطوریکه تغییرات ولتاژ در نیروی ۸۵۰ نیوتن برابر است با ۰/۲ V–۰/۰۵– در نیروی۱۶۵۰ نیوتون ۰/۳ V–۰/۰۵– و تحت نیروی۲۲۰۰ نیوتون برابر است با ۰/۴ V–۰/۰۵– داوسون و موفات [۲۶] گزارش کرده اند که فرکانس ارتعاش اعمال شده بر دامنه ارتعاش تأثیر مستقیم دارد و این تغییرات دامنه باعث تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی می شود. در اثر اعمال نیروی دوره ای F به سازه با توجه به جرم (m) آن طبق رابطه(۱) شتابی (a) به سازه وارد می شود که دارای رفتار دوره ای (هارمونیک) است. اگر رابطه تغییر مکان فیزیکی سازه (X) بر حسب زمان طبق رابطه(۲) نشان داده شود، شتاب سازه تحت اعمال نیروهای دوره ای طبق رابطه(۳) بیان می‌شود.

$$\sum F = ma \qquad (۱)$$

$$X = A\cos(w.t) \qquad (۲)$$

$$a = d^2X/dt^2 = -A\,w^2\cos(w.t) \qquad (۳)$$

در روابط ذکر شده، ΣF برآیند نیروهای وارد شده به سازه، A ضریب ثابت و ω فرکانس دورانی است که ارتباط آن با فرکانس (f) طبق رابطه ۴ بیان می شود.

$$w = 2pf \qquad (۴)$$

با توجه به روابط ذکر شده تغییرات ولتاژ ثبت شده توسط دیتالاگر به پارامتر شتاب قابل تبدیل است و همچنین شتاب با رابطه ۵ به تغییر مکان فیزیکی سازه تحت تأثیر ارتعاش در فرکانس معین f قابل تبدیل است [۲۷].

$$a = -w^2X \qquad (۵)$$

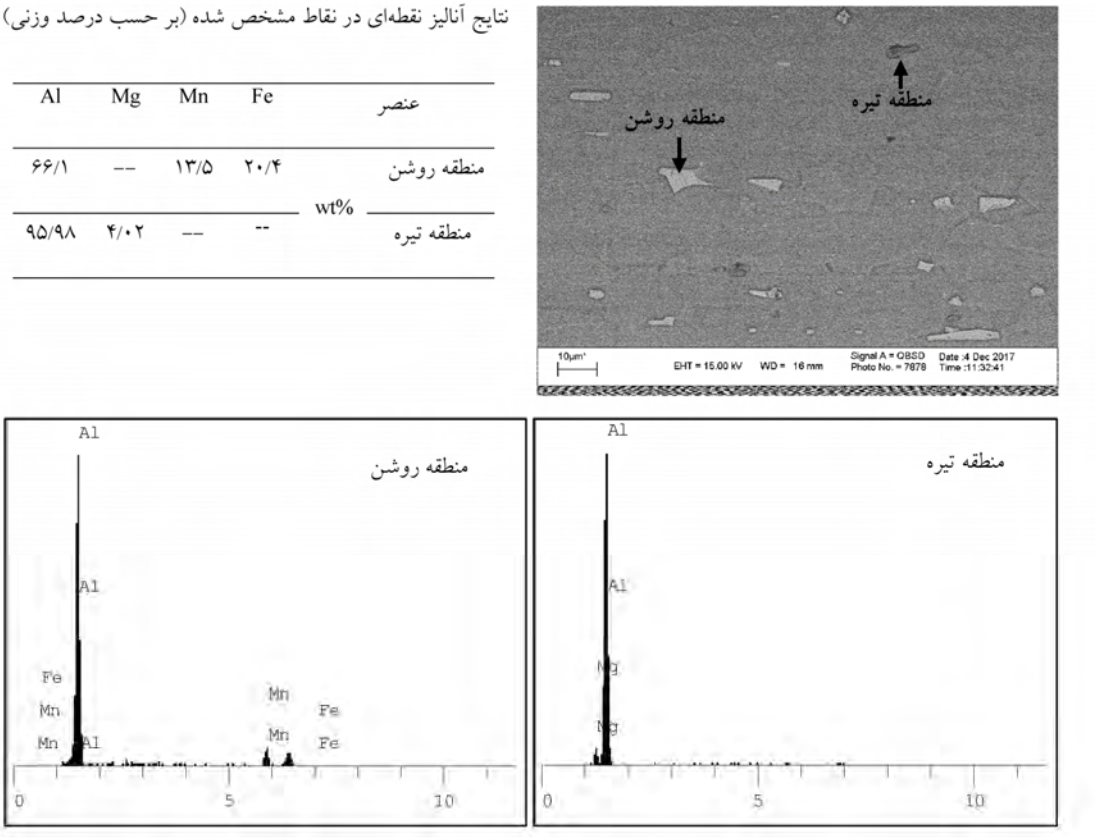
با توجه به روابط(۱ الی ۵)، تغییر مکان فیزیکی سازه تحت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

نتایج آنالیز نقطه‌ای در نقاط مشخص شده (بر حسب درصد وزنی)

عنصر	Fe	Mn	Mg	Al
منطقه روشن	۲۰/۴	۱۳/۵	--	۶۶/۱
منطقه تیره	--	--	۴/۰۲	۹۵/۹۸

wt%



شکل۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی فلز پایه و ترکیب شیمیایی مناطق تیره و روشن

تأثیر نیروی ارتعاش اعمالی در نیروی ۸۵۰ نیوتون برابـر است با ۲۵ تا ۹۰ میکرومتر، در نیروی ۲۲۰۰ نیوتون معادل ۱۵ تا ۱۳۰ میکرومتر و نیروی ۲۲۰۰ نیوتون برابر با ۲۵ تا ۱۸۰ میکرومتر است. بعبارت دیگر افزایش نیروی ارتعاشی باعث افزایش دامنه ارتعاشی سازه از ۶۵ به ۱۵۵ میکرومتر می‌شود .

