

## بررسی ریزساختار، سختی و لایه های بین فلزی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس

رحیم نریمانی<sup>۱</sup>، مجید الیاسی<sup>۲\*</sup>، مرتضی حسین زاده<sup>۳</sup>، حامد آقاجانی درازکلا<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، مازندران، ایران

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

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد، آمل، مازندران، ایران

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

\*عهده دار مکاتبات: elyasi@nit.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۲۷)

**چکیده:** در این پژوهش، تغییرات متالورژیکی اتصال لب روی هم غیر همجنس فلز مس و آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۵ با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی خواص متالورژیکی اتصال از میکروسکوپ نوری، آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD)، پراش انرژی اشعه ایکس (EDS) و آزمون ریزسختی سنچ ویکرز استفاده شد. نتایج حاصل از بررسی ها نشان داد به دلیل تماس مستقیم آلومینیوم با شانه ابزار، تغییرات اندازه ریز ساختار فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ نسبت به فلز مس بیشتر بود. با افزایش سرعت دورانی ابزار و بیشتر شدن گرمای حاصل از اصطکاک، اندازه ریزساختار هر دو فلز پایه آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس کوچکتر شد و با افزایش سرعت خطی، و افزایش نرخ خنک شوندگی محل اتصال اندازه آنها بزرگتر شد. نتایج حاصل نشان داد که در منطقه اغتشاش، ساختارهای لایه ای در مرز دو فلز شکل گرفت که با افزایش دمای ورودی به محل اتصال ابعاد ساختارهای لایه ای شکل گرفته نازکتر و طول آنها طویل تر می شود. امتزاج بین دو فلز پایه در سرعت دورانی بالا و سرعت خطی پایین ابزار سبب شد تا ترکیبات بین فلزی  $\text{Cu}_3\text{Al}_2$  و  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  در مرز بین دو فلز شکل بگیرد. به دلیل تغییرات ریزساختاری محل اتصال و نیز شکل گیری لایه های بین فلزی، سختی محل اتصال از قسمت های دیگر اتصال بیشتر بود. بیشترین سختی محل اتصال بر اساس ریزسختی ویکرز ۱۱۱ بود که در سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه تولید شد.

### واژه های کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، اتصال غیر همجنس، خواص متالورژیکی، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۵، مس.

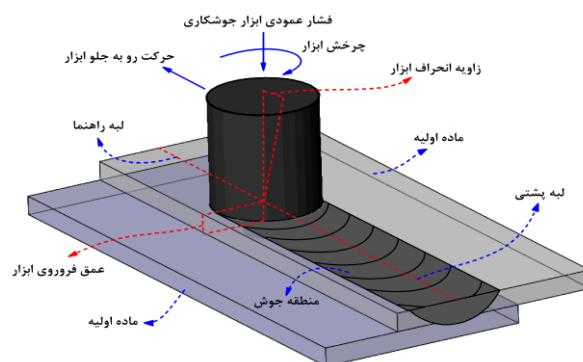
### ۱- مقدمه

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 [۴]. این تغییر گسترده در خواص مواد و شکل گیری ساختارهای بین فلزی

اتصال فلزات غیر همجنس 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 [۳-۱]. تولید اتصالات نامتجانس با روش های متداول جوشکاری

امروزه در رابطه با این فرآیند مطالعات زیادی در حال انجام است که شامل بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر خواص ناحیه اتصال می‌باشد. در مورد اتصال فلزات غیرهمجنس به خصوص اتصال آلومینیوم به فلزات دیگر از جمله مس، مطالعاتی انجام شده است [۱۲]. 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 [۱۳]. آنها نشان دادند که ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) در سمت مس دارای دانه های درشت تر نسبت به ناحیه فلز پایه (BM) مس است و همچنین ناحیه متأثر شده ترمومکانیکی (TMAZ) دانه هایی کشیده و خشن دارد. در ناحیه اختلاطی دو فلز می توان ریز شدن دانه ها را مشاهده کرد که این پدیده بر اثر اغتشاش در این ناحیه رخ داده است. بارکتاین و همکارانش [۱۴] بر روی همین اتصال کار کردند. آنها اعلام کردند که عملیات حرارتی کمک به افزایش استحکام اتصال می نماید. با توجه به نتایج کار آنها بعد از عملیات حرارتی، محل شکست اتصال آلیاژ آلومینیوم ۱۰۵۰ به مس از منطقه اغتشاش به فلز پایه آلومینیومی انتقال پیدا کرد. شیایو و همکارانش [۱۵] 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 بین فلزی با افزایش ضخامت افزایش یافته و با کاهش ضخامت کاهش می‌یابد. آنها اعلام کردند که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی 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 یافته و ضخامت این لایه ها به حداقل ممکن می‌رسند. اکینلابی و همکارانش [۱۶] با تغییر در قطر شانه ابزار، سرعت دورانی و سزعت خطی ابزار، به کنترل حرارت ورودی به منطقه اتصال پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با کنترل پارامترهای ابزار می‌توان استحکام و سختی اتصال را کنترل کرد. لیو و

