نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره 1، بهار و تابستان1398، صفحه 136-125

تاثیر رزوه پین ابزار برروی جریان مواد و خواص مکانیکی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ 6065 آلومینیوم و مس خالص

رحیم نریمانی[1]، مجید الیاسی[2*]، مرتضی حسین زاده[3]، حامد آقاجانی درازکلا[4]

۱-گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری، ساری، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت الله آملی، آمل، ایران

۴- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی،تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۸ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳)

چکیده

اتصال فلزات غیرهمجنس با کیفیت و خواص مکانیکی مطلوب از مشکلات مهم و اساسی صنعت می باشد. یکی از روش‌های بسیار پر کاربرد جهت رفع این مشکل، فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می باشد. در این مقاله با استفاده ازدو هندسه متفاوت پین ، به شکل های استوانه ای و رزوه دار، به بهینه سازی پارامترهای موثر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیم سری ۶۰۶۵ به مس خالص جهت دستیابی به بیشترین حالت ترکیب، ایجاد حالت کامپوزیتی و استحکام کششی پرداخته شده است. جهت انجام این پژوهش سرعت دورانی ابزار ۱۱۳۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۲۴ ،۴۰ و ۶۵ میلیمتر بر دقیقه، عمق نفوذ ۰/۳ میلیمتر و زاویه انحراف ابزار ۳ درجه انتخاب گردید. نتایج حاصل نشان داد که در پارامترهای ثابت جریان داخلی مواد توسط پین رزوه ای بهتر از پین ساده است. بر اساس نتایج بدست آمده، با کاهش سرعت پیشروی ابزار می توان استحکام اتصال را افزایش داد. نتایج حاصل از تست کشش نشان داد که بیشینه استحکام اتصال تولید شده با پین رزوه ای حدود ۳۴۵ مگاپاسکال با ازدیاد طول ۲/۶ میلیمتر و اتصال تولید شده با پین ساده حدود ۲۷۲ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۲/۲ میلیمتر بود که در سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه حاصل شد.

کلمات کلیدی: اتصال غیرهمجنس، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، هندسه پین ابزار، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۵، مس خالص.

Effect of Tool Pin Threat on the Material Flow and Mechanical Properties Friction Stir Welding of 6065 Aluminum Alloy to Copper

R. Narimani[1], M. Eliasi[*2], M. Hosseinzadeh[3], H.Aghajani Derazkola[4]

1- Mechanical Engineering Group, Islamic Azad University, Sari Branch, Sari, Iran.
2- Faculty of Mechanical Engineering, BabolNoshirvani University of Technology, Babol, Iran.
3- Faculty of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Ayatollah Amoli Science and Research Branch, Amol, Iran
4-Young Researchers and Elites Club, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

(Received 20 October 2018 ; Accepted 3 June 2019)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: elyasi@nit.ac.ir

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

Abstract
Dissimilar joint with good quality and mechanical properties is one of the major problems the industries. One of the most commonly used methods to solve this problem is friction stir welding process. In this paper two different tool pin with simple cylindrical and screwed profile were used to finding optimization of friction stir welding parameters to reach best mixing flow, composite structure and maximum tensile strength in dissimilar joint between AA6065 aluminum alloy and pure copper. In this research 1130 rpm tool rotation, 24, 40 and 65 mm/min travelling speed, 0.3 mm plunge depth and 3^o tool tilt angle were carried out. The results shows that internal material flow that produced with screw pin was better than simple cylindrical in constant process parameters. According to the results, at lower tool travelling speed the strength of joint increases. The tensile test results revealed the maximum strength of joint of screw pin was 345MPa with 2.6mm elongation and simple cylindrical pin was 272MPa with 2.2mm elongation which welded with 1130 rpm and 24 mm/min travelling speed.

Keywords: Dissimilar Joint, Friction Stir Welding, Tool Pin Profile, AA6065 Aluminum Alloy, Pure Copper.

1- مقدمه

اتصال فلزات غیرهمجنس یک ایده جالب در صنعت طراحی و ساخت قطعات صنعتی می باشد. هدف از اتصال دو فلز غیر همجنس، ترکیب خواص مکانیکی و حرارتی دو فلز می باشد [۱]. تولید اتصالات نامتجانس با روش های متداول جوشکاری به دلیل ذوب دو فلز، تغییرات گسترده در ساختار ماده اولیه، تولید تنش های پسماند و شکل گیری ساختارهای بین فلزی کار بسیار مشکل و در برخی موارد غیر ممکن است [۲]. این تغییر گسترده در خواص مواد و شکل گیری ساختارهای بین‌فلزی سب تردی و شکنندگی ناحیه جوش و کاهش استحکام اتصالات غیرهمجنس می شود [۳-۴]. جوشکاری حالت جامد تکنیک مناسبی برای اتصال اینگونه فلزات است، زیرا که در این تکنیک، فرآیند اتصال در زیر دمای ذوب دو فلز صورت می گیرد که در نتیجه آن عمل اکسیداسیون رخ نمی‌دهد و نیاز به گاز محافظ، محیط خنثی و مواد مصرفی وجود ندارد. در حالت کلی در فرآیندهای حالت جامد، عیوب کمتری در مقایسه با روشهای ذوبی در اتصال پیش می آید. در این روشها ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) که منشاء بسیاری از عیوب است و از دلایل عمده کاهش خواص مکانیکی می‌باشد، بسیار کوچک است [۵]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اولین بار در موسسه جوش انگلستان (TWI) در سال ۱۹۹۱ میلادی ابداع گردید. این اتصال، نوعی از فرآیند جوشکاری حالت جامدی است که برا ی نخستین بار بر روی آلیاژ آلومینیم آزمایش شد [۵]

فرایند اتصال، در این روش در اثر اصطکاک بین قطعه کار و یک ابزار مصرف نشدنی مقاوم در برابر سایش و حرارت حاصل می شود [۱]. فرآیند با بستن ورق‌های فلزی روی صفحه‌ای که صفحه پشتی نامیده می شود آغاز می گردد، ورق‌ها باید با نیروهای ورق گیرها به خوبی مهار شوند تا از حرکت آنها در جهات مختلف حین جوشکاری جلوگیری شود. سپس ابزار چرخان در فصل مشترک قطعات تا جایی که شانه سطح قطعه کار را لمس کند، نفوذ و پس از گرم شدن قطعه کار در امتداد فصول مشترک پیشروی می کند.