در شکل(۵) ریز ساختار فلز پایه آلیاژ AA5083-H321 نشان داده شده است. با توجه به شکل زمینه حاوی مناطق تیره و روشن است. به منظور بررسی این مناطق با استفاده از میکروسکوپ الکترونیSEM ، آنالیز EDS انجام شد. با توجه به آنالیز EDS نواحی روشن حاوی ترکیبات بین فلزی Al_6 (Fe, Mn)، Al_6Mn و Al_6Fe و مناطق تیره شامل Al_3Mg_2 هستند [۲۸].

ریزساختار منطقه سطح گرده جوش نمونه های جوشکاری شده در شکل(۶) نشان داده شده اند. با توجه به شکل(۶) افزایش نیروی ارتعاش از ۸۵۰ نیوتون به ۱۶۵۰ نیوتون و۲۲۰۰ نیوتون باعث کاهش اندازه متوسط دانه نمـونه‌های جوشـکاری شده به ترتیب از حدود ۱۲۰ به ۹۰ میکرومتر و در نهایت به ۷۵ میکرومتر شده است.

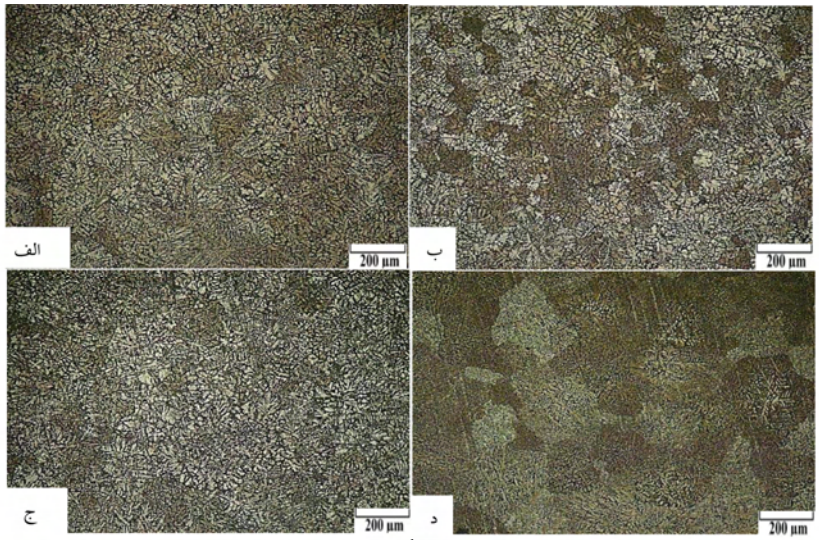
انجام ارتعاش در حین جوشکاری، در حوضچه مذاب منجر به تسریع انتقال گرما از اتم ها می شود و این سبب خوردشدن و جدایش بازوهای دندریتی شده و دانه های اولیه بیشتری تولید می شوند و در نتیجه ریزدانگی رخ می دهد. [۲ و ۸].

مکانیزم‌های جوانه زنی در اثر اعمال ارتعاش در حین جوشکاری به این صورت است که در اثر جریان همرفتی، نوک دندریت ها در منطقه خمیری در حال انجماد شکسته شده و با حرکت به سمت حوضچه جوش، نقش جوانه را ایفا می کند (شکسته شدن دندریت ها).

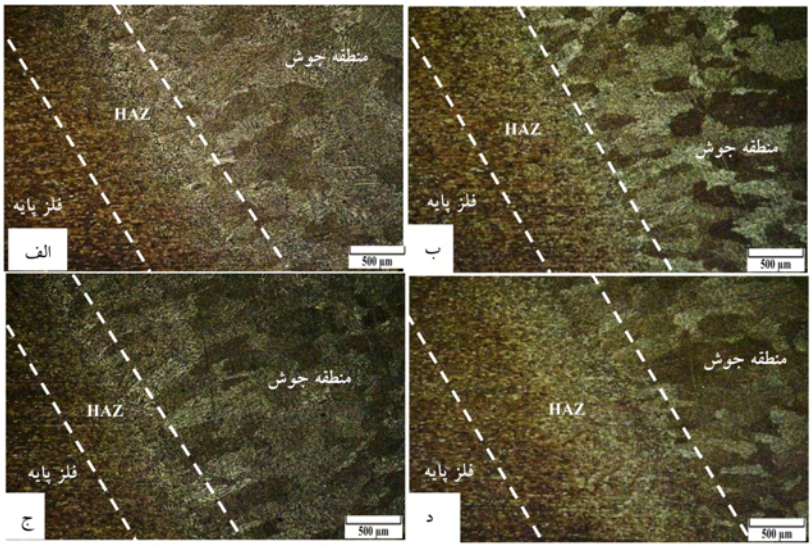
جریان همرفتی حوضچه جوش باعث جدا شدن دانه هایی که به طور جزئی ذوب شده اند، از منطقه مذاب- جامد شده و به عنوان جوانه برای دانه های جدید عمل می کنند (جدا شدن دانه ها) و به این ترتیب جوانه زنی افزایش می یابد که باعث افزایش تشکیل دانه های هم محور می شود [۲۹ و ۳۰].