سب تردی و شکنندگی ناحیه جوش و کاهش استحکام اتصالات غیر همجنس می‌شود [۷-۵]. جوشکاری حالت جامد تکنیک مناسبی برای اتصال اینگونه فلزات است زیرا که در این تکنیک، فرآیند اتصال در زیر دمای ذوب دو فلز صورت می‌گیرد 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 می‌آید. در این روشها ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) که منشاء بسیاری از عیوب است و از دلایل عمده کاهش خواص مکانیکی می باشد، 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 برای نخستین بار بر روی آلیاژ آلومینیوم آزمایش شد [۸]. فرآیند اتصال، در این روش در اثر اصطکاک بین قطعه کار و یک ابزار مصرف نشدنی مقاوم در برابر سایش و حرارت حاصل می‌شود [۹]. فرآیند با بستن ورق‌های فلزی روی صفحه‌ای که صفحه پشتی نامیده می‌شود آغاز می‌گردد، 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 کرده و پس از گرم شدن قطعه کار در امتداد فصول مشترک پیشروی می‌کند [۱۱-۱۰]. شماتیکی از این فرآیند در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): شماتیکی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

در میان آلیاژهای آلومینیومی، 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 و بخاری و آبگرمکن و در صنعت گاز در وسایل گاز سوز و در خطوط انتقال نیرو و برق و دیگر صنایع مورد استفاده قرار گیرد. بر همین اساس در این مقاله به بررسی تغییرات ریزساختار، سختی و شکل گیری لایه های بین فلزی در محل اتصال اصطکاکی اغتشاشی دو فلز غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۵ به مس خالص پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

### ۲-۱- رویه آزمایش

در این تحقیق ورق های ۳ میلیمتری آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس خالص توسط یک ماشین فرز معمولی بهم جوش داده شدند. خواص شیمیایی و مکانیکی فلزات مورد استفاده در این تحقیق در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است.

قبل از قرارگیری ورق ها در درون قید و بند جوشکاری، سطح تماس دو ورق با سمباده صاف و اکسید زدائی شد. فرآیند 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 ای 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. 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 (۲) نشان داده شده است.

همکارانش [۱۷] 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 [۱۸] 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 توضیح ترکیبات بین فلزی شکننده دارد. ژو و همکارانش [۱۹] 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 [۲۰] نیز ارائه شد. سعیدا و همکارانش [۲۱] به جوش پذیری آلومینیوم خالص و مس به روش به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در جوشکاری این مواد معمولاً 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 میگیرند عبارت اند از  $Cu_9Al_4$  و  $CuAl$ ،  $CuAl_2$ ، که به دلیل ماهیت شکننده ی آنها استحکام اتصال را پایین می آورند. تان و همکارانش [۲۲] و زو و همکارانش [۲۳-۲۴] در پژوهش هایی مشابه، اعلام کردند که ساختار ترکیبات بین فلزی تأثیر قابل توجهی در خواص 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 می کند، 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.

سمباده، سمباده زده شدند. عملیات سمباده کاری از سمباده دانه درشت با شماره‌ی ۱۰۰ شروع و با سمباده‌ی دانه ریز شماره‌ی ۵۰۰۰ پایان یافت. نمونه‌های سمباده کاری شده به وسیله‌ی محلول آب و  $Al_2O_3$  پولیش کاری شدند. جهت مشاهده ریز ساختار محل اتصال و به علت تفاوت ساختار کریستالی دو فلز دو محلول اچ جداگانه برای هر یک از فلزات پایه آماده‌سازی شد. تعیین اندازه دانه بندی ریزساختار اتصال مطابق با استاندارد ASTM E112-96 انجام گرفت. جهت بررسی ساختار و لایه های بین فلزی در منطقه جوش و در فصل مشترک دو فلز از آنالیز XRD استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی محل اتصال

شکل (۳) تصویر سطح اتصال جوشکاری شده بین دو فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس را که در سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شده است، نشان می‌دهد. سطح اتصال دارای اندکی تعقر و نیز مقداری فلش در اطراف محل اتصال است که حاصل انحراف شانه‌ی ابزار نسبت به بردار نرمال ورق‌ها می‌باشد.



شکل (۳): جریان سطحی اتصالی که در سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شد

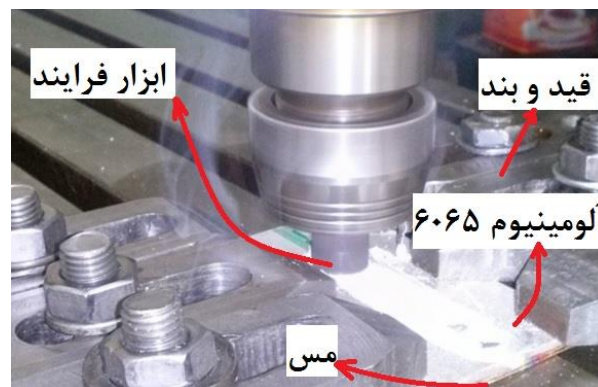
در بررسی مقطع عرضی اتصال توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی کم، مشاهده شد که محل اتصال دارای چهار ناحیه‌ی مختلف است شامل منطقه اغتشاش (SZ)، ناحیه متأثر از حرارت

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فلزات پایه بر حسب درصد وزنی [۲۵-۲۶]

آلومینیوم ۶۰۶۵						
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Al
0.2	0.4	2.0	0.3	1.5	0.2	95.4
مس						
Pb	Cu	Mn	Sn	Ni	Mo	
0.01	99.9	0.011	0.02	0.003	0.009	

