E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 7, Number 2, 2022



Effect of tool position on microstructural and mechanical properties of friction stir butt welded joint of AA2024–AA7075 dissimilar alloys

H. Soleimani[1], K. Amini[2]*, F. Gharavi[3]

1- Department of Mechanical Engineering, Khomeini-shar Branch, Islamic Azad University,Isfahan, Iran
2- Centre for Advanced Engineering Research, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran
3- Department of Materials Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

Received 5 September 2021 ; Accepted 17 November 2021

Abstract

In this research, butt joining of Al2024 and Al7075 plates were performed by Friction Stir Welding (FSW) and the effect of tool position on microstructural and mechanical properties in about 1 mm from center line of joint towards the advancing side (AS) and the retreating side (RS) was investigated at three positions of +1, 0, -1 mm. In this regard, the plates of Al2024 and Al7075 were selected as the AS and the RS, respectively. In this joining method, transvers speed of 200 mm/min and tool rotation speed of 600 rpm were chosen. Macro- and Micro- structures of various welding areas and fractography of samples were evaluated by optical and scanning electron microscopies. In addition, mechanical properties were investigated using micro-hardness and tension tests. From the obtained macro-structures, it was observed that in all three joints, the surface of weld was without any defects (i.e., porosity, lack of penetration…). With varying tool offset position, welding micro-structure morphology was changed from homogeneous mode to layer or onion ring- shaped mode. Moreover, with varying tool position into the AS-side, tensile strength increased about 17.5% as opposed to the zero-tool position, but there was a decreasing about in tensile strength with changing tool position towards the RS-side as compared with the zero-tool position. Value of micro-hardness was approximately similar in all welded samples, but the highest value of hardness was observed at the weld zone (WZ). Thus, the obtained results showed that with varying tool position into the AS-side, mechanical properties were improved as opposed to the zero-tool position and tool position towards the RS-side.

Keywords: Friction Stir Welding, Tool offset, Dissimilar joint, Mechanical properties, Micro-structure.

Corresponding Author: k.amini@iaumajlesi.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال هفتم، شماره2، پاییز و زمستان 1400



اثر موقعیت ابزار بر خواص ساختاری و مکانیکی اتصال لب‌به‌لب آلیاژهای غیرهمجنس آلومینیوم 2024 به 7075 جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی

حسین سلیمانی[1]، کامران امینی[2*]، فرهاد غروی[3]

1- کارشناس ارشد، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

2- دانشیار، مرکز تحقیقاتی مهندسی پیشرفته، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، مجلسی، اصفهان، ایران

3- استادیار، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، کرمان، ایران

دریافت مقاله: 1400/06/14؛ پذیرش مقاله: 1400/08/26

چکیده

در این پژوهش، اتصال لب به لب ورق آلیاژهای آلومینیوم 2024 و 7075 توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی FSW انجام شد و اثر موقعیت ابزار به اندازه 1میلی‌متر از خط مرکزی اتصال به سمت پیشرونده (AS) و پسرونده (RS) در سه حالت (1+،0،1-) میلی‌متر بر خواص ساختاری و مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، آلیاژهای آلومینیوم 2024 و 7075 به ترتیب به عنوان پیشرونده و پسرونده انتخاب شدند. در این روش اتصال، سرعت پیشروی 200 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش ابزار 600 دور بر دقیقه انتخاب شد. بعد از انجام جوشکاری، ماکرو ساختار و ریزساختار مناطق مختلف جوش و سطوح شکست نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. همچنین جهت ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون‌های ریزسختی (ویکرز) و کشش استفاده شد. از ماکرو ساختار حاصله مشاهده شد که در هر سه حالت اتصال FSW سطح جوش عاری از عیب یا هرگونه نقص دیگر (عدم نفوذ، تخلخل و غیره) است. با تغییر موقعیت ابزار، مورفولوژی ریزساختار جوش از حالت همگن به حالت حلقه پیازی تغییر کرد. همچنین با تغییر موقعیت ابزار به سمت AS استحکام کششی به مقدار 17/5 درصد افزایش یافت ولی با تغییر موقعیت ابزار به سمت RS استحکام کششی به مقدار 13/3 درصد کاهش نشان داد. میزان سختی در تمامی نمونه‌ها تقریبا یکسان بود ولی در ناحیه جوش بیشترین میزان سختی مشاهده شد. بنابراین نتایج کسب شده نشان داد که با تغییر موقعیت ابزار به سمت AS خواص مکانیکی نسبت به حالت بدون موقعیت و موقعیت به سمت RS بهبود یافت.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، موقعیت ابزار، اتصال غیرهمجنس، خواص مکانیکی، ریزساختار.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: k.amini@iaumajlesi.ac.ir

1- مقدمه

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از فرایندهای اتصال حالت مکانیکی است که در سال 1991میلادی توسط انستیتو جوشکاری TWI در کشور انگلستان ابداع شده است [1-3]. این روش به عنوان مهمترین پیشرفت در اتصال فلزات در دهه اخیر مطرح بوده و با جابه‌جایی پیچیده و تغییر شکل پلاستیک همراه است [4]. پارامترهای مختلفی جهت کنترل فرایند FSW وجود دارد که بر ریز ساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوش تاثیرگذار است. از جمله این پارامترها می‌توان به طراحی و زاویه ابزار با سطح قطعه، نحوه مهار قطعه و نیروهای مهارکننده،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]

سرعت پیشروی و چرخشی ابزار، موقعیت ابزار، فشار اعمالی به قطعه کار، ابزار پین اشاره کرد که بر الگوی سیلان ماده و توزیع دما مؤثر هستند [5-7]. میزان اختلاط مواد و همچنین توزیع ریزساختار تاثیر بسزایی بر رفتار مکانیکی نهایی اتصال دارد. مهمترین عامل در اختلاط مواد تشکیل ناحیه حلقه‌ای شکل (حلقه پیازی) است که توسط محققان مورد بررسی قرار گرفت [8].

حرکت ابزار در فصل مشترک دو قطعه باعث تغییر در اختلاط مقادیر دو فلز در ناحیه جوشکاری می‌شود و این امر یکی از دلایل اصلی تغییر در خواص مکانیکی و ریزساختار اتصالات می‌گردد [9]. لذا با در نظر گرفتن انحراف ابزار نسبت به مسیر اصلی برش می‌توان نسبت اختلاط دو فلز یا آلیاژ مورد نظر را در اختلاط ناحیه جوش تغییر داد که منجر به تغییر در استحکام مکانیکی وریزساختار اتصال می‌گردد.