با توجه به شکل(۶)، انـدازه متـوسط دانـه ها در نمـونه های

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]



شکل۶- ریزساختار سطح گرده نمونه ها پس از اچ،
الف، ب و ج) نیروی ارتعاشی ۸۵۰،۱۶۵۰ و۲۲۰۰ نیوتون و د) بدون ارتعاش



شکل۷-ریزساختار منطقه نزدیک به ریشه جوش نمونه ها پس از اچ،
الف، ب و ج) نیروی ارتعاشی ۸۵۰،۱۶۵۰ و ۲۲۰۰ نیوتون و د) بدون ارتعاش

جوشکاری شده تحت تأثیر ارتعاش در مقایسه با نمونه جوشکاری‌شده بدون اعمال ارتعاش کاهش یافته است.

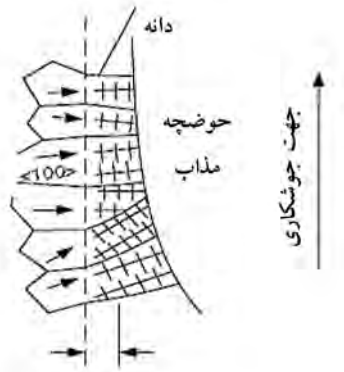
ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت نمونه ها در شکل(۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل، در نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش در این ناحیه کشیدگی دندریت ها و تشکیل دانه های ستونی در جهت انتقال حرارت کاملاً مشخص است .

در نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش عرض ناحیه متاثر از حرارت در حدود ۱۰±۱۸۰۰ میکرومتر است. درحالیکه با اعمال‌ارتعاش در حین جوشکاری و با افزایش نیروی ارتعاش از ۸۵۰ به ۲۲۰۰ نیوتون، وسعت این ناحیه از حدود ۱۰±۱۰۰۰ میکرومتر به ۱۰±۷۰۰ میکرومتر کاهش یافته است. بعبارت دیگر با افزایش نیرو از ۸۵۰ به ۱۶۵۰ نیوتون و در نهایت به ۲۲۰۰ نیوتون، وسعت ناحیه متاثر از حرارت بطور حدودی و به ترتیب برابر است با ۷۰۰،۹۰۰ و۱۰۰۰ میکرومتر در حالت جوشکاری نرمال، فلز مذاب با برخورد به دیواره حوضچه جوش منجمد می شود. حال آنکه در حالت ارتعاش، اختلاط و اغتشاش در فلز مذاب وجود دارد. ارتعاش فلز مذاب باعث حذف گرمای بیش از حد مذاب شده، بعلاوه شیب حرارتی از مرکز به سمت لبه حوضچه جوش کاهش می یابد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

بنابراین منجر به افزایش ریزدانگی و همچنین کاهش وسعت ناحیه متاثر از حرارت می شود.

در تئوری رشد رونشینی (شکل ۸) [۳۱]، در انجماد فصل مشترک مذاب–جامد، دانه های صفحات کریستالی جامد به عنوان پایه و مبدأ رشد دانه های منجمد شده بوده و تغییر جهات کریستالی رخ نمی دهد. این مسئله باعث تشکیل نواحی دندریتی ستونی درشت می شود .

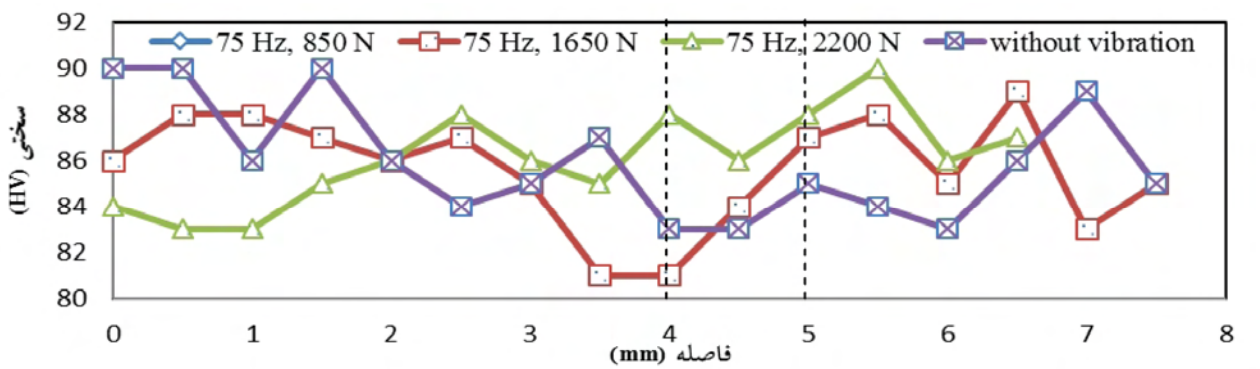


شکل۸- رشد رونشینی در ناحیه خط ذوب [۳۱]

در شکل(۷) که ناحیه متأثر از حرارت نمونه جوشکاری شده ارتعاشی را نشان می دهد، اعمال ارتعاش در حین جوشکاری باعث ایجاد اغتشاش در ناحیه مذاب شده و در جبهه انجماد شکست مکرر دندریت های تشکیل شده، رخ می دهد و مراکز جوانه زنی زیادی ایجاد و در نهایت منجر به تشکیل دانه‌های ریز هم محور می شود.