جدول (۲): خواص مکانیکی فلزات پایه [۲۵-۲۶]

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

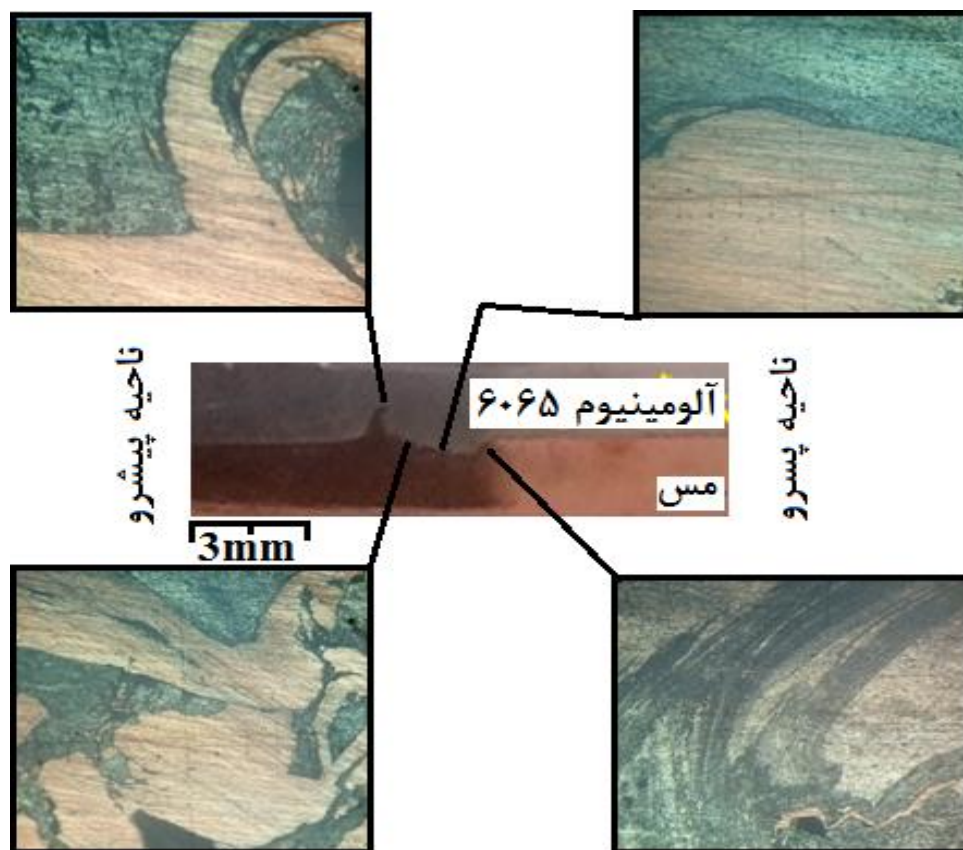


شکل (۲): نحوه‌ی قرار گیری ورق‌ها در هنگام جوشکاری

جهت دوران ابزار خلاف جهت گردش عقربه‌های ساعت بود و محور ابزار ۳ درجه انحراف نسبت به بردار نرمال صفحات داشت. ابزار فرایند دارای سرعت دورانی ۶۹۰ و ۱۱۳۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۲۴، ۴۰ و ۶۵ میلیمتر بر دقیقه بود. مطالعات متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری (OM) ساخت شرکت VERSAMET و جهت بررسی تغییرات متالورژیکی محل اتصال از آنالیزهای EDS توسط میکروسکوپ الکترون روبشی مدل VEGA/TESCAN-XMU ساخت روسیه انجام گرفت. نمونه‌های بریده شده از محل اتصال به روش مانت سرد آماده‌سازی شدند. سطح نمونه‌های مانت شده توسط دستگاه

ناحیه پیشرو ایجاد می شود [۳]. این پدیده سبب می شود تا ابعاد منطقه اغتشاش در ناحیه ی پسرو کوچکتر از قسمت پسرو باشد. علت این موضوع به دلیل جابجایی مرز منطقه اغتشاش و ناحیه ی TMAZ است که در اثر چرخش ابزار در جهت خلاف عقربه های ساعت رخ می دهد [۱]. تصاویر بزرگنمایی شده از نواحی مختلف منطقه اغتشاش که در شکل (۴) مشاهده می شود، حاکی از درهم فرو رفتگی دو فلز در منطقه اغتشاش است. در مرز بین دو ماده، در هم تنیدگی مس و آلومینیوم ساختاری مرکب پدید آورده است. در مقیاس بزرگ، شکل هندسی محل اتصال بیضوی دیده می شود.