کاوالیر و همکارانش [10] به بررسی ریزساختار اتصال آلیاژهای 2024 و 7075 پرداختند و مشاهده کردند که با افزایش حرارت ورودی، ناحیه حلقه پیازی شکل متشکل از آلیاژهای 2024 و 7075 تشکیل می‌شود و با کاهش حرارت ورودی این آلیاژها در ناحیه اغتشاش یافته به صورت مجزا تشکیل می‌شوند. امروزه کاربرد اجتناب ناپذیر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به دلیل ملاحظات اقتصادی، دستیابی به خواص مکانیکی مناسب‌تر، سرعت بالای جوشکاری و کیفیت بهتر جوش نسبت به فرایندهای ذوبی گسترش یافته است. در این راستا تحقیقات متعددی روی پارامترهای موثر از جمله موقعیت ابزار پین و تاثیر آن روی خواص فیزیکی صورت گرفته است [11و12]. یان و همکارانش [13] به بررسی اثر موقعیت‌های جانبی مختلفی روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیوم 2A14-T6 پرداختند و گزارش دادند که درجه نفوذ برای جوشکاری در شرایط متفاوت ابزار جوشکاری در سمت پسرونده (RS) و پیشرونده (AS) متفاوت است و کیفیت اتصال نسبت به شرایط موقعیت ASحساس‌تر است. همچنین نشان دادند که موقعیت ابزار باعث کاهش فشار در ریشه اتصال می‌شود که منجر به ایجادعیوب‌جوش می‌شود. کار و همکارانش [14] به بررسی‌اثرموقعیت ابزار بررفتار مکانیکی و ریزساختاری اتصال غیرهمجنس آلومینیوم خالص تجاری(Al) به تیتانیم خالص تجاری (Ti) به روش FSW پرداختند. نتایج نشان داد که موقعیت‌های زیاد موجب اختلاط ناقص و در نتیجه تشکیل عیوب جوشکاری در ریشه جوش می‌شود. شاه و همکارانش [15] با بررسی تاثیر جابجایی ابزار جوشکاری FSW روی رفتار مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم AA6061 پرداختند. آن‌ها دریافتند که موقعیت ابزار به اندازه 0/2 میلی‌متر جریان مواد را در ناحیه WZ افزایش و ناحیه نرم این منطقه را توسعه می‌دهد اما هیچ تاثیری بر خواص مکانیکی آلیاژ AA6061 ندارد.

با توجه با مطالب گفته شده، پارامترهای فرایند اتصال FSW تأثیر قابل توجهی روی خواص نهایی اتصالات غیرهمجنس دارند. بنابراین، بررسی اثر پارامترهای تغییر موقعیت ابزار و پیداکردن شرایط بهینه برای بهبود اتصال، برای پژوهشگران دانشگاهی و صنعتی بسیار جالب است. از سوی دیگر، تحقیقی در مورد اتصال غیرهمجنس اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم 2024 و 7075 در متون علمی داخلی مشاهده نشده است. به همین دلیل در این پژوهش به بررسی اثر پارامتر موقعیت ابزار به سمت AS و RS بر ریزساختار و رفتار مکانیکی اتصال غیرهمجنس اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم 2024 و 7075 پرداخته شد.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش آلیاژهای آلومینیوم Al2024-O و Al7075-H با ترکیبات شیمیایی ارایه شده در جدول (1) مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز شیمیایی نمونه‌ها با استفاده از آزمون آنالیز EDAX انجام شد.

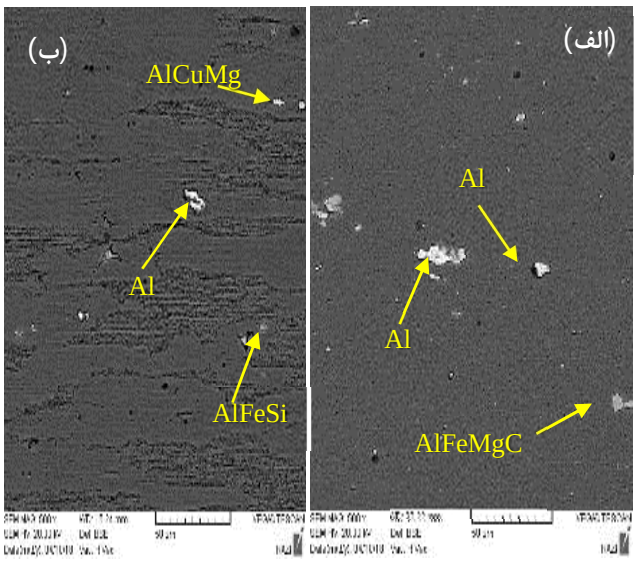
جدول1- ترکیب شیمیایی فلزات پایه استفاده شده (برحسب درصد وزنی).

	Al	Si	Mg	Zn	Cu	Fe	Mn	Ti
2024	پایه	۰/۵	۱/۸	۰/۲۵	۹/۴	۰/۵	۰/۱۵	۰/۹
7075	پایه	۰/۴	۲/۹	۶/۱	۲	۰/۵	۰/۲	۰/۳

شکل (1-الف) دانه‌های تبلور مجدد یافته و کشیده ناشی از فرایند نورد شامل رسوباتی با ترکیبات فلزی از جمله

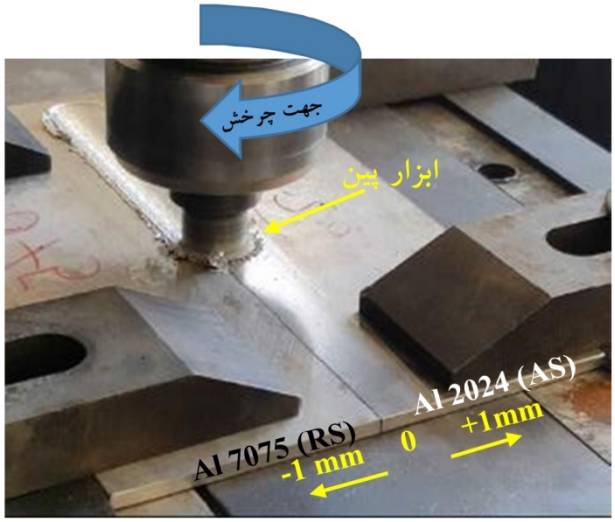
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]

AlCuMg، AlCu و AlFeSi در آلیاژ Al7075 را نشان می‌دهد و شکل (1-ب) ریزساختار آنیل شده و همگن با توزیع یکنواخت رسوبات شامل AlCuMg، AlCu و AlFeSi (ذرات کوچک سیاه و سفید) در آلیاژ آلومینیوم AA 2024 را نشان می‌دهد. آلیاژهای آلومینیوم Al2024 و Al7075 با ابعاد مشخص 5×100 ×300 میلی‌متر مکعب توسط وایرکات برش داده شد. نمونه‌ها با استفاده از فرایند جوشکاری FSW توسط دستگاه فرز ساخت کشور آلمان مدل HECKRET 315 جوشکاری شدند. تصویر نحوه قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه و فرایند جوشکاری در شکل(2) آورده شده است. در این پژوهش پین مورد استفاده به صورت استوانه‌ای رزوه دار طراحی شد و شکل پین طراحی شده در شکل(3) آورده شده است. پین مورد استفاده تحت عملیات‌های سخت‌کاری و نیتراسیون قرار گرفته و سختی آن حدودا برابر 670 ویکرز است.