امروزه در رابطه با این فرآیند مطالعات زیادی در حال انجام است که شامل بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر خواص ناحیه اتصال می باشد. درمورد اتصال فلزات غیرهمجنس به خصوص اتصال آلومینیوم به فلزات دیگر از جمله مس، مطالعاتی انجام شده است [۶]. فراهتی و همکارانش به بررسی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ به مس خالص پرداخته است. در این تحقیق به بررسی ریز ساختار، رسوبات حاصل از جوشکاری، ساختار حاصل از متالوگرافی و سختی سنجی حاصل پرداخته اند [۷]. آنها نشان دادند که ناحیهٔ متأثر از حرارت در سمت مس دارای دانه‌های درشت تر نسبت به ناحیهٔ فلز پایه (BM) مس است و همچنین ناحیهٔ متأثر شدهٔ ترمودینامیکی (TMAZ) دانه هایی کشیده و خشن دارد. در ناحیهٔ اختلاطی دو فلز می توان ریز شدن دانه ها را مشاهده

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

کرد که این پدیده بر اثر اغتشاش در این ناحیه رخ داده است. بارکتاین و همکارانش [۸] بر روی همین اتصال کار کردند. آنها اعلام کردند که عملیات حرارتی کمک به افزایش استحکام اتصال می‌کند. با توجه به نتایج کار آنها بعد از عملیات حرارتی، محل شکست اتصال آلیاژ آلومینیم ۱۰۵۰ به مس از منطقه اغتشاش به فلز پایه آلومینیومی انتقال پیدا کرد. شیاوی و همکارانش [۹] در مطالعاتی مبنی بر جوش پذیری دو فلز غیر همجنس مس و آلومینیوم به یک نتیجه مهم و جالبی رسیدند و بیان نمودند که وجود ترکیبات فلزی بین این دو فلز یک اثر منفی در اتصال این دو فلز می گذارد. وجود این ترکیبات بین‌فلزی با افزایش ضخامت افزایش یافته و با کاهش ضخامت کاهش می یابد. آنها اعلام کردند که در جوشکاری اصطکاکی اعتشاشی صفحات نازک در مقایسه با صفحات ضخیم، نرخ خنک شوندگی اتصال بالاتر است و در نتیجه زمان نفوذ برای تشکیل ترکیبات بین فلزی مس-آلومینیومی کاهش می یابد و ضخامت این لایه ها به حداقل ممکن می رسد.

اکینلابی و همکارانش [۱۰] با تغییر در قطر شانه ابزار، سرعت دورانی و سرعت خطی ابزار، به کنترل حرارت ورودی به منطقه اتصال پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با کنترل پارامترهای ابزار می توان استحکام و سختی اتصال را کنترل کرد. لیو و همکارانش [۱۱] به بررسی ساختارهای لایه لایه در اتصال آلومینیوم A506 و مس پرداختند. آنها اعلام کردند که در اتصال بین این دو ماده، دمای ناشی از حرارت و اصطکاک پایین تر از دمای تبلور مجدد مس است و این پدیده سبب شکل گیری ساختار لایه ای به جای ترکیبات متالورژیکی بین دو ماده اولیه می شود.

گالوآو و همکارانش [۱۲] در یک مطالعه تحقیقی به تاثیر هندسه ابزار بر تشکیل و توزیع ساختارهای شکننده بین فلزی در جوش اصطکاکی اغتشاشی ورق های نازک ۱ میلیمتری آلومینیوم و مس پرداختند. آنها بیان نمودند که هندسه ابزار نقش مهمی در شکل گیری ساختار و توزیع ترکیبات بین فلزی شکننده دارد. ژو و همکارانش [۱۳] در یک تحقیق پژوهشی اعلام کردند که استفاده از آفست مناسب در سمت آلومینیوم و سرعت دورانی کم و قطر زیاد شانه ابزار می توان شکل گیری لایه های بین فلزی مخرب در مرز اتصال را به حداقل رساند. نتایج این تحقیق، در گزارشی دیگر و به طور مشابه توسط جودت و همکارانش [۱۴] نیز ارائه شد. سعیدا و همکارانش [۱۵] به جوش پذیری آلومینیوم خالص و مس به روش به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در جوشکاری این مواد معمولا مجموعه ای از فضاهای خالی، شکاف ها و سایر عیوب درون اتصال شکل می گیرند. عمده ترین ترکیبات بین فلزی که در این اتصال شکل می گیرند عبارت اند از $CuAl_2$ ، $CuAl$ و Cu_9Al_4 ، که به دلیل ماهیت شکننده ی آنها استحکام اتصال را پایین می آورند. تان و همکارانش [۱۶] و زو و همکارانش [۱۷و۱۸] در پژوهش‌هایی مشابه، اعلام کردند که ساختار ترکیبات بین فلزی تأثیر قابل توجهی درخواص مکانیکی اتصالات جوش داده شده دارد. در حالی که یک لایه نازک از ترکیب بین فلزی مس-آلومینیوم به بهبود ساختار خواص مکانیکی اتصال کمک می‌کند، ولی یک لایه ضخیم از آنها استحکام اتصال را به طور چشمگیری کاهش می دهد. در میان پژوهش های ذکر شده، تاثیر رزوه پین ابزار بر روی خواص مکانیکی و جریان مواد در اتصالات مس و آلومینیوم گزارش نشده است.

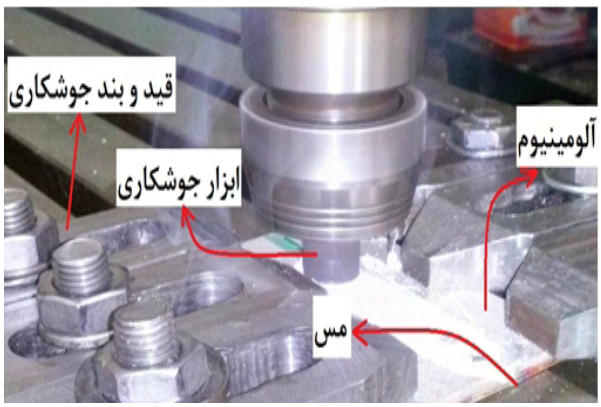
آلومینیوم ۶۰۶۵ دارای استحکام کششی بالا، مقاومت در برابر خوردگی است و مس خالص که با داشتن سختی کافی دارای خاصیت انعطاف پذیری عالی و ضریب هدایت حرارتی بهتری دارد و به علت داشتن کریستال های یکنواخت در مقابل خوردگی بسیار مقاوم است. لذا اتصال این دو فلز می تواند در صنایع بسیاری مانند کشتی سازی، صنایع برق، خودروسازی، صنایع دقیق اپتیک، مبدل های حرارتی و بویلرها، در ساخت وسایل حرارتی برودتی نظیر یخچال، بخاری وآبگرمکن ودر صنعت گاز در وسایل گاز سوز ودر خطوط انتقال نیرو و برق و دیگر صنایع مورد استفاده قرار گیرد. برهمین اساس در این مقاله به بررسی تاثیر شکل هندسی پین ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی و جریان مواد در اتصـــال دو فلز غیرهمجنس آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۵ و مس خالص

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

پرداخته شده است .

2- مراحل آزمایشگاهی

در این تحقیق ورق های ۳ میلیمتری آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس خالص توسط یک ماشین فرز معمولی به هم جوش داده شدند. خواص شیمیایی و مکانیکی فلزات مورد استفاده در این تحقیق در جداول(۱و۲) نشان داده شده است. قبل از قرارگیری ورق‌ها در درون قید و بند جوشکاری، سطح تماس دو ورق با سنباده صاف و اکسید زدایی شد. در طراحی فرایند آزمایش، آلومینیوم در بالا و مس در قسمت پایین آلومینیوم در قید و بند جوشکاری قرار گرفتند. نمایی از جوشکاری ورق ها در قید و بند جوشکاری در شکل(۱) نشان داده شده است.