و کار مکانیکی (TMAZ)، ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) و فلز پایه است که مشابه آن توسط محققان دیگر نیز ارائه شده بود [۸]. شکل (۴) نمای برش خورده عرضی از محل اتصال را نشان می دهد که توسط میکروسکوپ نوری گرفته شد. همان طور که در شکل مشاهده می شود، منطقه اغتشاش شکل گرفته دارای کمی عدم تقارن نسبت به ابعاد بین ابزار جوشکاری است. ابعاد منطقه اغتشاش در ناحیه ی پیشرو کمی بزرگتر از آن ناحیه ای از بین ابزار است که در قسمت پسرو قرار دارد. علت این مساله گودی حاصل از فشار مواد خمیری است که در اثر چرخش ابزار در جهت خلاف عقربه های ساعت از سمت ناحیه پسرو به سمت



شکل (۴): نمای برش خورده عرضی محل اتصال که توسط میکروسکوپ نوری تهیه شده است

فلز پایه آلومینیوم و مس است [۲۷]. شکل (۵) ریزساختار محل اتصال در دو سمت فلز پایه آلومینیومی و مس نشان می دهد که در سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴

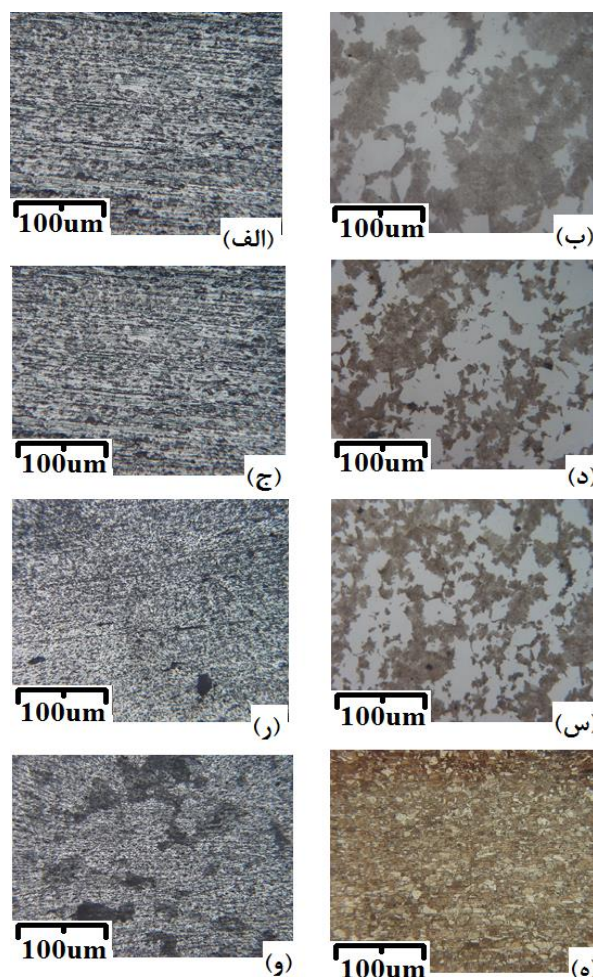
### ۲-۳- تغییرات ریزساختار محل اتصال

تغییرات ریزساختار محل اتصال، ناشی از اعمال حرارت و کار مکانیکی در حین فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی

از طرف دیگر به دلیل تولید گرمای کمتر در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نسبت به فرآیندهای جوشکاری ذوبی می-توان این انتظار را داشت که منطقه‌ی HAZ تولید شده توسط فرآیند FSW نازکتر و دارای تغییرات متالورژیکی کمتری باشد [۲۸]. تصویر بزرگنمایی شده از ریزساختار مناطق HAZ در فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس، به ترتیب در شکل‌های (۵-ج) و (۵-د) نشان داده شده است. اندازه ریز ساختار این فلزات در ناحیه HAZ به ترتیب ۱۲ و ۵ میکرومتر اندازه گیری شد. برخلاف منطقه‌ی HAZ، ناحیه‌ی TMAZ علاوه بر چرخه‌ی حرارتی، یک چرخه‌ی مکانیکی را نیز متحمل می‌شود و بر همین اساس نمی‌توان به راحتی تغییرات ساختاری این منطقه بررسی کرد [۵]. اندازه گیری دانه بندی دو فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس در این مناطق نشان داد که ریزساختار آلومینیوم و مس به ترتیب ۹ و ۳/۵ میکرومتر تبدیل شد.

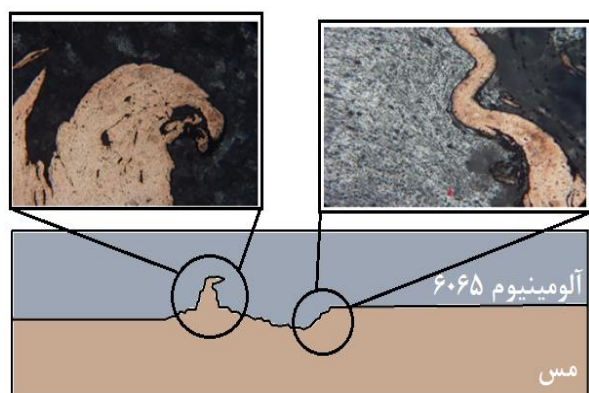
به دلیل نحوه قرارگیری فلزات پایه در قید و بند جوشکاری، آلیاژ ۶۰۶۵ آلومینیوم در ناحیه بالای اتصال و در تماس با شانه ابزار قرار داشت، چرخه مکانیکی بیشتری را متحمل شد و تغییرات ساختاری آن بیشتر از فلز مس بود که در قسمت زیرین اتصال قرار داشت. تصویر ریزساختار آلومینیوم و مس در ناحیه TMAZ به ترتیب در شکل (۵-ر) و (۵-س) نشان داده شده است. مشابه این رفتار در منطقه اغتشاش نیز مشاهده می‌شود. به دلیل تماس شانه ابزار با آلومینیوم و تحمل چرخه حرارتی-مکانیکی بیشتر این فلز در منطقه اغتشاش، ریزساختار آلیاژ ۶۰۶۵ آلومینیوم نسبت به مس بسیار کوچکتر شده است. بر اساس اندازه گیری های انجام شده ریز ساختار آلومینیوم ۶۰۶۵ در منطقه اغتشاش به اندازه ۱/۱۵ میکرو متر رسید که در شکل (۵-و) قابل مشاهده است و اندازه ریزساختار مس در منطقه اغتشاش به ۷ میکرومتر تبدیل شد که در شکل (۵-ه) قابل مشاهده است. شکل (۶) تاثیر سرعت خطی و دورانی ابزار را بر روی ریز ساختار محل اتصال را بر روی آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت خطی و حرکت سریعتر منبع حرارت از منطقه جوش، نرخ خنک‌شوندگی محل اتصال

میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شدند. در مورد ریزساختار کل اتصال، اولین ناحیه مورد بررسی در سمت ورق مسی، منطقه‌ی فلز پایه (BS) می‌باشد. این ناحیه شامل دانه‌های فلز پایه مس و آلومینیوم ۶۰۶۵ می‌باشد. اندازه دانه مس حدود ۱۵ میکرومتر و اندازه ریز ساختار آلومینیوم به اندازه ۶ میکرومتر بود. تصویر بزرگنمایی شده از ریز ساختار فلز پایه آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس، به ترتیب در شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) نشان داده شده است. بطور کلی به دلیل آنکه منطقه‌ی HAZ فولاد تحت تغییر شکل پلاستیکی قرار نمی‌گیرد به منطقه‌ی HAZ اتصالات ذوبی شبیه می‌باشد [۲۸].



شکل (۵): تصویر ریز ساختار آلومینیوم ۶۰۶۵ در قسمت: (الف): فلز پایه، (ب): فلز پایه، (ج): منطقه HAZ، (د): منطقه HAZ، (ه): منطقه TMAZ، (و): منطقه TMAZ، (ز): منطقه اغتشاش و ریز ساختار مس، و (ح): منطقه اغتشاش

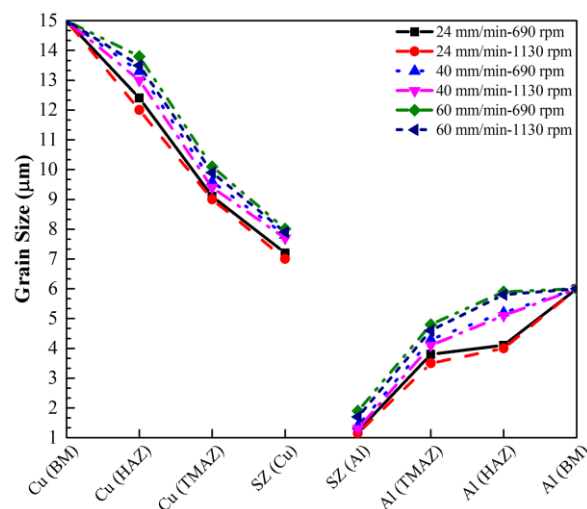
افزایش می یابد و این پدیده سبب افزایش اندازه ریزساختار محل اتصال می شود. از طرف دیگر افزایش سرعت دورانی، سبب افزایش گرمای حاصل از اصطکاک می شود و به دنبال آن اندازه ریزساختار هر دو فلز پایه در محل اتصال کاهش می یابد. نتایج حاصل از بررسی اتصالات جوشکاری شده در این پژوهش نشان داد که اندازه ریز ساختار فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ در سرعت دورانی ۶۹۰ و ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه، به ترتیب ۱/۲۲ و ۱/۱۵ میکرومتر است و اندازه ریز ساختار مس در همان پارامترها، به ترتیب ۷/۲ و ۷ میکرومتر بود. با افزایش سرعت خطی ابزار جوشکاری تا ۴۰ میلیمتر در دقیقه، اندازه ریز ساختار فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ در سرعت دورانی ۶۹۰ و ۱۱۳۰ دور در دقیقه، به ترتیب ۱/۴۱ و ۱/۳ میکرومتر شد و اندازه ریز ساختار مس در همان پارامترها به ترتیب ۷/۸ و ۷/۶ میکرومتر اندازه گیری شد. در سرعت خطی تا ۶۰ میلیمتر در دقیقه، اندازه ریز ساختار فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ در سرعت دورانی ۶۹۰ و ۱۱۳۰ دور در دقیقه، به ترتیب ۱/۷ و ۱/۹ میکرومتر بود و اندازه ریز ساختار مس در همان پارامترها به ترتیب ۸/۰۱ و ۷/۹ میکرومتر اندازه گیری شد.