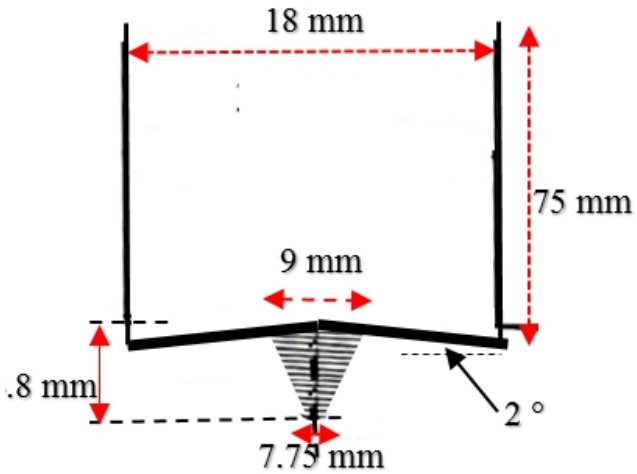


شکل1- تصاویر SEM ریزساختار فلز پایه:
الف - Al2024، ب - Al7075.

اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم 2024 و 7075 با استفاده از فرایند FSW در سه حالت مختلف موقعیت ابزار، یکبار به اندازه 1 میلی‌متر به سمت پیشرونده (Al2024) و یکبار به اندازه 1 میلی‌متر به سمت پسرونده (Al7075) و یکبار هم بدون موقعیت انجام شد. موقعیت ابزار به سمت پیشرونده را مثبت و سمت پسرونده منفی در نظر گرفته شد. پارامترهای جوشکاری و نام‌گذاری نمونه‌ها در جدول (2) ارایه شده است. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) سرعت پیشروی 200 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش پین 600 دور بر دقیقه انتخاب شد. سرعت پیشروی و سرعت چرخش پین مطابق با مطالعات گذشته انجام شد.



شکل2- طراحی اتصال در طول فرایند FSW.



شکل3- شماتیک پین استفاده شده در این پژوهش.

شکل(4) موقعیت موقعیت ابزار را در مطالعه حاضر نشان می‌دهد. در فرایند FSW، موقعیت مرکز ابزار جوشکاری در موقعیت ناحیه جوش (WZ) را تعیین می‌کند. بدین صورت که در جوشکاری بدون موقعیت ابزار موقعیت مرکزی WZ با سطح تماس اولیه (ICS) منطبق است. اما با جابجایی ابزار جوشکاری موقعیت ICS روی AS یا RS قرار می‌گیرد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]

پس از انجام فرایند جوشکاری نمونه‌هایی جهت انجام آزمون‌های کشش و ریزسختی سنجی و همچنین متالوگرافی با استفاده از وایرکات برش داده شدند. نمونه‌های متالوگرافی ابتدا توسط کاغذ سنباده SiC از سری 80 تا 2500 آماده سازی شدند. سپس مرحله ی پولیش با استفاده از صفحه پولیش نمد و محلول آلومینا انجام شد و در نهایت با استفاده از محلول خورنده حاوی $95ml\ H_2O + 1.5\ ml\ HCl + 1\ ml\ HF + 2.5\ ml\ HNO_3$ در مدت زمان 15 الی 20 ثانیه حکاکی شدند. نمونه‌های حکاکی شده با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل SA-Iran مدل IM 420 و سطوح شکست با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LE0440i XL30 مورد بررسی قرار گرفتند

جدول 2- پارامترهای متغیر جوشکاری استفاده شده در این پژوهش.

شماره نمونه	مکان ابزار پین	موقعیت ابزار
RS	Al7075	-۱
AS-Welding	مرکز جوش	۰
AS	Al2024	+۱

نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8[16] با ابعاد مشخص آماده سازی شدند و در دمای محیط توسط دستگاه کشش 30 تنی مدل INSTRON-4486 ساخت کشور انگلستان انجام شد. آزمون ریزسختی با استفاده دستگاه ریزسختی سنج Shimadzu مدل M و اعمال نیروی 100 گرم و مدت زمان 10 ثانیه طبق استاندارد ASTM E 384 به روش سختی ویکرز انجام گرفت [17].

3- نتایج و بحث

3-1- ماکروساختار

ماکروساختار نمونه‌های جوشکاری شده تحت شرایط موقعیت‌های مختلف با بزرگ نمایی یکسان در شکل (5) نشان داده شده است. مطابق شکل (5) مشاهده می شود که در این اتصال آلیاژهای آلومینیوم Al2024 و Al7075 به ترتیب در سمت پیشرونده (RS) و پسرونده (AS) قرارگرفتند. به طور واضح مشخص است که اتصال FSW عاری از عیب یا هرگونه نقص دیگر (عدم نفوذ، تخلخل و غیره) است. نتایج نشان می‌دهد که سطح جوش از چهار منطقه متداول منطقه جوش (WZ)، ناحیه متاثر از شانه پین (SAZ)، ناحیه متاثر از کار مکانیکی (TMAZ) و ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) تشکیل شده است. ریز ساختار منطقه HAZ در هر دو ماده بسیار شبیه به فلزات پایه است. منطقه TMAZ ناشی از هر دو عامل حرارت و تغییر شکل پلاستیک در طول فرایند FSW است که توسط یک ساختار تغییر شکل یافته ناشی از اغتشاش مکانیکی ابزار است.



شکل 4- شماتیک طرح اتصال نمونه‌ها.