به عبارت دیگر با اعمال ارتعاش در حین جوشکاری وسعت ناحیه متاثر از حرارات کاهش یافته و منطقه جبهه انجماد همگن تر شده است و این مسئله برای آلیاژهای کار شده که در این ناحیه بشدت دچار افت استحکام می شوند مفید بوده و از افت استحکام آنها تا حدودی ممانعت بعمل می‌آید.بر اساس اصول انجماد فلمینگ [۸]، نرخ سرد شدن سریع تر، باعث کاهش مدت زمان مورد نیاز جهت درشت شدن جوانه ها در حین انجماد و در نتیجه ریزدانگی می‌شود. نتایج سختی سنجی نمونه ها در شکل(۹) نشان داده شده است. در این شکل نقطه مبدأ اندازه گیری سختی نمونه ها فلز پایه بوده و نقطه پایانی مرکز خط جوش است. با توجه به اینکه اعمال ارتعاش در حین جوشکاری باعث ریزدانگی می شود، تغییر محسوسی در نتایج سختی سنجی نمونه ها مشاهده نشد. استحکام آلیاژ AA5083-H321 در اثر اعمال کار مکانیکی سرد (نورد سرد و عملیات پایدارسازی حرارتی) و همچنین در اثر استحکام بخشی ناشی از محلول جامد (به علت درصد بالای عناصرMg و Mn) بدست می آید. اثرات حرارتی ناشی از جوشکاری تنها باعث کاهش اثرات ناشی از کار مکانیکی قبلی شده و لذا تغییرات عدد سختی از سمت فلز پایه به سمت مرکز جوش تغییرات چندانی از خود نشان نمی دهد. نتایج آزمایش کشش نمونه ها در شکل(۱۰) ارائه شده است .

با توجه به شکل(۱۰)، استحکام تسلیم و استحکام کششی نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش به ترتیب ۱۹۸ و ۲۸۷ مگاپاسکال است و با اعمال ارتعاش تغییرات استحکام تسلیم نمونه ها حدود ۱۹۷ تا ۱۹۹/۵ مگاپاسکال و استحکام کششی نمونه‌ها به ترتیب ۲۹۶/۵، ۲۹۱ و ۲۹۰ مگاپاسکال