شکل۱- تصویر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

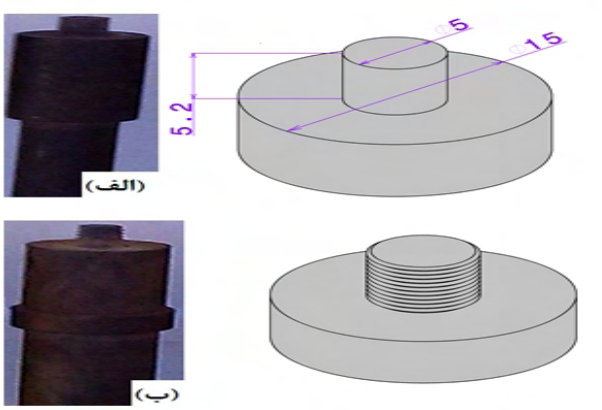
جدول۱- ترکیب شیمیایی فلزات پایه

عنصر	آلومینیوم ۶۰۶۵	مس
	درصد	درصد
Si	۰/۲	۰
Fe	۰/۴	۰
Cu	۲/۰	۹۹/۹۸
Mg	۱/۵	۰
Zn	۳/۱	۰
Ti	۰/۲	۰
Mn	۰/۳	۰/۰۱۱
Al	باقی مانده	۰
Pb	۰	۰/۰۱
Sn	۰	۰/۰۲
Ni	۰	۰/۰۰۳
Mo	۰	۰/۰۰۹

جدول۲- خواص مکانیکی فلزات پایه

آلیاژ	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام برشی (MPa)	درصد ازدیاد طول	سختی (ویکرز)
آلومینیوم ۶۰۶۵	۳۳۰	۲۷۶	۲۰۵	۱۲	۹۲
مس	۳۹۲	۲۳۶	۲۳۵	۱۲	۱۰۴

فرایند جوشکاری توسط یک ابزار سخت که دارای پین های استوانه ای ساده و رزوه ای از جنس فولاد گرمکار H13 بود، اجرا شد. قطر شانه ی ابزار ۱۵ میلیمتر، قطر پین استوانه ای ابزار ۵ میلیمتر و دارای طول ۵/۲ میلیمتر بود. هندسه ابزار رزوه ای با همان مشخصات ابزار استوانه ای و رزوه M5 با زاویه تقعر ۳ درجه ساخته شد. شکل هندسی ابزارهای مورد استفاده در این فرآیند در شکل(۲) مشاهده می شود .

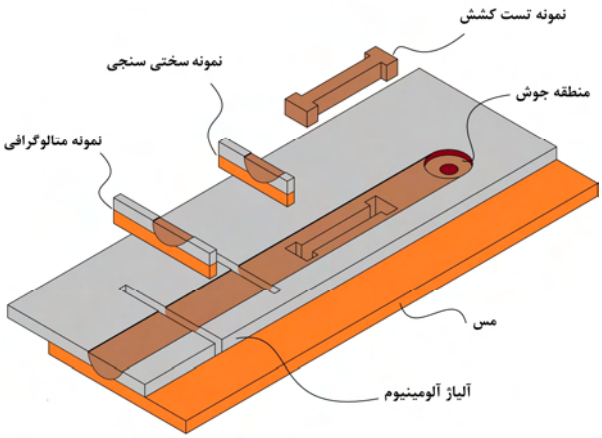


شکل۲-ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با پین (الف) ساده و (ب) پین رزوه ای

جهت دوران ابزار خلاف جهت گردش عقربه های ساعت بود و محور ابزار ۳ درجه انحراف نسبت به بردار نرمال صفحات داشت. برای جلوگیری از گرم شدن بیش از حد مس و کاهش سایش ابزار، ابزار جوشکاری به اندازه ۱/۳ میلیمتر در درون آلومینیوم قرار گرفت. ابزار فرایند دارای سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۲۴، ۴۰ و ۶۵ میلیمتر بر دقیقه بود. به منظور بررسی رفتار منطقه ی جوش در آزمون کشش، نمونه های تست کشش موازی خط جوش مطابق با استاندارد ASTM/E8-M03 آماده سازی شدند. از هر ورق جوشکاری شده ۳ نمونه تست کشش توسط دستگاه وایرکات بریده شد و

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

نتایج میانگین ۳ نمونه در این پژوهش گزارش شد. شکل(۳) شماتیکی از نمونه های برش خورده موازی خط جوش را نشان می دهد که برای تست های مختلف مورد استفاده قرار گرفتند.

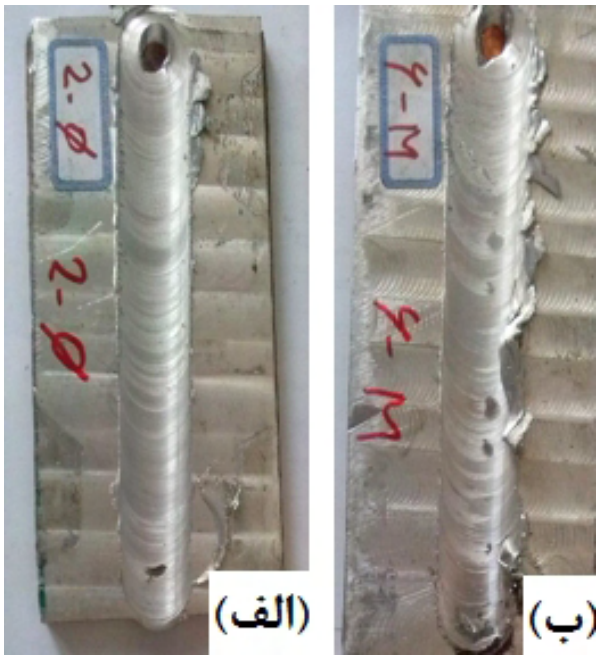


شکل۳-شماتیک فرایند به همراه نمونه های برش خورده جهت تست کشش، سختی سنجی و متالوگرافی

3-بحث و نتایج

3-1-بررسی جریان سطحی مواد

شکل(۴) جریان سطحی مواد را در اتصالاتی نشان می دهد که با ابزار با پین های ساده و رزوه ای جوشکاری شده اند .



شکل۴- جریان سطحی مواد که با پین (الف) ساده و (ب) رزوه ای جوشکاری شدند

جریان سطحی مواد شامل خطوط نواری شکل به هم پیوسته در سطح فلز آلومینیومی می باشد. به دلیل آنکه بیشترین تاثیر جریان سطحی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از شانه ابزار است، اختلاف چندانی بین سطح جوشکاری شده با ابزار با پین ساده که در شکل(۴-الف) نشان داده شده است، با سطح جوشکاری شده با ابزار با پین رزوه ای که در شکل(۴-ب) نشان داده شده است، مشاهده نمی شود. به دلیل وجود مس در قسمت زیرین اتصال، رنگ سطح جوشکاری شده همرنگ با فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ است. این پدیده حاکی از این موضوع است که با وجود اختلاف شکل پین ابزار، در حین جوشکاری و اغتشاش مواد، فلز مس نتوانسته به قسمت های بالایی اتصال نفوذ کند و رنگ خط جوش را تغییر دهد.