سیلوا و همکاران [18] در مطالعه خود در جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم Al2024 و Al7075 با استفاده از فرایند اصطکاکی-اغتشاشی مناطق مختلف مشابه را در تحقیق خود مشاهده کردند. همچنین از شکل(5) مشاهده می‌شود که در نمونه‌های بدون موقعیت و موقعیت به سمت RS حلقه پیازی شکل و ساختار لایه‌ای تشکیل نشده است که این امر عدم اختلاط بین فلزات پایه را نشان می‌دهد که منجر به ایجاد ریزساختار نواری شکل می‌شود اما در موقعیت ابزار به سمت AS ناحیه پیازی

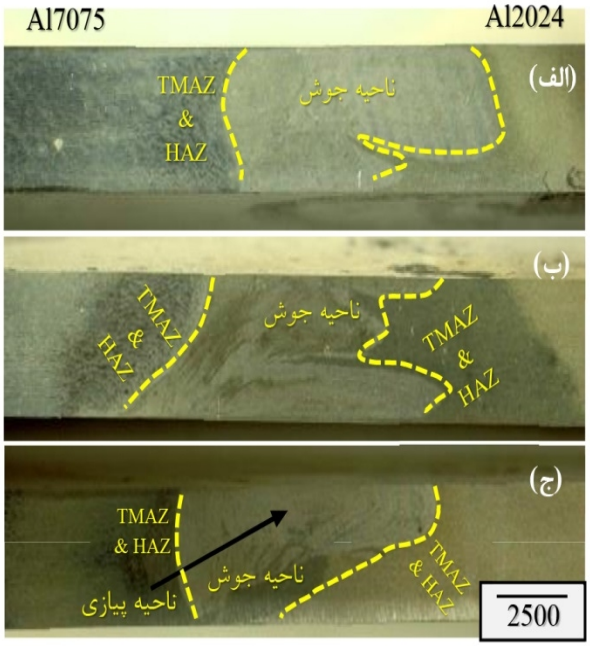
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]

شکل به وضوح قابل مشاهده است که این امر ناشی از اختلاط مواد اولیه است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که موقعیت ابزار پین تاثیر مهمی بر ریزساختار و ناحیه اغتشاش یافته دارد.

3-2- ریزساختار

جهت بررسی منطقه اغتشاش یافته، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از این ناحیه تهیه شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی منطقه اغتشاش یافته برای هر سه نمونه AS، RS و AS-Weld در شکل(6) آورده شده است. همانطورکه در شکل(6-الف) مشاهده می‌شود با موقعیت ابزار به سمت AS اندازه دانه‌ها در این ناحیه نسبت به فلزات پایه کاهش داشته است. با توجه به تمام داده‌های فرایند FSW برای آلومینیوم، درجه حرارت بالاتر و تغییر شکل‌های پلاستیکی شدید، دانه‌های کوچکتر نسبت به فلز پایه را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند؛ ریزساختار بدست آمده نشان از تشکیل دانه‌های ریز و همگن در منطقه جوش دارد. همچنین در این نمونه رسوباتی با ترکیبات فلزی AlMgFeCu و AlCuO به رنگ سفید به چشم می‌خورد. در شکل(6-ب) نیز مشاهده می‌شود ریز شدن و همگن شدن ریزساختار مشاهده می‌شود. در این ناحیه رسوباتی با ترکیبات بین فلز AlCuMg و AlSiO مشاهده می‌شود. بر خلاف دو نمونه جوشکاری شده تحت شرایط بدون موقعیت و RS، نمونه AS رفتاری متمایز را نشان می‌دهد. همانطورکه در شکل (6-ج) مشاهده می‌شود منطقه اغتشاش یافته به صورت ریزساختاری هم‌محور و همگن اما متمایز تشکیل شده است که نشان از تشکیل مورفولوژی متفاوت نسبت به دو نمونه دیگر را دارد.

نتایج نشان می‌دهد رسوبات در تمامی نمونه‌ها به‌صورت همگن پراکنده شده است. کاوالیر و همکارانش [19] گزارش دادند که در فرایند جوشکاری FSW آلیاژهای آلومینیوم 2024 به 7075، درجه حرارت بیشتر و تغییر شکل پلاستیکی شدید نسبت به فلزات پایه، دانه‌های منطقه جوش نسبت به فلزپایه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شد که منطقه‌ی اغتشاش یافته نمونه AS مورفولوژی لایه‌ای تشکیل شده است. از این‌رو جهت تعیین و بررسی لایه‌های تشکیل شده، از نمونه AS آزمون EDS گرفته شد. نتایج آزمون EDS برای نمونه AS در شکل(7) آورده شده است. جدول (3) تجزیه و تحلیل کمی EDS از فلزات پایه و مناطق مربوط به شکل(7– لف) برای نمونهAS را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل نقطه ای EDS برای Cu، Zn، Mg و Mn در موقعیت‌های نشان داده شده در شکل(6-الف) و همچنین در دو فلزپایه در جدول (3) ارایه شده است. درصد جرمی Cu، Mg و Zn در موقعیت A نزدیک به آلیاژ 7075 و در موقعیت B نزدیک به آلیاژ 2024 می‌باشد.



شکل 5- تصاویر ماکرو ساختار از نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط موقعیت متفاوت: الف- RS، ب- As-Welded ج- AS.

با توجه به شکل (7) و جدول (3) نوارهای روشن‌تر غنی از Zn هستند در حالی‌که نوارهای تیره نشان از حضور Cu و Mg دارند.

با توجه به اینکه هر دو آلیاژ آلومینیوم 2024 و 7075 دارای عناصر آلیاژی Cu و Mg هستند و عنصر آلیاژی Zn فقط مربوط به آلومینیوم Al7075 است. از این‌رو لایه‌های روشن را می‌توان به آلیاژ آلومینیوم Al7075 و لایه‌های تیره را می‌توان به آلیاژ آلومینیوم Al2024 نسبت داد.