شکل (۷): تصویر بزرگنمایی شده از مرز بین فلز مس و آلومینیوم ۶۰۶۵ در اتصالی که با سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر در دقیقه تولید شد

در هم فرو رفتگی مواد در مقیاس کوچک سبب شکل گیری انواع لایه های بین فلزی و ترکیبات لایه ای در اطراف منطقه اغتشاش می شود [۲۹]. شکل (۸-الف) و (۸-ب) نمونه هایی از ساختار لایه ای شکل گرفته در مرز دو فلز پایه را نشان می دهد که در سرعت دورانی ۶۹۰ و ۱۱۳۰ دور در دقیقه و در سرعت خطی ۲۴ میلیمتر در دقیقه شکل گرفته است. فلز مس در شکل (۸) صورتی رنگ دیده می شود و فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ به رنگ تیره به تصویر در آمده است. اصولاً این لایه 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. همان طور که پیشتر اشاره شد، ساختارهای لایه ای به شدت به نرخ حرارت ورودی و نرخ

افزایش می یابد و این پدیده سبب افزایش اندازه ریزساختار محل اتصال می شود. از طرف دیگر افزایش سرعت دورانی، سبب افزایش گرمای حاصل از اصطکاک می شود و به دنبال آن اندازه ریزساختار هر دو فلز پایه در محل اتصال کاهش می یابد. نتایج حاصل از بررسی اتصالات جوشکاری شده در این پژوهش نشان داد که اندازه ریز ساختار فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ در سرعت دورانی ۶۹۰ و ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه، به ترتیب ۱/۲۲ و ۱/۱۵ میکرومتر است و اندازه ریز ساختار مس در همان پارامترها، به ترتیب ۷/۲ و ۷ میکرومتر بود. با افزایش سرعت خطی ابزار جوشکاری تا ۴۰ میلیمتر در دقیقه، اندازه ریز ساختار فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ در سرعت دورانی ۶۹۰ و ۱۱۳۰ دور در دقیقه، به ترتیب ۱/۴۱ و ۱/۳ میکرومتر شد و اندازه ریز ساختار مس در همان پارامترها به ترتیب ۷/۸ و ۷/۶ میکرومتر اندازه گیری شد. در سرعت خطی تا ۶۰ میلیمتر در دقیقه، اندازه ریز ساختار فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ در سرعت دورانی ۶۹۰ و ۱۱۳۰ دور در دقیقه، به ترتیب ۱/۷ و ۱/۹ میکرومتر بود و اندازه ریز ساختار مس در همان پارامترها به ترتیب ۸/۰۱ و ۷/۹ میکرومتر اندازه گیری شد.

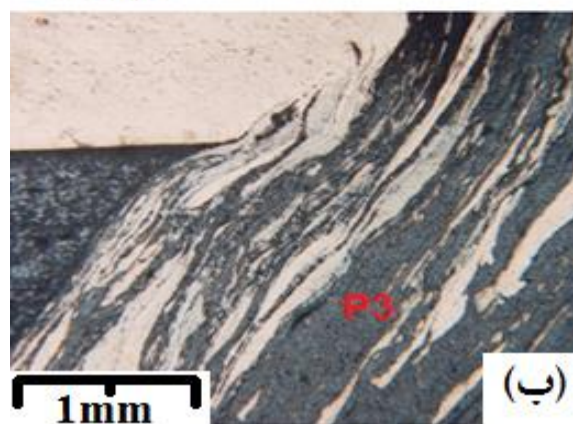
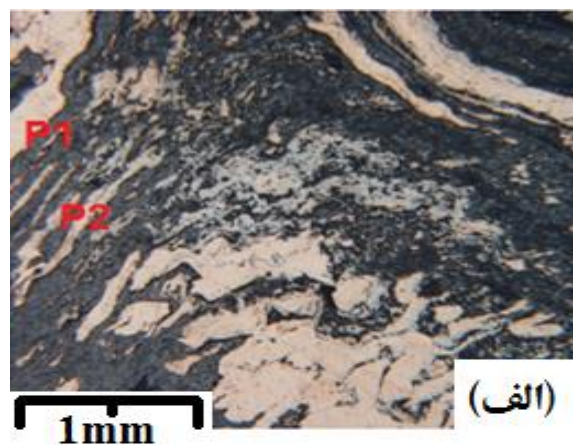


شکل (۶): اندازه ریزساختار محل اتصال در سرعت خطی و دورانی مختلف

۳-۳- شکل گیری ساختارهای لایه ای و ترکیبات بین فلزی  
سیکل های حرارتی همراه با کار مکانیکی در فرآیند جوشکاری

در اتصالات غیر همجنس نیز افزایش می‌یابد. با مقایسه شکل (۸-الف) و شکل (۸-ب) می‌توان مشاهده کرد که در اتصال بین آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس با افزایش سرعت دورانی از ۶۹۰ تا ۱۱۳۰ دور در دقیقه تراکم این لایه‌ها بیشتر می‌شود و ساختار متراکم و کلوخه‌ای که در سرعت دورانی ۶۹۰ دور در دقیقه به وجود آمده است، به حالت منظم و کشیده تبدیل می‌شود. این پدیده حاصل تاثیر همزمان حرارت و جریان مواد است که سبب می‌شود تا رگه‌های 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 قسمت‌های بالایی اتصال است. با توجه به وجود عناصر آلیاژی در فلز پایه آلومینیومی و ورود فلز مس از قسمت زیرین اتصال به درون منطقه اغتشاش، درصد وزنی عنصر منیزیم و مس در سمت بالایی منطقه اغتشاش بیشتر از دیگر مناطق اتصال بود. بالا بودن 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 قسمت‌های بالایی آن نفوذ کرده بود. همان‌طور که پیشتر توضیح داده شده بود، با افزایش سرعت دورانی ورود فلز مس به دورن منطقه اغتشاش بیشتر می‌شود و ساختار لایه‌ای متراکم و منسجم تری در مرز بین دو فلز شکل می‌گیرد. نمونه‌ای از آنالیز EDS از نقاط P1 تا P3 به ترتیب در شکل (۹) قسمت (الف)، (ب) و (ج) نشان داده شده است. نتایج حاصل از آنالیز نشان داد که با افزایش سرعت دورانی از ۶۹۰ تا ۱۱۳۰ دور در دقیقه، مقدار درصد عنصر مس به اندازه ۱۱ درصد افزایش یافته است. به دلیل زیاد بودن درصد وزنی عنصر مس و آلومینیوم در محل اغتشاش و نیز چرخه کار مکانیکی تولید شده زیاد در خط اتصال، احتمال تولید ترکیبات بین‌فلزی در مرز اتصال بالا می‌رود. از طرف دیگر، به دلیل وجود حرارت اصطکاکی زیاد در منطقه اغتشاش اتصال بین فلز مس و آلومینیوم ۶۰۶۵، تشکیل فازهای  $Al_xCu_y$  بدیهی به نظر می‌رسد.