3-2- جریان داخلی مواد

نمای برش خورده از سطح مقطع عرضی اتصالاتی که با ابزار استوانه ای و رزوه ای با سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر در دقیقه به یکدیگر جوش داده شده‌اند در اشکال (۵-الف) و (۵-ب) نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده می توان مشاهده کرد که جریان داخلی مواد در هر دو وضعیت بدون عیب است. همانطور که در شکل (الف) مشاهده می شود، ورود فلز مس از مرز بین دو قطعه به درون فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ کم است. به نظر می‌رسد، این پدیده به آن دلیل رخ می‌دهد که فشار داخلی وارد شده (اکستروژن) مواد که ناشی از اغتشاش حاصل از پین ابزار است، ناکافی بوده و سبب شده تا جریان فلز مس خمیری به اندازه کافی به درون قسمت های بالایی منطقه اغتشاش وارد نشود. مقدار جابجایی فلز مس در جریان داخلی اتصالی که با پین رزوه ای جوشکاری شده، متفاوت است. همانطور که در شکل(۵-ب) مشاهده می شود، جریان داخلی سبب شده تا فلز مس به درون آلومینیوم ۶۰۶۵ به شکل فواره ای نفوذ کند. با توجه به نتایج حاصل می توان نتیجه گرفت که وجود رزوه در پین ابزار سبب می شود تا چسبندگی بین مواد خمیری در قسمت های زیرین اتصال با ابزار بیشتر شود و به دنبال آن

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

نیروی فورج داخلی بر روی مواد خمیری افزایش یابد. همانطور که در شکل(۵–ب) مشاهده می شود، وجود رزوه سبب شده تا مس خمیری گردد و نهایتا قسمت های بالایی فلز در آلومینیوم نفوذ کند .

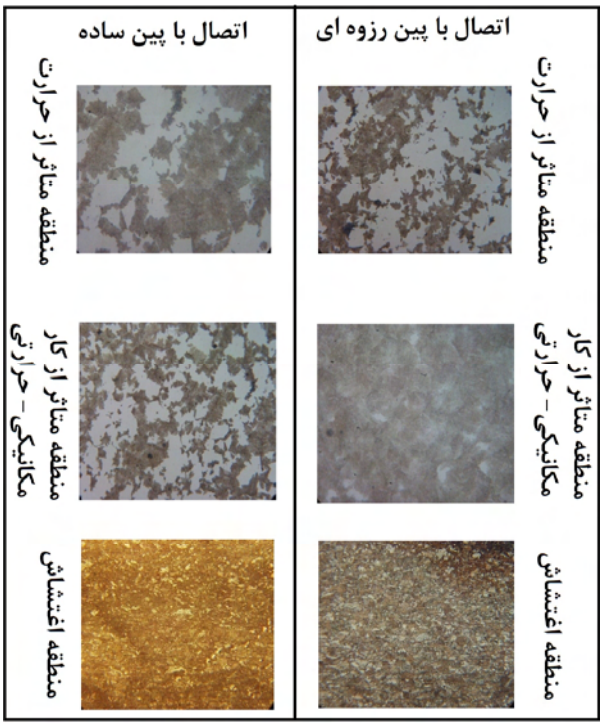


شکل۵– جریان داخلی مواد اتصالی که با پین (الف) ساده و (ب) رزوه ای جوشکاری شدند

این وضعیت درحالی است که بر اساس تحقیقات انجام شده، تولید حرارت توسط قسمت پایینی ابزار کمترین مقدار خود را در مقایسه با دیگر مناطق ابزار دارد و مواد در قسمت های پایینی اتصال بیشتر تحت نیروی مکانیکی– حرارتی قرار می گیرند. این مسایل خود تقویت کننده این نظر است که با وجود دمای کمتر در قسمت زیرین اتصال و اختلاف خواص مکانیکی و حرارتی بین مس و آلومینیوم، وجود رزوه به ایجاد نیروی اکستروژن و جریان داخلی زیرین اتصال کمک فراوانی می کند. شیارهای موجود در پین ابزار همانند خروج براده در فرایند سوراخکاری، مس خمیری شده را به قسمت های بالایی منطقه اغتشاش هدایت می کند.

3-3-بررسی ریزساختار اتصال

اندازه ریزساختار منطقه اغتشاش هرکدام از فلزات پایه تعیین کننده خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال است. در ناحیه مرکزی جوش، وجود اثرات اغتشاشی پین و حرارت ناشی از تماس شانه ابزار با سطح ورق بالایی موجب می شود تا که مواد در این ناحیه تحت تاثیر حرارت و تغییر شکل پلاستیک شدید قرار گیرند و باعث بروز تبلور مجدد و نهایتا باعث ایجاد ساختاری با دانه بندی ریزتر نسبت به سایر نقاط می شود. با این حال تغییر فشار عمودی، دما و همچنین شرایط خنک شوندگی بر اندازه دانه های فلز منطقه جوش اثرگذار است .

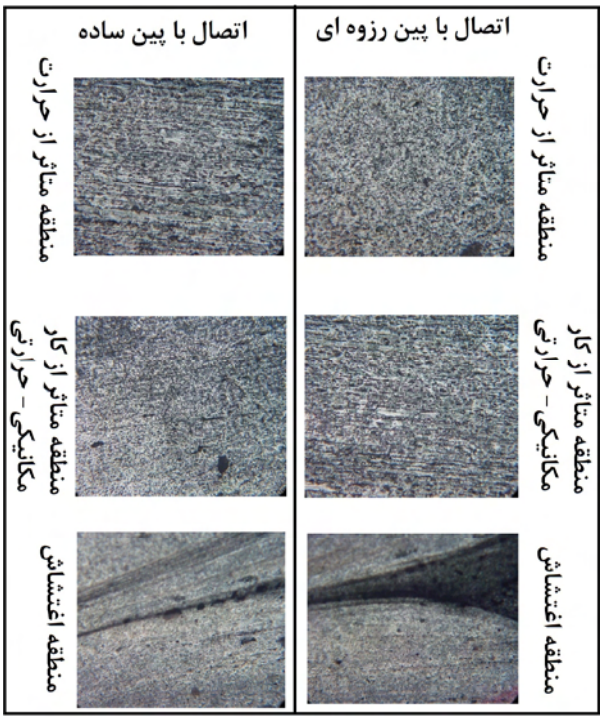


شکل۶– نواحی مختلف جوشکاری شده فلز مس

با توجه به نتایج بدست آمده از جریان داخلی مواد می توان به این نتیجه رسید که به دلیل کار مکانیکی–حرارتی بیشتر در منطقه اغتشاش، تغییرات اندازه دانه در اتصالی که با پین رزوه ای جوشکاری شده است بیشتر از پین استوانه ای ساده است. شکل(۶) و شکل(۷) به ترتیب تصویر میکروسکوپ نوری از مناطق مختلف فلز مس و آلومینیوم را با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر از اتصالاتی که با پین های مختلف جوشکاری شده‌اند، نشان می‌دهند. به دلیل وجود نداشتن تغییرات مکانیکی و حرارتی در مناطق دورتر از منطقه اغتشاش تغییرات اندازه دانه در آن قسمت ها وجود ندارد. اندازه دانه بندی فلز پایه مس ۱۵ میکرومتر بود و اندازه دانه بندی فلز پایه آلومینیوم

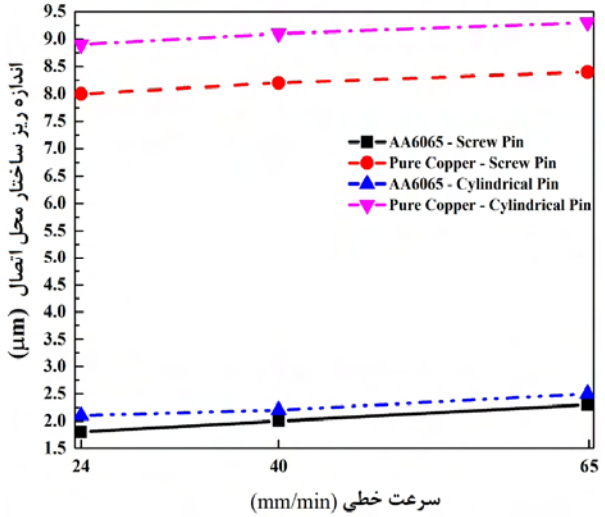
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