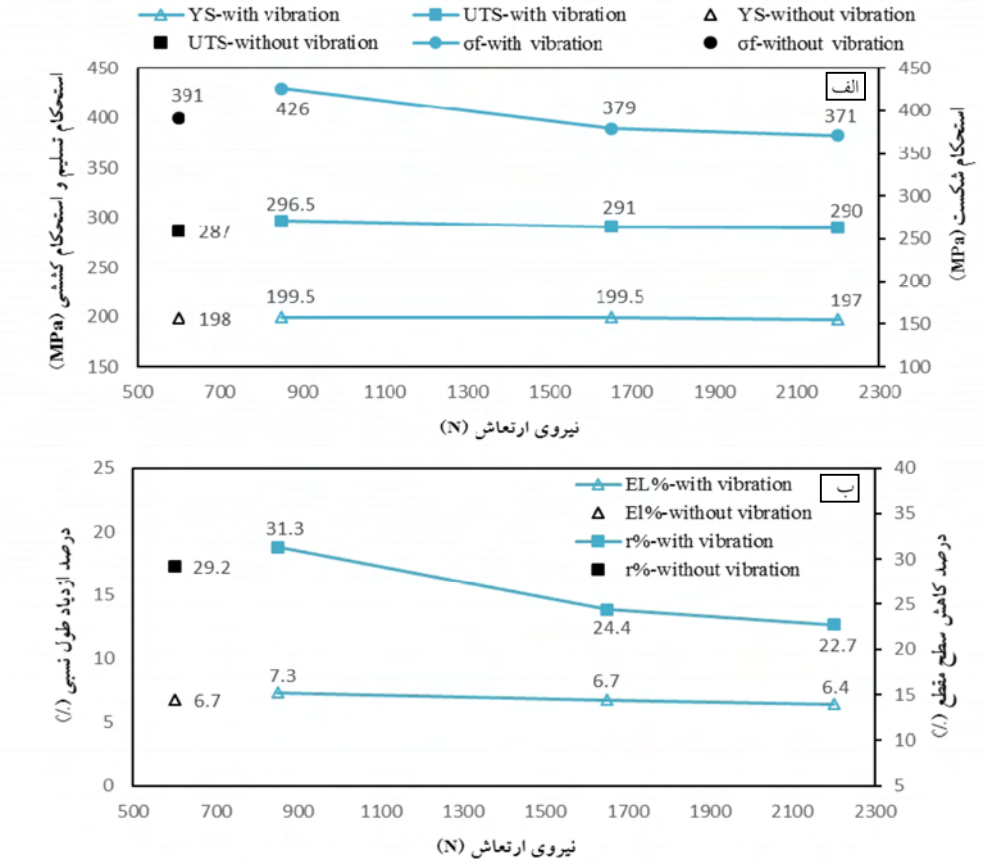


شکل۹- نتایج سختی سنجی نمونه های جوشکاری شده

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

جدول۳- خواص مکانیکی نمونه های جوشکاری شده

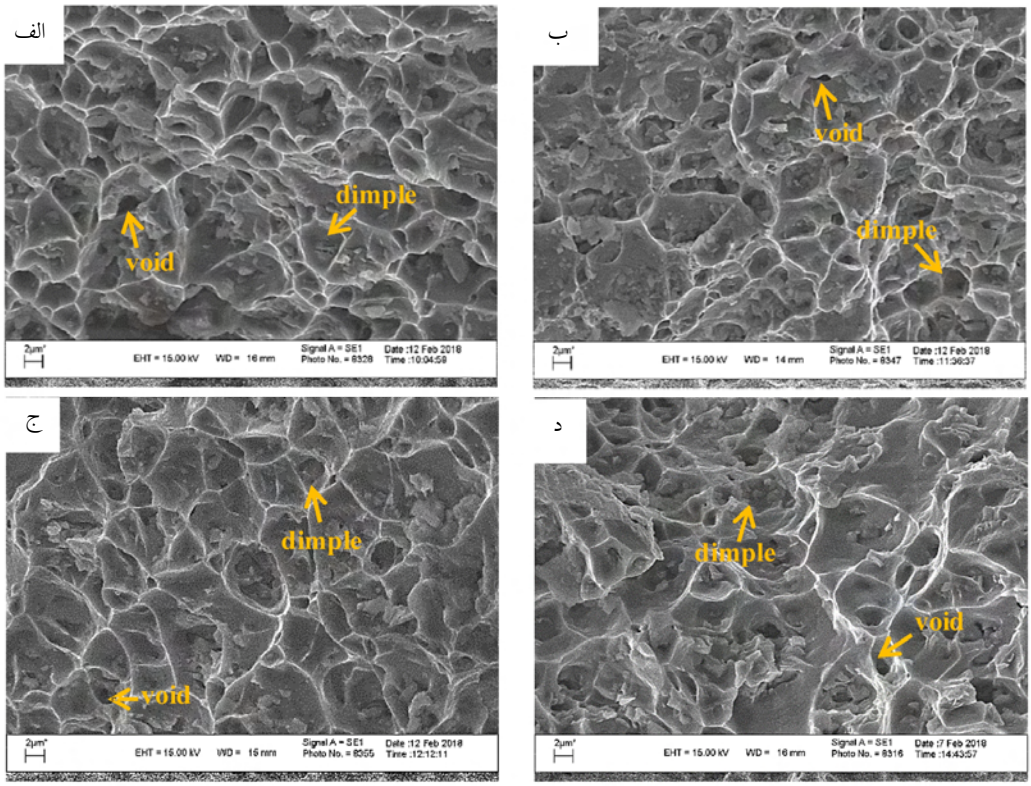
مشخصات نمونه‌ها	تحت ارتعاش			بدون ارتعاش
نیروی ارتعاش (N)	۸۵۰	۱۶۵۰	۲۲۰۰	—
استحکام تسلیم(Mpa)	۱۹۹/۵ ± ۲	۱۹۹/۵ ± ۲	۱۹۷ ± ۲	۱۹۸ ± ۲
استحکام کششی (MPa)	۲۹۶/۵ ± ۱/۵	۲۹۱ ± ۲	۲۹۰ ± ۲	۲۸۷ ± ۲
استحکام شکست (MPa)	۴۲۶ ± ۳	۳۷۹ ± ۲	۳۷۱ ± ۲	۳۹۱ ± ۳
کاهش سطح مقطع (٪)	۳۱/۳ ± ۰/۶	۲۴/۴ ± ۰/۶	۲۲/۷ ± ۰/۷	۲۹/۲ ± ۰/۶
ازدیاد طول نسبی (٪)	۷/۳ ± ۰/۲	۶/۷ ± ۰/۱۵	۶/۴ ± ۰/۲	۶/۷ ± ۰/۲
ضریب کارسختی (n)	۰/۱۵۱۷	۰/۱۵۴۲	۰/۱۶۵۸	۰/۱۵۴۰
ضریب استحکام (K;MPa)	۴۶۴	۴۶۱	۴۷۸	۴۷۲



شکل ۱۰- الف): استحکام کششی، استحکام تسلیم و استحکام شکست واقعی
ب): درصد ازدیاد طول نسبی و کاهش سطح مقطع نمونه ها

است. در واقع افزایش استحکام کششی نمونه های جوشکاری شده در حین اعمال ارتعاش در مقایسه با نمونه جوشکاری شده بدون ارتعاش در حدود ۳ درصد است. همچنین استحکام شکست واقعی نمونه های جوشکاری شده به ترتیب افزایش نیرو برابر است با۴۲۶،۳۷۹ و ۳۷۱مگاپاسکال درحالیکه استحکام شکست واقعی نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش برابر است با ۳۹۱ مگاپاسکال به عبارت دیگر اعمال ارتعاش در حین جوشکاری باعث افزایش استحکام شکست واقعی نمونه‌های جوشکاری شده تا حدود ۹ درصد شده است. درصد کـاهش سطح مقطع نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]



شکل۱۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح شکست نمونه ها
الف، ب و ج) ارتعاشی: نیرو۸۵۰، ۱۶۵۰ و ۲۲۰۰ نیوتون و د) بدون ارتعاش

۲۹/۲ درصد و با افزایش نیروی ارتعاش ۸۵۰ به ۱۶۵۰ نیوتون و ۲۲۰۰ نیوتون، برای نمونه های جوشکاری شده در حین اعمال ارتعاش به ترتیب دارای مقادیر ۳۱/۳ درصد، ۲۴/۴ درصد و ۲۲/۷ درصد است. تغییرات درصد ازدیاد طول نسبی برای نمونه های جوشکاری شده با افزایش نیروی ارتعاش از ۸۵۰ به ۱۶۵۰ نیوتون و ۲۲۰۰ نیوتون به ترتیب برابر است با ۷/۳ درصد، ۶/۷ درصد و ۶/۴ درصد، در صورتیکه درصد ازدیاد طول نسبی نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش ۶/۷ درصد است.