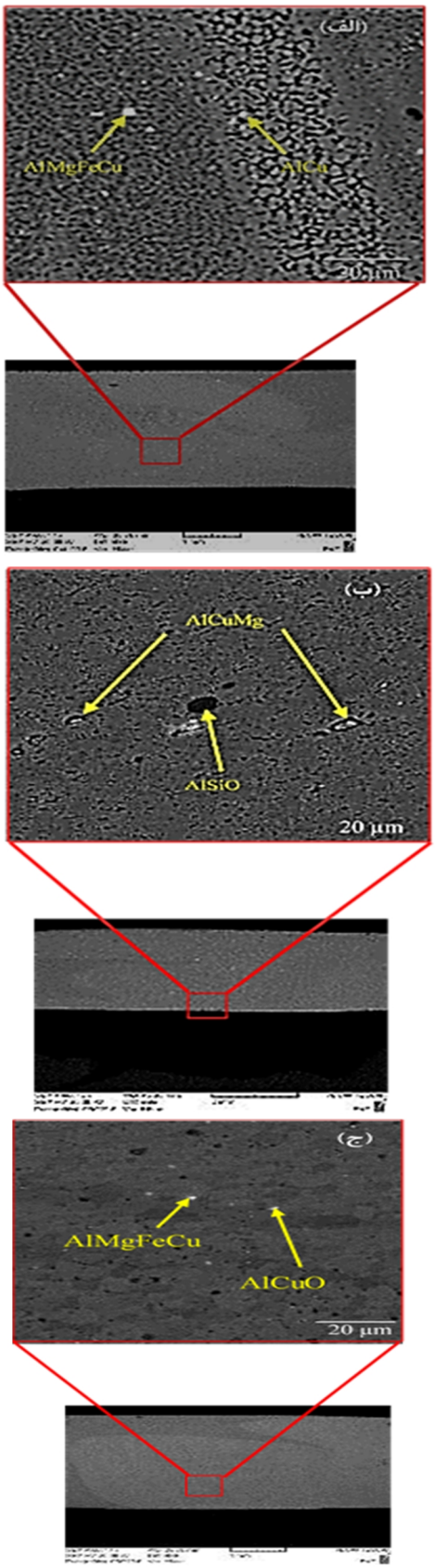
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]

این امر اختلاط کامل فلزات پایه و تشکیل ناحیه پوسته پیازی را در منطقه اغتشاش یافته و تاثیر موقعیت ابزار بر تشکیل این ناحیه را نشان می‌دهد. ناحیه پیازی شکل برای نمونه AS در شکل(6-ج) نشان داده شده است. بغدادی و همکاران [20] گزارش کردند که با موقعیت ابزار پین، مورفولوژی منطقه جوش تغییر می‌کند.

جدول3- نتایج آنالیز آزمون EDX از فلزات پایه و مناطق مربوط به شکل 6 برای نمونه AS.

عناصر آلیاژی	آلیاژ Al 2024	آلیاژ Al 7075	ناحیه روشن (A)	ناحیه تاریک (B)
Cu	5/60	1/73	2/06	3/11
Zn	0/15	5/06	2/67	0/03
Mg	3/75	2/75	2/72	2/36
Mn	0/02	0/10	-	-

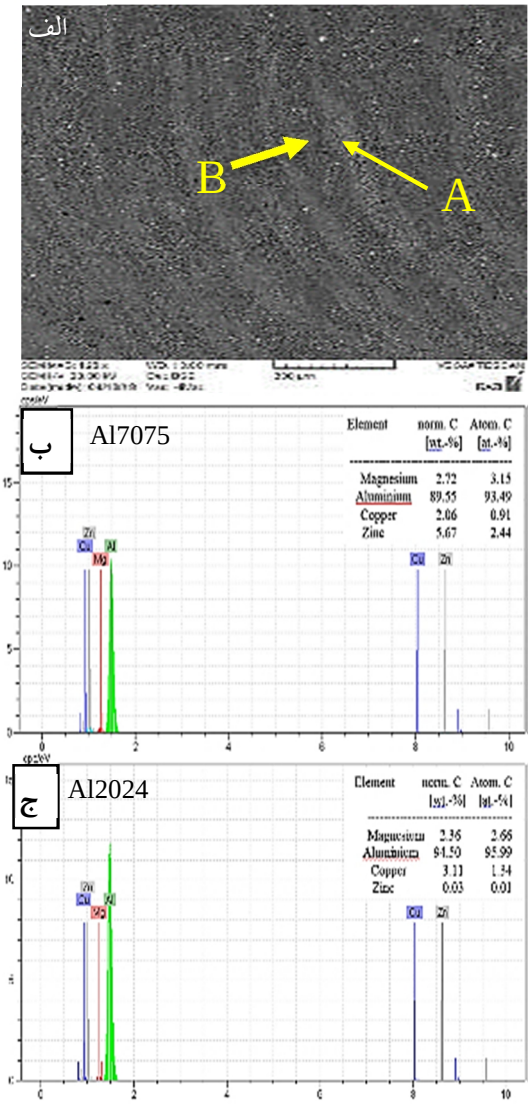
شکل(8) ریزساختار مناطق مختلف اتصال در نمونه موقعیت داشته شده به سمت AS را نشان می‌دهد. این نمونه به دلیل داشتن ریزساختاری با مورفولوژی پوسته پیازی در ناحیه جوش ارایه شده است. شکل (8-الف و 8-ب) ریزساختار فلزات پایه را نشان می‌دهد. همانطورکه در این شکل مشاهده می‌شود ریزساختار آلیاژ Al7075 به‌صورت دانه‌های تبلور مجدد یافته و کشیده ناشی از فرایند نورد است و ریزساختار آلیاژ Al2024 به صورت دانه‌های همگن و آنیل‌شده همراه با توزیع یکنواخت است [21]. شکل (8 –ج) و (8-د) به ترتیب ریزساختار مناطق TMAZ و HAZ در سمت AS و RS را نشان می‌دهد. با توجه به این دو شکل مشاهده می‌شود که در ناحیه TMAZ اندازه دانه‌ها نسبت به فلز پایه کاهش یافته که این امر ناشی از حرارت ناشی از فرایند جوشکاری می‌باشد. تغییرات ریزساختار دانه ناشی از تغییر شکل پلاستیک و تبلور مجدد دانه ها باشد. در ناحیه متاثر از حرارت نیز ریز شدن دانه‌ها و تشکیل ناحیه ریزدانه به چشم می‌خورد. همچنین در ناحیه متاثر از حرارت در سمت فلزپایه Al2024، دانه‌ها به دلیل حرارت‌ناشی از جوشکاری دچار تبلور مجدد شده‌اند.



شکل6- تصاویر SEM از ناحیه اغتشاش یافته برای: الف-RS، ب-As-welded ج-AS.