۶۰۶۵ که در شکل(۷) داده شده است، ۶ میکرومتر بود. در منطقه اغتشاش، مواد پایه یک سیکل حرارت را همزمان با تغییرشکل پلاستیک تجربه می کند. بر همین اساس، ساختار این ناحیه با فلز پایه متفاوت می باشد. اندازه دانه در این مناطق با توجه به میزان حرارت ورودی و کار مکانیکی در حین فرآیند جوشکاری تغییر می کند. اندازه دانه فلز مس و آلومینیوم در منطقه اغتشاش که توسط ابزار با پین استوانه ای جوشکاری شدند به ترتیب ۸/۹ و ۲/۱ میکرومتر برای فلزات مس و آلومینیوم ۶۰۶۵ بود. به دلیل اغتشاش و کار مکانیکی بیشتر پین رزوه ای، اندازه ریزساختاری اتصالی که با پین رزوه ای جوشکاری شدند به ترتیب ۸ و ۱/۸ میکرومتر برای فلزات مس و آلومینیوم ۶۰۶۵ بود که در شکل های(۶و۷) به نمایش گذاشته شده است .



شکل۷-نواحی مختلف جوشکاری شده فلز آلومینیوم ۶۰۶۵

شکل(۸) تغییرات اندازه‌ریزساختارمحل اتصال را در سرعت‌های خطی مختلف نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان دادکه‌با افزایش سرعت خطی و بیشتر شدن نرخ خنک شوندگی محل اتصال، اندازه ریزساختار هر دو فلز پایه افزایش می‌یابد. این‌روندبرای هردوابزار استوانه‌ای‌ورزوه‌ای‌صادق است.



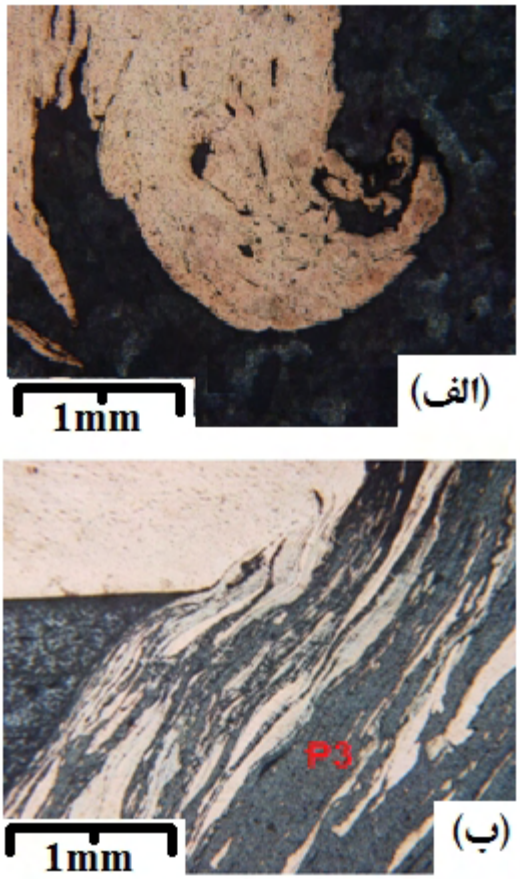
شکل۸- مقایسه تغییرات اندازه دانه فلزات پایه در محل اتصال با استفاده از ابزار ساده و رزوه ای

3-4-شکل گیری ساختارهای لایه ای و ترکیبات بین فلزی

سیکل های حرارتی همراه با کار مکانیکی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سبب میشوند تا مواد در هم تنیده شوند و مخلوط شدن دو فلز غیرهمجنس شکل بگیرد [۲۳]. بررسی مرز بین فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس که پیش تر نشان داده شده بود، حاکی از کشیدگی فلز مس به درون بستر آلومینیومی بود که منطقه اغتشاش را شکل می داد. در هم فرورفتگی مواد در مقیاس کوچک سبب شکل گیری انواع لایه‌های بین فلزی و ترکیبات لایه ای در اطراف منطقه اغتشاش می شود [۲۹]. شکل(۹) نمونه هایی از ساختار لایه ای شکل گرفته در مرز دو فلز پایه را نشان می دهد که در جوشکاری با پین استوانه ای شکل گرفته است. فلز مس در شکل(۹) صورتی رنگ دیده می‌شود و فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ به رنگ تیره به تصویر در آمده است. اصولا این لایه ها به دلیل کار مکانیکی زیاد و حرارت کم شکل می گیرند [۳۰]. کار مکانیکی ابزار سبب می شود تا لایه های رشته ای شکل دو فلز، درهم فرو روند و ساختار کامپوزیتی شکل گیرد. همانطور که پیشتر اشاره شد، ساختارهای لایه ای به شدت به نرخ حرارت ورودی و نرخ خنک شوندگی به منطقه اتصال حساس هستند. وجود رزوه بر روی پین ابزار، کار مکانیکی و حرارتی وارد بر مرز اتصال بیشتر می شود. به دنبال این تغییرات مقدار

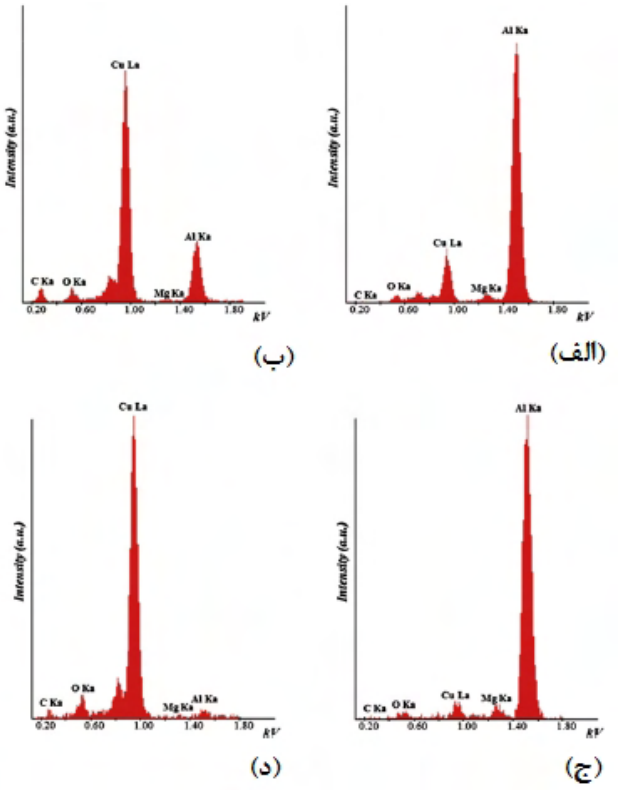
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-31]

بیشتری از فلز مس تحت تغییر شکل قرار می گیرد. این پدیده سبب می‌شود تا تولید ساختارهای لایه ای در مرز اتصال افزایش یابد. از لحاظ متالورژیکی، این ساختارها محل مناسبی برای تولید لایه های بین فلزی هستند و با کنترل ضخامت لایه‌های بین فلزی میتوان استحکام اتصال را افزایش داد [۳۰]