بنابراین ریزدانگی که توسط نیروی ارتعاش ایجاد شده است باعث افزایش چقرمگی نمونه های جوشکاری شده می شود..

با توجه به نتایج نیروی ارتعاش ۸۵۰ نیوتون، بیشترین تاثیر بر کاهش سطح مقطع و درصد ازدیاد طول نسبی داشته است. بطوریکه در مقایسه با نمونه جوشکاری GMAW معمولی، درصد کاهش سطح و ازدیاد طول نسبی حدود ۷ درصد و ۹ درصدافزایش‌یافته‌است. تغییرات‌خواص مکانیکی در نمونه‌های جوشکاری شده تحت ارتعاش در مقایسه با نمونه جوشکاری شده بدون ارتعاش در جدول(۳) آورده شده است .

بر طبق جدول(۳)، تغییرات قابل توجهی در ضریب کارسختی (n) و ضریب استحکام (K) نمونه ها مشاهده نشد. البته، مقادیر n و K برای مواد با ترکیب یکسان، ثابت هستند و با تغییر شرایط مواد (اعمال عملیات حرارتی یا کار مکانیکی) تغییر می‌کنند. تاکنون مطالعاتی در خصوص مقایسه خواص مکانیکی و ویژگی های ریزساختاری نمونه های جوشکاری شده تحت ارتعاش آلیاژهای آلومینیوم AA5083-H321گزارش نشده است. در برخی موارد گزارش شده است که در جوشکاری هیبریدی قوسی- لیزری آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، دانه‌های ستونی در مرز ذوب یافت می شود، در حالیکه دانه‌های هم محور در مرکز جوش دیده می شود [۳۲].

بنابر گزارش برخی از محققین [۳۳] اعمال ارتعاش بر نمونه‌های جوشکاری شده آلیاژ آلومینیومAA6261-T6، باعث افزایش عمر خستگی شده است. همچنین افزایش سختی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

نمونه های آلومینیومی از آلیاژ AA5052-H32 ، جوشکاری در حین اعمال ارتعاش با افزایش فرکانس گزارش شده است [۲۲]. در گزارش دیگری نیز [۲۳]، به بررسی اثر تغییر فرکانس ارتعاش اعمالی در حین جوشکاری آلیاژ آلومینیوم AA5052-H32 پرداخته شده و نتایج حاکی از این است که افزایش فرکانس ارتعاش و در نتیجه افزایش نیروی ارتعاشی در حین جوشکاری، باعث افزایش استحکام کششی نمونه ها شده است، بطوریکه استحکام کششی، حدود ۷/۴ الی ۱۴/۵ درصد افزایش یافت. همچنین گزارش شده است که ارتعاش اولتراسونیک در جوشکاری منجر به مزایایی مانند بهبود خواص مکانیکی و اختلاط بیشتر می شود [۳۴]. با توجه به رابطه هال – پچ انتظار می رود ریزدانگی، منجر به افزایش خواص مکانیکی شود. افزایش استحکام تسلیم در اثر ریزدانگی کاهش (d) طبق رابطه هال–پچ که با رابطه(۶) بیان می شود، مرتبط است.

$$s = s_0 + k \cdot d^{-0.5} \qquad (۶)$$

در این رابطه σ_0 و k جزء خصوصیات ذاتی ماده بوده و به ترکیب آلیاژ، شکل دانه ها و بافت کریستالوگرافی ماده بستگی دارند. در آلیاژهای آلومینیومی مقدار عددی ضریب k کوچک بوده و در حد $N/mm^{1.5}$ ۶-۲ است. حال آنکه مقدار آن برای فولادها در حدود حد $N/mm^{1.5}$ ۲۲ است. لذا وقوع ریزدانگی باعث افزایش استحکام بیشتری برای آلیاژ با ضریب k بیشتر می شود [۳۵]. بررسی تغییرات استحکام تسلیم نمونه های جوشکاری شده تحت تأثیر ارتعاش، با تغییر در اندازه دانه، خطی با شیب کم و حدود $N/mm^{1.5}$ ۲۲ است. نتایج حاصل از آزمایش کشش نمونه های جوشکاری شده و همچنین تغییرات مشاهده شده نشان می دهد که تغییرات در استحکام تسلیم نمونه ها با تغییر اندازه دانه ها در اثر نیروی ارتعاش اعمالی در طول فرآیند جوشکاری، قابل توجه نیست. تصاویر سطوح شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل(۱۱) نشان داده شده است. ضعیف ترین بخش اتصال در جوشکاری آلیاژ آلومینیوم AA–۵۰۸۳ فلز جوش است که شکست از آن رخ می دهد. وقتی که آلیاژ AA-۵۰۸۳ جوشکاری می‌شود، تغییرات ریزساختاری در ناحیه متأثر از حرارت شامل بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه می شوند، لذا افت استحکام ایجاد شده در ناحیه متأثر از حرارت این آلیاژ به شدت آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر نیست. حال آنکه در آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر احتمال انحلال و یا درشت شدن رسوبات در حین جوشکاری وجود دارد. همچنین محل وقوع شکست نمونه‌های جوشکاری شده آلیاژ ۵۰۸۳ -AA در منطقه جوش است اما در آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر ضعیف ترین منطقه آنها در برابر وقوع شکست، منطقه متأثر از حرارت است [۳۶]. با توجه به تصاویر ریز ساختار نشان داده شده در شکل(۱۲)، سطوح شکست نمونه‌ها دارای حفرات بسیاری است که بیانگر مکانیزم شکست نرم نمونه هاست. همچنین در نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش حضور ترکیبات بین فلزی در مقطع شکست کم است ولی با افزایش نیروی ارتعاشی از ۸۵۰ به ۱۶۵۰ و ۲۲۰۰ نیوتون، مقدار ترکیبات بین‌فلزی مشاهده شده در مقطع شکست نمونه های جوشکاری شده افزایش یافته است .

4- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر اعمال ارتعاش در حین جوشکاریGMAW، تحت نیروی ۸۵۰ نیوتون تا ۱۶۵۰ نیوتون و ۲۲۰۰ نیوتون در فرکانس ثابت ۷۵ هرتز، روی خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم- منیزیم AA5083-H321 مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج به‌دست آمده‌از بررسی‌های ریزساختاری و آزمایشات خواص مکانیکی در زیر خلاصه شده است:

–شکسته شدن بازوهای دندریتی در اثر اعمال ارتعاش و توزیع آنها در حوضچه انجماد، باعث تسریع جوانه زنی و تشکیل دانه های هم محور شده، اندازه متوسط دانه ها در نمونه های جوشکاری شده تحت تأثیر ارتعاش به ۷۵ میکرومتر رسیده است که در مقایسه با نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش(۲۰۰ میکرومتر) کاهش یافته است.

–در نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش عرض ناحیه متاثر از حرارت در حدود ۱۸۰۰ میکرومتر است. درصورتیکه با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

افزایش نیروی ارتعاش از ۸۵۰ به ۲۲۰۰ نیوتون، وسعت این ناحیه از حدود ۱۰۰۰ به ۷۰۰ میکرومتر، یعنی در حدود ۴۴ الی ۶۱ درصد کاهش یافت .

-مقایسه نتایج استحکام کششی نمونه های جوشکاری شده نشان دهنده افزایش استحکام کششی و استحکام شکست نمونه های جوشکاری شده در حین اعمال ارتعاش در مقایسه با نمونه جوشکاری شده بدون ارتعاش به ترتیب در حدود ۳ الی ۹ درصد است .

-نیروی ارتعاش ۸۵۰ نیوتون بیشترین اثر را روی کاهش سطح مقطع و ازدیاد طول نسبی نمونه های جوشکاری شده در حین اعمال ارتعاش در مقایسه با نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش داشته که به ترتیب در حدود ۷ و ۹ درصد افزایش را نشان می دهد.

-نتایج سختی سنجی نمونه جوشکاری شده بدون اعمال ارتعاش و نمونه های جوشکاری شده در حین اعمال ارتعاش نشان داد اعمال ارتعاش باعث تغییرات محسوسی در سختی نمونه ها نشده است .

-بررسی تصاویر سطوح شکست نمونه های جوشکاری شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده وقوع شکست نرم در منطقه جوش تمامی نمونه های جوشکاری شده است.

منابع

1- Xu, J., Chen, L., and Ni, C., "Effect of Vibratory Weld Conditioning on the Residual Stresses and Distortion in Multipass Girth-Butt Welded Pipes", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 84, pp. 298-303, 2007.

2- Qinghua, L., Ligong, C., and Chunzhen, N., "Improving Welded Valve Quality by Vibratory Weld Conditioning", Material Science and Engineering: A, Vol. 457, pp. 246-253, 2007.

3-Wu, W., Lin, D.Y., and Chen, SH., "Mechanical Properties of Weldment Affected by Various Vibration Frequencies", Journal of Material Science Letters, Vol. 18, pp. 1829-1831, 1999.

4- Jiang, W., Zhang, Y., and Woo, W., "Using Heat Sink Technology to Decrease Residual Stress in 316L Stainless Steel Welding Joint: Finite Element Simulation", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 92, pp. 56-62, 2012.

5- James, M., Hughes, D., Chen, Z., Lombard, H., Hattingh, D., Asquith D., and et al. "Residual Stresses and Fatigue Performance", Engineering Failure Analysis, Vol. 14, pp. 384-395, 2007.

6- Blashchuk, V., Lavrovskaya, I., Onoprienko, L., Shelenkov, G., and Troyanovskii, V., "Reduction of Residual Stresses in Welded Joints in Titanium Alloys", Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 27, pp. 715-719, 1991.

7- Sun, T., Wang, Z., Li, J., and Zhang, T., "Effect of Ultrasonic Vibration Solidification Treatment on the Corrosion Behavior of AZ80 Magnesium Alloy", International Journal of Electrochemical Science, Vol. 8, pp. 7298-7319, 2013.

8- Qinghua, L., Ligong, C., and Chunzhen, N., "Effect of Vibratory Weld Conditioning on Welded Valve Properties", Mechanics of Materials, Vol. 40, pp. 545-574, 2008.

9- Kim, B., Son, Y., Yun, J., and Lee, J.S., "Residual Stress Relief and Redistribution of Welded Metals by Vibratory Stress Relaxation", Materials Science Forum, Vol. 580-582, pp. 419-423, 2008.

10- Kuo, C.W., Lin, C.M., Lai, G.H., Chen, Y.C., Chang, Y.T., and Wu, W., "Characterization and Mechanism of 304 Stainless Steel Vibration Welding", Materials Transactions, Vol. 48, pp. 2319-2323, 2007.

11- Hsieh, C.C., Lai, C.H., and Wu, W., "Effect of Vibration on Microstructures and Mechanical Properties of 304 Stainless Steel GTA Welds", Metals and Materials International, Vol. 19, pp. 835-844, 2013.