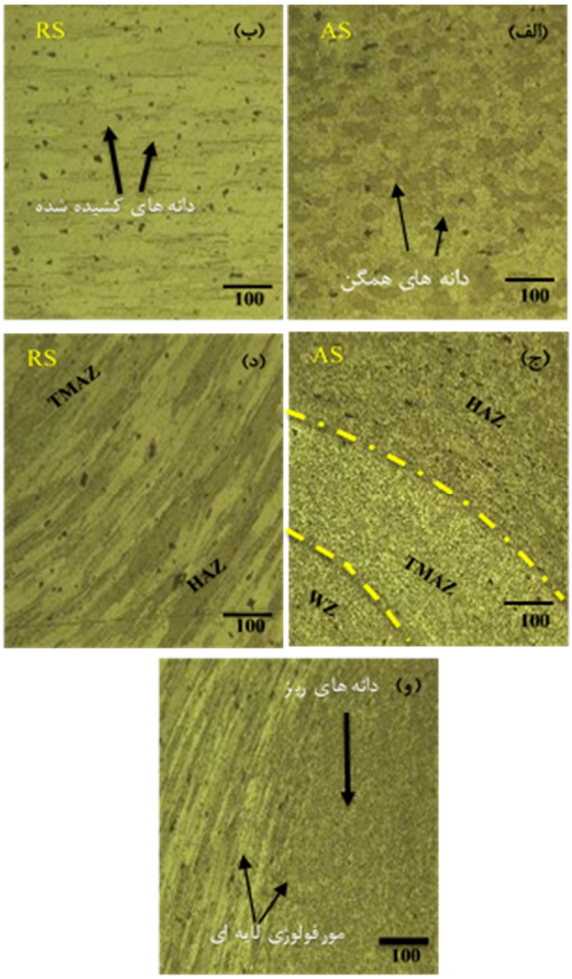
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]



شکل 7- الف- تصویر SEM از ناحیه اغتشاش یافته از نمونه AS و آنالیز EDS از ب- نقطه A ج- نقطه B

این ریز شدن دانه‌ها را می‌توان به حرارت ایجاد شده توسط اصطکاک بین ابزار پین و فلزات پایه نسبت داد. ریز شدن دانه و تشکیل مورفولوژی لایه‌ای یا در منطقه جوش نیز به چشم می‌خورد. فشار در مرکز ابزار جوشکاری در حداکثر مقدار خود قرار دارد و با فاصله گرفتن از مرکز ابزار پین به تدریج به سمت طرفین کاهش می‌یابد. در نتیجه اصطکاک بین مرکز پین و فلزات پایه بیشترین مقدار خود را دارد و دما در این ناحیه در حداکثر مقدار خود قرار دارد [13]. به همین دلیل پس از انجام فرایند جوشکاری، ریزشدن‌دانه‌هاودر نهایت تشکیل مورفولوژی لایه‌ای یا پوسته پیازی در این ناحیه مشاهده می‌شود.



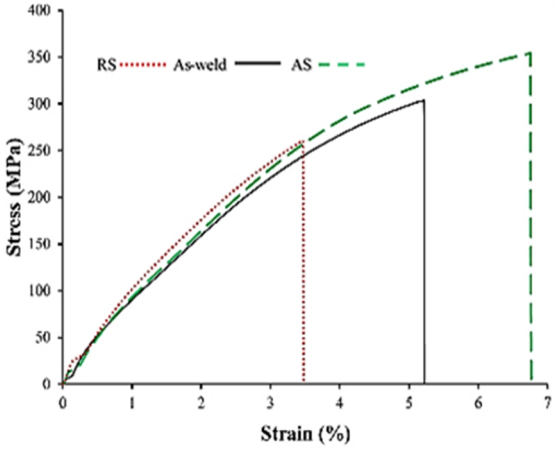
شکل 8- ریزساختار مناطق مختلف برای نمونه AS: الف-Al2024، ب-Al7075، فصل مشترک فلز پایه و فلز جوش ج- AS و د- RS و و- فلزجوش.

3-3- آزمون کشش

نتایج آزمون کشش برای هر سه نمونه جوشکاری شده تحت شرایط مختلف موقعیت در شکل (9) و جدول(4) آورده شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود با موقعیت ابزار پین به سمت AS و RS تفاوت قابل توجهی در میزان استحکام کشش مشاهده می‌شود. همانطورکه مشاهده می‌شود استحکام کششی نمونه بدون موقعیت تقریبا برابر 301 مگا پاسکال است که با موقعیت ابزار پین به سمت AS استحکام به مقدار 354 مگاپاسکال افزایش می‌یابد اما با موقعیت ابزار پین به سمت RS استحکام کششی کاهش می‌یابد و تقریبا به مقدار 261 مگا پاسکال می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که با موقعیت ابزار به سمت AS استحکام کششی به مقدار 17/5% افزایش می‌یابد اما

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]

با موقعیت ابزار به سمت RS استحکام کششی به مقدار 13/3% کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود موقعیت ابزار تاثیر بسزایی روی خواص مکانیکی اتصال دارد. که این امر ناشی از میزان اختلاط فلزات پایه، پراکندگی رسوبات منطقه جوش بر می‌گردد.

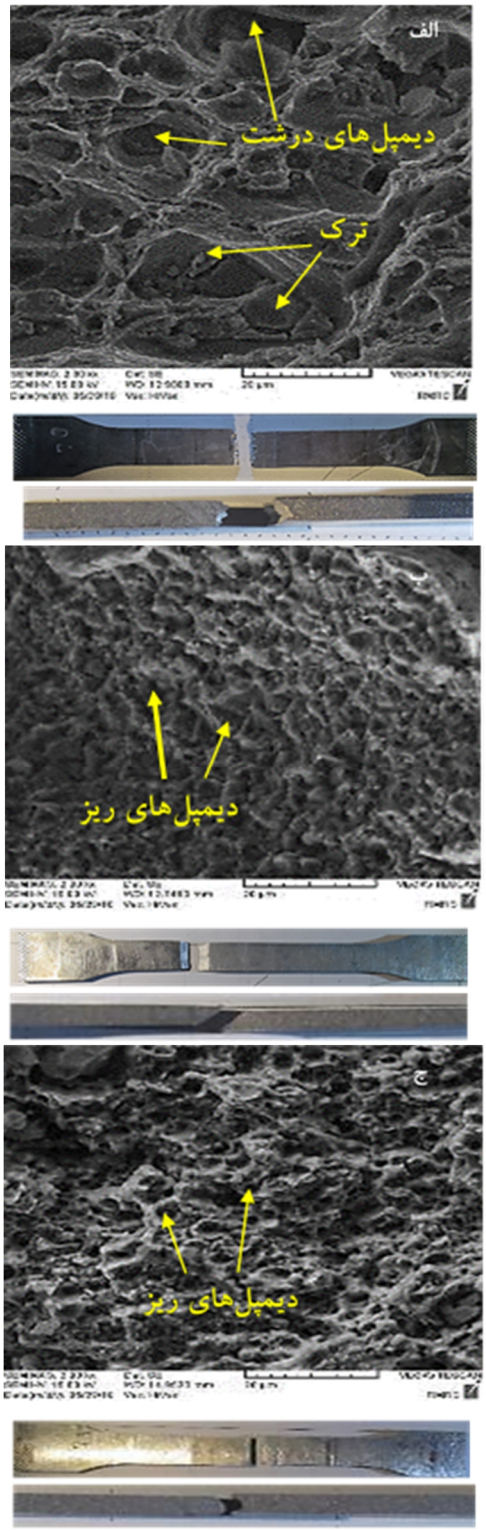


شکل 9 منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های جوش داده شده.