شکل ۹- ساختار لایه ای شکل گرفته با ابزار (الف) رزوه ای و (ب) ساده

با مقایسه نتایج می توان مشاهده کرد که در اتصال بین آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس با ابزار با پین رزوه ای، ساختار متراکم و کلوخه‌ای که با ابزار ساده به وجود آمده است، به حالت منظم و کشیده تبدیل می شود. این پدیده حاصل تاثیر همزمان حرارت و جریان مواد است که سبب می‌شود تا رگه های فلز مس، از قسمت پایینی اتصال به صورت منظم به نواحی بالایی منطقه اغتشاش کشیده شوند به علت محدود بودن عناصر آلیاژی موجود در فلز پایه مس، مقدار عناصر متفاوت غیر مس در قسمت زیرین اتصال، بسیار کمتر از قسمت های بالایی اتصال است. باتوجه به وجود عناصر آلیاژی در فلز پایه آلومینیومی و ورود فلز مس از قسمت زیرین اتصال به دورن منطقه اغتشاش، درصد وزنی عنصر منیزیم و مس در سمت بالایی منطقه اغتشاش بیشتر از دیگر مناطق اتصال بود. بالابودن درصد عناصر مذکور در منطقه اغتشاش به دلیل این است که این عناصر، اجزای اصلی تشکیل دهنده آلومینیوم ۶۰۶۵ هستند و از طرف دیگر مقداری فلز مس از قسمت پایینی منطقه اغتشاش به قسمت های بالایی آن نفوذ کرده بود .

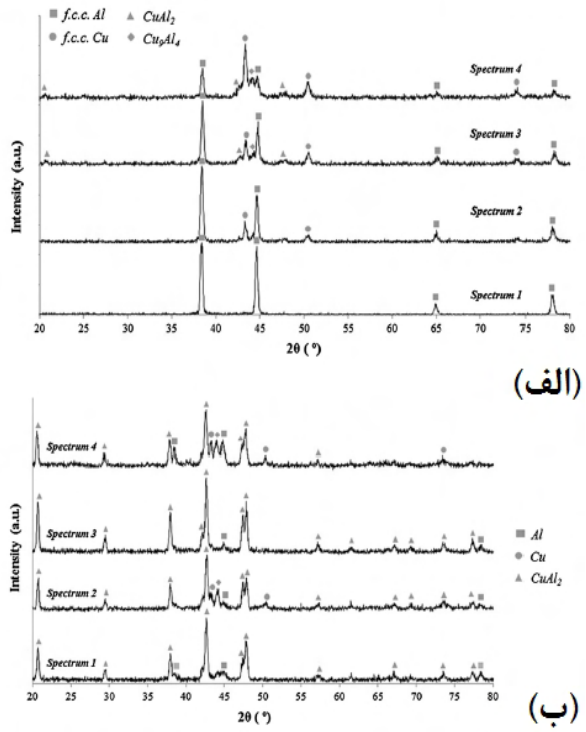


شکل ۱۰- نمونه آنالیز EDS از نقاط ساختارهای لایه ای که با ابزار (الف) و (ب) ساده و (ج) و (د) رزوه ای جوشکاری شده اند

همانطور که پیشتر توضیح داده شده بود، با استفاده از ابزار رزوه ای ورود فلز مس به دورن منطقه اغتشاش بیشتر می شود و ساختار لایه ای متراکم و منسجم تری در مرز بین دو فلز شکل می گیرد. نمونه ای از آنالیز عنصری محل اتصال شکل گرفته با ابزار ساده و رزوه ای در شکل(۱۰) نشان داده شده است. نتایج حاصل از آنالیز نشان داد که با استفاده از ابزار رزوه‌ای، مقدار درصد عنصر مس به اندازه ۸ درصد در منطقه اتصال افزایش یافته است. به دلیل زیاد بودن درصد وزنی عنصر مس و آلومینیوم در محل اغتشاش و نیز چرخه کار

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

مکانیکی تولید شده زیاد در خط اتصال، احتمال تولید ترکیبات بین فلزی در مرز اتصال بالا می رود. از طرف دیگر، به دلیل وجود حرارت اصطکاکی زیاد در منطقه اغتشاش اتصال بین فلز مس و آلومینیوم ۶۰۶۵، تشکیل فازهای AlxCuy بدیهی به نظر می رسد. به طور کلی ضرایب x و y در ساختار بین فلزی اتصالاتی که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد می شوند، باتوجه به تغییرات درصد عناصر موجود و مقدار حرارت در مرز اتصال تعیین می شوند [۲۴].

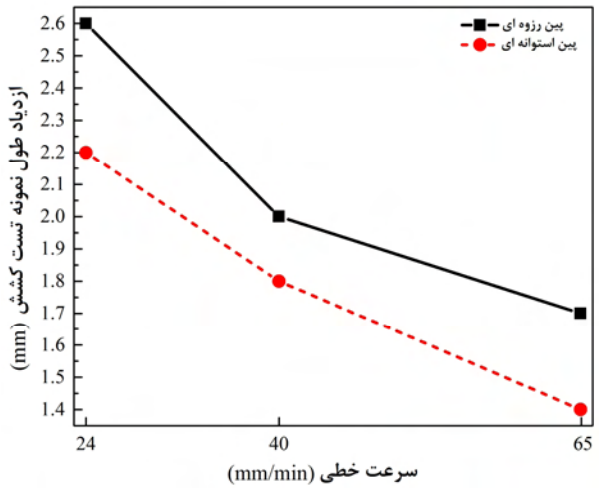


شکل۱۱– نمونه آنالیز پراش پرتو ایکس از منطقه اغتشاش که با ابزار (الف) ساده و (ب) رزوه ای جوشکاری شده اند

نتایج حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس محل اتصال فلز مس و آلومینیوم ۶۰۶۵ در شکل(۱۱) نشان داده شده است. این نتایج حاکی از تولید ساختارهای بین فلزی $CuAl_2$ و Cu_9Al_4 است که در منطقه اغتشاش فلز مس و آلومینیوم ۶۰۶۵، با ابزار رزوه ای تولید شده است. با استفاده از ابزار ساده، جریان اغتشاشی داخلی کمتر می‌شود و احتمال شکل گیری این ترکیبات را کاهش می‌یابد. به طوری که نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس از محل اتصالی که با ابزار ساده تولید شده بود، شکل گیری تنها فاز $CuAl_2$ را در محل اتصال نشان می داد.

3-5- بررسی استحکام کششی اتصال

یکی از مهم ترین تست ها، در بررسی استحکام اتصالات جوشکاری شده آزمون کشش می باشد. شکل(۱۲) نتایج حاصل از ازدیاد طول در تست کشش نمونه های جوشکاری‌شده را در این پژوهش نشان می دهد .