12- Tewari, S., and Shanker. A., "Microstructural Changes Associated with Vibratory Prepared Weldments", Journal of Materials Science Letters, Vol.12, pp. 1335-1336, 1993.

[13-Tewari, S., and Shanker, A., "Effects of Longitudinal Vibration on Hardness of the Weldments", Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 33, pp. 1265-1269, 1993.

14- Kainth, M., Gupta, D., and Sharma, V.K., "Experimental Investigation of the Effect of Vibration on Mechanical Properties of AISI 1018 Mild/Low Carbon Steel Welded Joint Using SMAW", International Journal of Mechanical Engineering, Vol. 2, pp. 1-7, 2015.

15- Kalpana, J., Rao, P.S., Rao, P.G., "Effect of Frequency on Impact Strength of Dissimilar Weldments Produced with Vibration", International Journal of Chemical Science, Vol. 14, pp. 1797-1804, 2016.

16-Kalpana, J., Rao, P.S., and Rao, P.G., "Influence of Amplitude on the Tensile Strength of Welded Joints Fabricated Under Vibratory Weld Conditioning", Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, Vol. 39, pp. 757-762, 2016.

17-Suresh, B.V., Rao, P.G., Musalaiah, G., and Rao P.S., "Influence of Vibratory Weld Conditioning on Hardness of Lap Welded Joints", International Journal of Mechanical Engineering and Technology, Vol. 8, pp. 169-177, 2017.

18-Singh, P., Patel. D., and Prasad, S.B., "Investigation on the Effect of Vibrations on Cooling Behavior and

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

28-Hakem, M., Lebaili, S., Miroud, J., Bentaleb, A., and Toukali, S., "Welding and Characterization of 5083 Aluminum Alloy", Proceedings of the 21st International Conference on Metallurgy and Materials, 2012.
29-Prakash, J., Tewari, S.P., and Srivastava, B.K., "Nucleation, Graingrowth, Solidification and Residual Stress Relaxation Under Stationary and Vibratory Welding Condition- A Review", International Journal of Engineering Science, Vol. 1, pp. 1-17, 2010.
30-Wu, W., "Influence of Vibration Frequency on Solidification of Weldments", Scripta Materialia, Vol.42, pp. 661-665, 2000.
31-Kou, S., Welding Metallurgy, 2nd ed., Canada.: A John Wiley and Sons, INC., Publication.
32-Huang, L., Wu, D., Hua, X., Liu, S., Jiang, Z., Li, F., Wang, H, and Shi, S., "Effect of the Welding Direction on the Microstructural Characterization in Fiber Laser-GMAW Hybrid Welding of 5083 Aluminum Alloy", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 31, pp. 31: 514–522, 2018.
33-James, M., Paterson, A., and Sutcliffe, N., "Constant and Variable Amplitude Loading of 6261 Aluminium Alloy I-Beams With Welded Cover Plates-Influence of Weld Quality and Stress Relief", International Journal of Fatigue, Vol. 19, pp. 125-133, 1997.
34-Kumar. S., Wu, C.S., Padhy, G.K., and Ding, W., "Application of Ultrasonic Vibrations in Welding and Metal Processing: A Status Review", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 26, pp. 26: 295–322, 2017.
35-Schempp, P., Cross, C.E., Pittner, A., and Rethmeier, M., "Influence of Grain Size on Mechanical Properties of Aluminium GTA Weld Metal", Weld World, Vol. 57, pp. 293-304, 2013.
36-Cross, C.E., and Kohn, M.L., ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering, USA: ASM Int;2000.
Mechanical Properties of SMAW Butt Welded Joints", Mechanical Engineering, Vol. 79, pp. 137-146, 2017.
19-Singh, P.K., Patel, D., and Prasad, S.B., "Development of Vibratory Welding Technique and Tensile Properties Investigation of Shielded Metal Arc Welded Joints", Indian Journal of Science and Technology, Vol. 9, pp. 1-6, 2016.
20- Luh, G.C., and Hwang, R. "Evaluating the Effectiveness of Vibratory Stress Relief by a Modified Hole-Drilling Method", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 14, pp. 815-823, 1998.
21- Balasubramanian, K., Kesavan, D., and Balusamy, V., "Studies on the Effect of Vibration on Hot Cracking and Grain Size in AA 7075 Aluminum Alloy Welding", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 3, pp. 681-686, 2011.
22- Rao, M.V., Rao, P.S., and Babu, B.S., "Investigate the Influence of Mechanical Vibrations on the Hardness of Al5052 Weldments", Indian Journal of Science and Technology, Vol. 9, pp.1-4, 2016.
23- Rao, M.V., Rao, P.S., and Babu, B.S., "Effect of Vibratory Tungsten Inert Gas Welding on Tensile Strength of Aluminum 5052-H32 Alloy Weldments", Materials Focus, Vol. 6, pp. 325-330, 2017.
24-ANSI/AWS A5.10, "Specification for Bare Aluminum and Aluminum Alloy Welding Electrodes and Rods", 1992.
25- B. STANDARD, BS EN 895, "Destructive Tests on Welds in Metallic Materials - Transverse Tensile Test", ed, 1995.
26-Dawson, R., and Moffat, D., "Vibratory Stress Relief: a Fundamental Study of Its Effectiveness", Journal of Engineering Materials and Technology", Vol. 102, pp 169-176, 1980.
27-Roy R. Craig, Andrew J. Kurdila., Fundamentals of Structural Dynamics, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2006.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]