جدول 4- خواص مکانیکی نمونه‌های جوش تحت شرایط مختلف موقعیت.

شماره نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	تغییر طول (٪)	حداکثر نیروی اعمالی (N)	محل شکست نمونه‌ها
Al 2024	۳۰۷	۵۰۲	۱۸/۱۹	۱۱۳۸۷	-
Al7075	۲۹۰	۴۸۲	۱۰/۸۶	۳۸۵۴۴	-
AS	۱۵۰	۳۵۴	۶/۷۴	۱۳۲۷۲	HAZ
As-weld	۳۰۱	۳۰۱	۵/۲۱	۱۱۳۸۷	HAZ
RS	۶۵	۲۰۷	۳/۴۷	۹۷۸۴	HAZ

همانطورکه در شکل(6) مشاهده می‌شود ریزساختار در ناحیه جوش نمونه موقعیت یافته به سمت AS دارای مورفولوژی لایه‌ای که نشان از اختلاط مناسب فلزات پایه دارد. همچنین در منطقه جوش رسوبات به صورت یکسان پراکنده شده و ترکیبات بین فلزی سخت AlCu شکل گرفته‌اند. تشکیل ترکیبات بین فلزی سخت در ناحیه اغتشاش یافته تاثیر بر استحکام کششی جوش تاثیر گذار است. همچنین در جدول(4) مشاهده می‌شود که تغییر طول در نمونه موقعیت یافته به سمت AS به میزان 30 درصد بهبود یافته است اما در نمونه RS تغییر طول نسبت به نمونه بدون موقعیت 33 درصد کاهش داشته است.



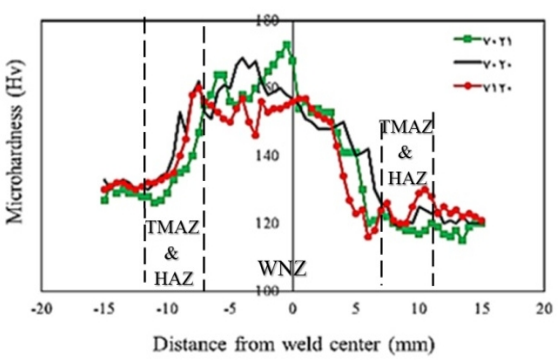
شکل 10- تصاویر SEM از کشش شکست نمونه‌های الف- RS ب- As-Weld ج- AS.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]

3-4- شکست نگاری آزمون کشش

خواص شکست مکانیکی به شدت وابسته به تجزیه و تحلیل سطوح شکست است. از اینرو جهت بررسی ماهیت شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. شکل(10) تصاویر سطح شکست نمونه‌های AS، As-Weld و RS پس از آزمون کشش را نشان می‌دهد. در این تصاویر محل شکست نمونه‌ها و نوع شکست ارایه شده است. همانطورکه مشاهده می‌شود با موقعیت ابزار پین، سطح شکست نیز رفتاری متفاوت را نشان می‌دهد. همچنین با مشاهده نوع شکست در نمونه‌ها مشاهده می‌شود که شکست در هر سه نمونه متفاوت است. همانطورکه مشاهده می‌شود شکست در نمونه بدون موقعیت با زاویه 45درجه اتفاق افتاده است. اما شکست در نمونه RS از نوع ترکیبی شامل شکست مورب در امتداد جهت 45 درجه و بصورت زیگزاگ است. شکست، در حالت موقعیت ابزار به سمت AS، مسطح و عمود بر جهت کشش است. علاوه بر این، با توجه به سطح شکست نمونه‌های کشش، در نمونه بدون موقعیت و نمونه AS، حفرات و دیمپل‌های ریز در ساختار به چشم می‌خورند که نشان از شکست از نوع نرم در این نمونه‌ها است [20]. بر خلاف دو نمونه قبل، در سطح شکست نمونه RS دیمپل‌های درشت و ترک‌های بین دانه‌ای در ساختار مشاهده می‌شود که نشان از شکست از نوع نیمه ترد دارد.



شکل11- پروفایل‌های ریزسختی نمونه‌های جوشکاری شده در موقعیت‌های مختلف.

3-5- ریزسختی سنجی

سختی مناطق مختلف جوش با استفاده از آزمون اندازه‌گیری سختی ویکرز در سطح مقطع جوش در نمونه‌های جوشکاری شده تحت موقعیت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. تغییرات ریزسختی در سطح جوش برای نمونه‌های جوشکاری شده تحت موقعیت‌های مختلف در شکل (11) آورده شده است. با توجه‌به نتایج بدست آمده متوسط ریزسختی آلیاژهای آلومینیوم Al2024 و Al7075 به ترتیب برابر 121 ویکرز و 127 ویکرز می‌باشد. کاوالیر و همکاران نیز در مطالعات خود نتایجی مشابه رو گزارش داده بودند [21].

با توجه به شکل (11)، نتایج ریزسختی در تمامی مناطق برای هر سه نمونه از یک روند پیروی می‌کنند. ریزسختی در مناطق HAZ و TMAZ نسبت به منطقه BM افزایش می‌یابد که این امر به دلیل حرارت ناشی از اصطکاک بین پین و فلزات پایه در حین فرایند جوشکاری می‌باشد. کمترین مقدار ریزسختی در ناحیه فلزات پایه و بیشترین مقدار ریزسختی در ناحیه اغتشاش یافته برای هر سه نمونه مشاهده شد. در منطقه متاثر از حرارت نیز ریزسختی بسیار کم است که این امر ناشی از حرارت تشکیل شده در حین فرایند جوشکاری و در نتیجه نرم شدن این منطقه می‌باشد. با افزایش فاصله ازHAZ مقدار ریزسختی در منطقه متاثر از کار مکانیکی (TMAZ) به دلیل ریزشدن ریزساختار در این ناحیه تحت اثر حرارت ایجاد شده در حین فرایند جوشکاری افزایش می یابد تا در منطقه اغتشاش یافته به حداکثر میزان خود برسد. به وضوح می‌توان مشاهده کرد که توزیع ریزسختی در منطقه اغتشاش یافته تقریبا ناهمگن است. که این ناهماهنگی کاملا مربوط به ساختار جوش در منطقه اغتشاش یافته است. بیشترین ریزسختی در نمونه AS در مرکز نمونه مشاهده می‌شود که این امر را می‌توان به حضور رسوبات AlCu در ناحیه جوش نسبت داد. نتایج ریزسختی برای نمونه‌های مختلف یک روند مشابه را نشان می‌دهد. همانطورکه مشاهده می‌شود ریزسختی در منطقه جوش با موقعیت ابزار پین به سمت AS مقداری بهبود یافته است. اما با موقعیت ابزار به سمت RS ریزسختی در منطقه جوش کاهش می‌یابد که این امر با توجه به نتایج بدست آمده از ریزساختار قابل توجیه می‌باشد. تشکیل حلقه پیازی شکل‌باساختارریزدانه باعث‌افزایش ریزسختی نسبت به دو نمونه دیگر شده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]

4- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر اثر موقعیت جانبی ابزار روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم Al2024-Al7075 جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی بررسی شد و نتایج زیر بدست آمده است:

- نتایج ماکروسکوپی نشان داد که اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم 2024 و 7075 در شرایط موقعیت و بدون موقعیت جانبی، عاری از عیب یا هرگونه نقص ظاهری دیگری (عیوب چشمی) صورت گرفته است.