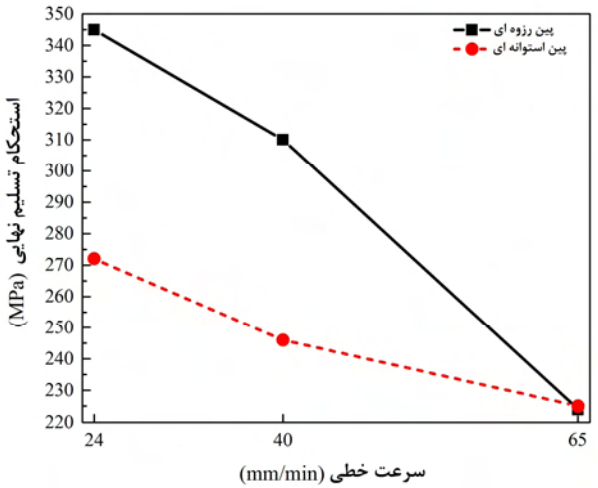


شکل۱۲– مقایسه ازدیاد طول محل اتصال با استفاده از ابزار ساده و رزوه ای

نتایج حاصل نشان داد که در سرعت خطی ۲۴ میلیمتر در دقیقه، بیشترین ازدیاد طول در نمونه های طولی و عرضی تست کشش شکل گرفته است و کمترین ازدیاد طول مربوط به سرعت خطی ۶۵ میلیمتر در دقیقه می باشد. با توجه به نتایج حاصل از تست کشش، می توان به این نتیجه رسید که اتصالاتی که با پین رزوه ای شکل گرفته اند، دارای ازدیاد طول بیشتری نسبت به اتصالاتی که با پین استوانه ای جوش شدند، هستند. براساس نتایج حاصل از تست کشش، ازدیاد طول نمونه هایی که با پین رزوه ای و سرعت خطی ۲۴، ۴۰ و ۶۵ میلیمتر بر دقیقه شکل گرفته اند، به ترتیب ۲/۶، ۲ و ۱/۷ میلیمتر بود. از طرف دیگر نمونه هایی که با پین استوانه ای و سرعت خطی ۲۴، ۴۰ و ۶۵ میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شدند، به ترتیب ۲/۲، ۱/۸ و ۱/۴ میلیمتر ازدیاد طول داشتند. شکل(۱۳) نتایج حاصل از استحکام کششی در تست کشش نمونه های جوشکاری شده را نشان می دهد. بر اساس نتایج بدست آمده استحکام تسلیم نمونه ای که در سرعت خطی

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

۲۴ میلیمتر در دقیقه و با پین رزوه ای جوشکاری شده بود، بیشترین مقدار را داشت. براساس نتایج حاصل از تست کشش، ازدیاد طول نمونه هایی که با پین رزوه ای و سرعت خطی ۲۴، ۴۰ و ۶۵ میلیمتر بر دقیقه شکل گرفته اند، به ترتیب دارای ۳۴۵، ۳۱۰ و ۲۲۴ مگاپاسکال استحکام تسلیم بودند. استحکام تسلیم نمونه هایی که با پین استوانه ای و سرعت خطی ۲۴، ۴۰ و ۶۵ میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شدند، به ترتیب ۲۷۲، ۲۴۶ و ۲۲۵ مگاپاسکال اندازه گیری شد.



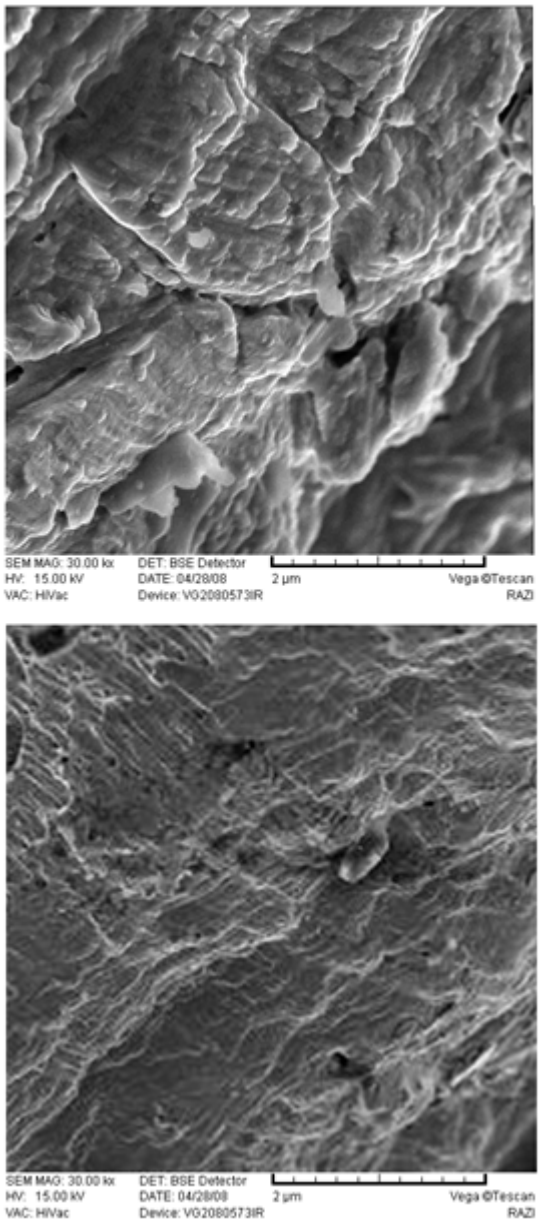
شکل۱۳- مقایسه استحکام محل اتصال با استفاده از ابزار ساده و رزوه ای

شکل(۱۴) تصویر مقطع شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی در مرز اتصال بین دو فلز را نشان می دهد که پس از آزمون کشش تصویر برداری شده است. بر اساس نتایج حاصل می‌توان دریافت که شکست ترد در هر دو اتصال (پین ساده و رزوه ای) رخ داده است.

3-6- بررسی میکرو سختی اتصال

آزمایش میکروسختی ویکرز بر روی نمونه هایی که در هر دو ابزار جوش سالمی را به وجود آورده‌اند بصورت عرضی از محل اتصال انجام شد و نتایج حاصل در شکل(۱۵) نشان داده شده است.

همانطور که در شکل مشخص است هر چه به مرکز اتصال نزدیک می شویم سختی افزایش می‌یابد علت این مسئله ناشی

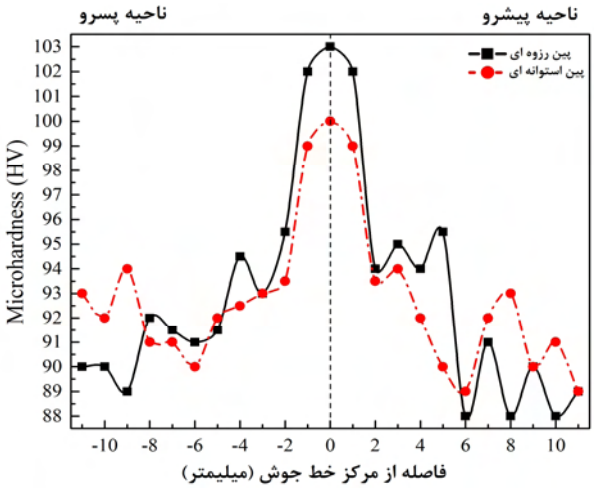


شکل۱۴- تصویر سطع مقطع شکست اتصال پس ا ز آزمون کشش که با استفاده از ابزار (الف) ساده و (ب) رزوه ای جوشکاری شدند

از تغییر شکل پلاستیک در منطقه اغتشاش است که سبب ریزدانه شدن فلزات پایه در محل اتصال می‌شود. باتوجه به نتایج، می‌توان دریافت که سختی اتصالی که با ابزار رزوه ای جوشکاری شده است، بیشتر از اتصالی است که ابزار استوانه ای جوشکاری شده بود. همانطور که پیشتر اشاره شد، حجم موادی که توسط ابزار رزوه ای به گردش در می آید تا یک اتصال مناسب و جوش بدون عیبی را به وجود آورند بیشتر از ابزار استوانه ای است. درواقع اغتشاش و کار مکانیکی

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

بیشتر ابزار رزوه ای باعث ریزتر شدن دانه ها و درنهایت سبب بالاتر رفتن سختی محل اتصال شده است .