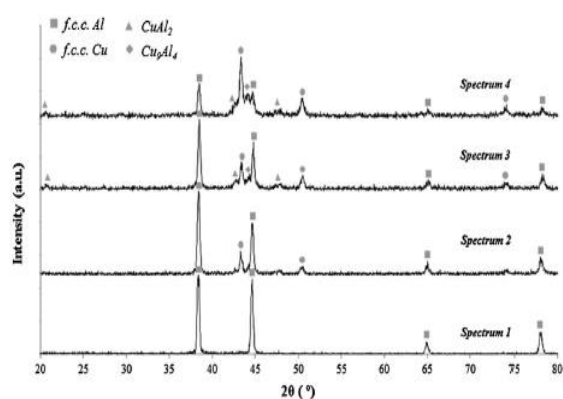
خنک شوندگی به منطقه اتصال حساس هستند. با افزایش سرعت دورانی کار مکانیکی و حرارتی وارد بر مرز اتصال بیشتر می‌شود.



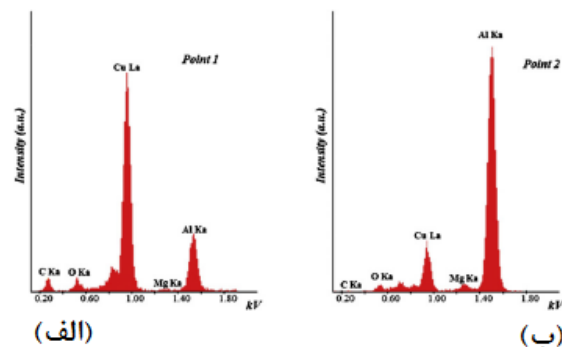
شکل (۸): ساختار لایه‌ای شکل گرفته در سرعت دورانی: (الف): ۶۹۰ و (ب): ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلی‌متر در دقیقه

به دنبال این تغییرات مقدار بیشتری از فلز مس تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد. این پدیده سبب می‌شود تا تولید ساختارهای لایه‌ای در مرز اتصال افزایش یابد. از طرف دیگر با افزایش سرعت خطی ابزار، نرخ خنک شوندگی منطقه اتصال بیشتر می‌شود. این رخداد نیز سبب می‌شود تا حرارت حاصل از اصطکاک به خوبی نتواند دوفلز را به حالت خمیری درآورد. در این وضعیت احتمال شکل‌گیری عیوب و ترک‌های ریز در فصل مشترک بین دو فلز مس و آلومینیوم ۶۰۶۵ افزایش می‌یابد. از لحاظ متالورژیکی، این ساختارها محل مناسبی برای تولید لایه‌های بین‌فلزی هستند [۳۰]. با افزایش سرعت دورانی ابزار تراکم و مقدار این ساختارها



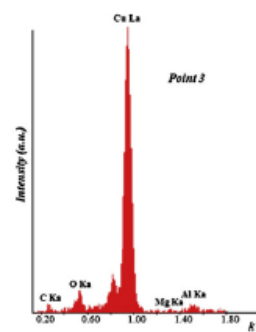


شکل (۱۰): نمونه آنالیز XRD از منطقه اغتشاش



(الف)

(ب)

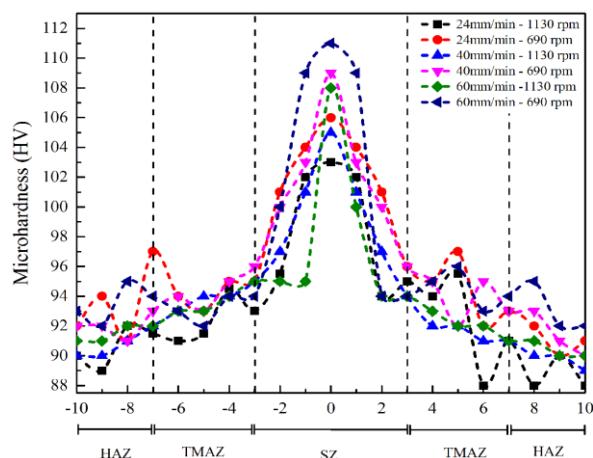


(ج)