- در اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم 2024 و 7075، چهار ناحیه مختلف فلز پایه، HAZ، TMAZ و منطقه اغتشاش یافته مشاهده شد. همچنین با موقعیت ابزار پین به سمت AS مورفولوژی جوش به صورت حلقه پیازی نیز شکل گرفته است که نتایج EDS تاییدی بر این موضوع بود ولی با موقعیت ابزار به سمت RS الگوی حلقه پیازی مشاهده نشد.

- با موقعیت ابزار به سمت AS استحکام کششی به مقدار 17/5% افزایش و با موقعیت ابزار به سمت RS استحکام کششی به مقدار13/3% کاهش یافت. نتایج نشان داد که استحکام کششی، تسلیم و ازدیاد طول با موقعیت جانبی AS بهبود یافت. همچنین شکست در نمونه‌های موقعیت داده شده به سمت RS از نوع نیمه ترد و در نمونه‌های موقعیت داده شده به سمت AS و بدون موقعیت از نوع نرم بود.

- نتایج ریزسختی نشان داد که ریزسختی از فلزات پایه به سمت فلزجوش افزایش یافته و توزیع ریزسختی در منطقه اغتشاش یافته برای تمامی نمونه‌ها تقریبا یکسان و ناهمگن است که این ناهماهنگی کاملا مربوط به ساختار جوش در منطقه اغتشاش یافته است.

- در این مطالعه، بهترین رفتار مکانیکی و خواص ریز ساختاری در اتصال غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیوم 2024 و 7075 در نمونه موقعیت یافته به سمت AS (آلیاژ فلز پایه Al2024) ، حاصل شد.

منابع

1- Liu G., Murr L., Niou C., Mclure J., Vega F., "Micro structural aspects of the friction stir welding of 6061- T6 aluminum", Scripta Metallurgica Materialia, 1997; 37: 355-361.

2- Mishra R.S., Ma Z.Y., "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering R, 2005; 50:1- 78.

3- Cantin G. M. D., David S. A., Thomas W. M., Lara-Curzio E., Babu S. S., "Friction Skew-Stir Welding of Lap Joints in 5083–o Aluminum, Science and Technology of Welding and Joining", 2005; 10 (3): 268-280.

4- Grietmann M. J., Deimel P., "Friction stir welding innovative technology for joining aluminum components", Otto- Graf. Journal, 2005; 16.

5- Vilaca P., Thomas W., "Friction stir welding technology", Verlag berlin Heidelberg, 2011; 10: 1007-1056.

6- Zhi-hong F. U., Di-Qiu H. E., Hong W., "Friction stir welding of aluminum alloys", Wuhan university of technology material science Ed, 2003; 19(1).

7- Zhang Y. N., Cao X., Larose S., Wanjara P., "Review of tools for friction stir welding and Processing", Canadian Metallurgical Quarterly, 2012; 51: 250-261.

8- Khodir S. A., Shibayanagi T., "Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys", Materials Science and Engineering B, 2008; 148: 82–87.

9- Song Y., Yang X., Cui L., Hou X., Shen Zh., Xu Y., "Defect features and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar AA2024–AA7075 aluminum alloy sheets", Materials and Design, 2014; 55: 9–18.

10- Cavaliere, P., Cerri, E., Squillace, A., "Mechanical response of 2024-7075 aluminum alloys joined by friction stir welding". Journal of Materials Science, 2005; 40: 3669–3676.

11- Kumar Sahu P., Pala S., Pal S. K., Jain R., "Influence of plate position, tool offset and tool rotational speed on mechanical properties and microstructures of dissimilar Al/Cu friction stir welding joints", Materials Processing Technology, 2016; 235: 55–67.

12- Ramachandran K.K., Murugan N., ShashiKumar S., "Effect of tool axis offset and geometry of tool pin profile on the characteristics of friction stir welded dissimilar joints of aluminum alloy AA5052 and HSLA steel", Materials Science & Engineering A, 2015; 639: 219–233.

13- Yan X., Ma H., Xiong L., Tian Zh., Cao X., Zhang Y., "Effect of lateral offset on microstructure and strength of friction stir welded 2A14-T6 aluminum alloy", Advanced Manufacturing Technology, 2018; 97: 3893–3902.

14- Kar A., Suwas S., Kailas S. V., "Significance of tool offset and copper interlayer during friction stir welding of aluminum to titanium", 2019; 100: 435–443.

15- Shah L. H., Guo S., Walbridge S., Gerlich A., "Effect of tool eccentricity on the properties of friction stir welded AA6061 aluminum alloys", Manufacturing Letters, 2017.

16- ASTM E8-00 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

17- ASTM E 384 Standard Test Method for Micro indentation Hardness of Materials.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]

18- Da Silva A.A.M., Arruti E., Janeiro G., Aldanondo E., Alvarez P., Echeverria A., "Material flow and mechanical behavior of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminum alloys friction stir welds", Materials and Design, 2011; 32: 2021–2027.
19- Cavaliere P, Nobile R, Panella F, "Mechanical and microstructural behavior of 2024–7075 aluminum alloy sheets joined by friction stir welding", International Journal of Machine Tools Manufacturing, 2006; 46: 588–594.
20- Baghdadi A. H., Selamat F. M., Sajuri Z., "Effect of tool offsetting on microstructure and mechanical properties dissimilar friction stir welded Mg-Al alloys", Materials Science and Engineering, 2017; 238.
21- Cavaliere P., Panella F., "Effect of tool position on the fatigue properties of dissimilar 2024-7075 sheets joined by friction stir welding", Materials Processing Technology, 2008; 206: 249–255.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.2476583.1400.7.2.2.5]