شکل۱۵– مقایسه تغییر مقدار سختی محل اتصال در حالت های مختلف جوشکاری

به دلیل جهت چرخش ابزار، مواد جابجا شده از سمت پسرو نسبت به پیشرو کمی بیشتر بود، در نتیجه حرارت در سمت پسرو بیشتر تولید می شود، سختی این قسمت نیز کمی بالا می‌رود، در نمودار بصورت پله ای شکل می گیرد. براساس نتایج بدست آمده سختی منطقه اغتشاش در اتصالی که با ابزار رزوه ای تولید شد به ۱۰۳ ویکرز رسید و سختی منطقه اغتشاش در اتصالی که با ابزار استوانه ای تولید شد به ۱۰۰ ویکرز رسید. با افزایش سرعت خطی، سختی محل اغتشاش اتصالاتی که با ابزار رزوه ای و سرعت خطی ۴۰ و ۶۵ میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شده اند به ترتیب ۱۰۵ و ۱۰۹ ویکرز رسید. سختی محل اغتشاش اتصالاتی که با ابزار رزوه ای و سرعت خطی ۴۰ و ۶۵ میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شده اند به ترتیب ۱۰۲ و ۱۰۴ ویکرز اندازه گیری شد .

4- نتیجه گیری

در این تحقیق اتصال غیرهمجنس فلز مس و آلومینیوم ۶۰۶۵ با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با موفقیت انجام شد. نتایج حاصل از تاثیر هندسه پین ابزار فرآیند بر روی خواص مکانیکی و متالورژیکی این اتصال در زیر ارائه می شوند:

– باتوجه به ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق، اغتشاش مواد خمیری و جریان مواد درونی اتصال که با پین ابزار رزوه‌ای انجام شده بود، نسبت به ابزار استوانه ای شکل مناسب تری به خود گرفت، ولی جریان سطحی اتصالات به دلیل یکسان بودن شکل شانه ابزار در هر دو اتصال یکسان بود.

– بررسی ساختار کریستالی محل اتصال نشان داد که اندازه ریزساختار اتصالی که توسط پین رزوه ای تولید شده است، کوچکتر از اندازه ریزساختار اتصالی که توسط پین استوانه ای تولید شده است. به دلیل قرارگیری فلز مس در قسمت پایین قید و بند جوشکاری، تغییرات مکانیکی و حرارتی آن کمتر از فلز پایه آلومینیوم ۶۰۶۵ بود .

– در میان اتصالاتی که انجام شده در این پژوهش، بیشترین ازدیاد طول نمونه تست کشش که در حدود ۲/۶ میلیمتر بود، به اتصالی که با ابزار رزوه ای در سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شده بود، تعلق داشت. این اتصال مستحکم‌ترین اتصال تولید شده در این پژوهش بود که حدود ۳۵۰ مگاپاسکال بود. این مقدار، بیشتر از استحکام تسلیم فلز پایه آلومینیومی بود. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش سرعت خطی و بزرگتر شدن اندازه ریزساختار محل اتصال، استحکام اتصالات جوشکاری شده کاهش می یابد.

–سختی محل اتصالی که با ابزار رزوه ای تولید شده بود بیشتر از ابزار استوانه ای بود. بیشینه سختی محل اتصال مربوط به ابزار رزوه ای با سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه بود که در حدود ۱۰۳ ویکرز سختی داشت و سختی محل اتصال ابزار استوانه ای با همین سرعت خطی حدود ۱۰۰ ویکرز بود. با افزایش سرعت خطی، نرخ خنک شوندگی و بزرگتر شدن ریزساختار محل اتصال، سختی منطقه اغتشاش در هر دو مدل از ابزار افزایش پیدا کرد.

منابع

۱– فتوحی ح، " اصلاح ریزساختار مقاطع جوش آلیاژ آلومینیوم T6-7075 ایجاد شده به روش جوشکاری قوسی تنگستن–گاز توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی"، پایان نامه

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

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۲.

۲- بهرامی الف، " ارزیابی ریزساختار و رفتار تریبولوژیکی نانو کامپوزیت سطحی آلومینیوم - نیکل ایجاد شده بر سطح آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ با استفاده از فرایند اصطکاکی – اغتشاشی" ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۴.

3-Mathers, G., "The Welding of Aluminum and Its Alloys", 1st Edition, Woodhead Publishing, Cambridge England, 2002.

۴- رفیعی ر؛ " اتصال غیرمشابه آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۵۰۵۲ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و ارزیابی خواص اتصال" ، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۱.

5- Song Y., Ynng X., Cui L., "Defect features and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar AA2024–AA7075 aluminum alloy sheets", Materials and Design, 2014, Vol.55, pp.9-18.

6- Mishra, R.S., JR., "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering: R: Reports, 2005, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78.

7- Aydın H., Bayram A., Durgun I., "The effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2024-T4 friction stir-welded joints" , Materials and Design, 2010, Vol.31, pp.2568–2577.

8- Zhili H., Shijin Y., Xiaosong W., "Effect of post-weld heat treatment on the microstructure and plastic deformation behavior of friction stir welded 2024", Materials and Design, 2011,Vol.32 , pp.5050-5050.

9- Bayazid S.M., Farhangi H., Asgharzadeh H., "Effect of cyclic solution treatment on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075 Al alloy", Materials Science & Engineering A, 2016, Vol.649, pp.293-300.

10- ASTM E8-04, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASM International, 2007.

11- Fuller C., Mahoney M., Calabrese M., "Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al friction stir welds", Materials Science and Engineering A, Vol.527, pp.2233–2240, 2010.

12- Mishra, R.S., JR., "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering: R: Reports, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.

13- Charit I, Mishra RS, "Abnormal grain growth in friction stir processed alloys", Scripta Materialia, Vol.58, pp.367–71, 2008.

14- Viana F., Pinto A.M., Santos H.M, "Retrogression and re-ageing of 7075 aluminium alloy: microstructural characterization", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 92-93, pp.54-59, 1999.

15- Genevois C., Deschamps A., Denquin A., "Quantitative investigation of precipitation and mechanical behavior for AA2024 friction stir welds", Acta Materialia, Vol.53, pp.2447–2458, 2005.

16- M. W. MahoneyC. G. RhodesJ. G. FlintoffW. H. Bingel, "Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.29, pp.1955–1964, 1998.

17- Attallah MM, Salem HG., "Friction stir welding parameters: a tool for controlling abnormal grain growth during subsequent heat treatment", Materials Science and Engineering A, Vol.391, pp.51–9, 2005.

18- Srivatsan TS, Vasudevan S, Park L., "The tensile deformation and fracture behavior of friction stir welded aluminum alloy 2024", Materials Science and Engineering A, Vol.466, pp.235–45, 2007.

[19] Aydın H, Bayram A, Uguz A, Akay SK., "Tensile properties of friction stir welded joints of 2024

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