شکل (۹): نمونه آنالیز EDS از نقاط مشخص شده در ساختارهای لایه ای در مرز اتصال

### ۳-۴- بررسی سختی محل اتصال

اطلاعات ثبت شده از آزمون ریزسختی خط مرکزی جوش در شکل (۱۱) به تصویر کشیده شده است. در حالت کلی، سختی هر فلز با مقاومت آن در مقابل تغییر شکل تعریف می‌شود. ریزسختی یک نوع سختی سنج مقطعی است که نسبت به فازهای فلزی، کارسختی و محل اندازه‌گیری سختی حساس است و با تغییر هریک از آنها، تغییر می‌کند [۳۱]. بر همین اساس این نوع سختی سنجی را می‌توان به طور ذاتی به عوامل زیادی وابسته دانست. به علت اینکه محل اتصال فلزات جوش داده شده در این پژوهش به هشت قسمت مجزا تقسیم شده‌اند، ریزسختی در اتصال بین آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس نیز به هشت قسمت مجزا تقسیم می‌شود. بر همین اساس نوارهای مربوط به هر ناحیه، در شکل (۱۱) بطور جداگانه به تصویر کشیده شده است.



شکل (۱۱): ریزسختی محل اتصال در سرعت های دورانی و خطی مختلف

به طور کلی ضرایب  $x$  و  $y$  در ساختار بین فلزی اتصالانی که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد می‌شوند، با توجه به تغییرات درصد عناصر موجود و مقدار حرارت در مرز اتصال تعیین می‌شوند [۲۴]. نتایج حاصل از آنالیز XRD محل اتصال فلز مس و آلومینیوم ۶۰۶۵ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این نتایج حاکی از تولید ساختارهای بین فلزی  $Cu_9Al_4$  و  $CuAl_2$  است که در منطقه اغتشاش فلز مس و آلومینیوم ۶۰۶۵، در سرعت دورانی ۱۱۳۰ و سرعت خطی ۲۴ میلی‌متر بر دقیقه تولید شده است. با افزایش سرعت خطی و کاهش سرعت دورانی، گرمای حاصل از اصطکاک کمتر می‌شود و احتمال شکل‌گیری این ترکیبات را کاهش می‌یابد. به طوری که نتایج آنالیز XRD از محل اتصال که در سرعت دورانی ۶۹۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۶۵ میلی‌متر بر دقیقه تولید شده بود، شکل‌گیری تنها فاز  $CuAl_2$  را در محل اتصال نشان می‌داد.

با افزایش همزمان سرعت دورانی و کاهش سرعت خطی، اندازه ریزساختار محل اتصال کاهش می یابد و از طرف دیگر ذرات بزرگتر و بیشتری از فلز مس به درون محل اغتشاش وارد میشوند که در شکل (۱۲-ب) نشان داده شده است. از طرف دیگر، افزایش شکل گیری لایه های بین فلزی و ساختارهای مرکب لایه-ای در این سرعت دورانی زیاد و سرعت خطی کم سبب می شود تا سختی منطقه اغتشاش و نواحی اطراف آن بیشتر شود. بیشترین سختی محل اتصال در جوشکاری با سرعت دورانی ۱۱۳۰ و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه، حاصل شد که در حدود ۱۱۱ ویکرز اندازه گیری شد.

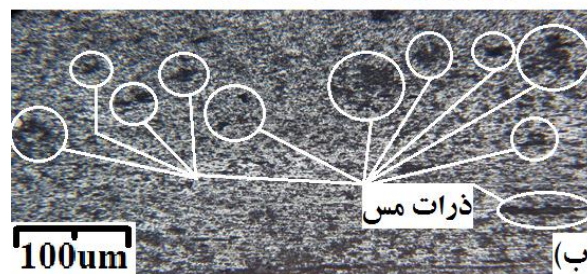
#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، خواص متالورژیکی اتصال غیر همجنس مس به آلومینیوم ۶۰۶۵ انجام گرفت. نتایج حاصل از بررسی ریز ساختار، ترکیبات بین فلزی و سختی این اتصال در زیر معرفی می گردد:

۱- در نمای برش خورده عرضی مشخص شد که محل اتصال بیضوی شکل است. منطقه اغتشاش از مناطق مختلفی از جمله تکه های فولادی، ساختارهای لایه ای، لایه های بین فلزی و دانه بندی های ریز مسی و آلومینیومی تشکیل شده است.

۲- نتایج حاصل از بررسی ریزساختار اتصال نشان داد که به دلیل نحوه قرار گیری دو ماده پایه، تغییرات ساختاری فلز آلومینیوم ۶۰۶۵ نسبت به فلز مس بیشتر بود. این پدیده ناشی از تماس آلومینیوم با شانه ابزار بود. اما فلز مس تنها با پین ابزار در تماس بود. با افزایش سرعت دورانی ابزار و بیشتر شدن گرمای حاصل از اصطکاک، اندازه ریزساختار هر دو فلز پایه آلومینیوم ۶۰۶۵ و مس کوچکتر میشوند و با افزایش سرعت خطی، و افزایش نرخ خنک شوندگی محل اتصال اندازه آنها بزرگتر می شود. ریزترین ابعاد ساختار دو فلز در منطقه اغتشاش در سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر در دقیقه حاصل شد که برای فلز مس و آلومینیوم ۶۰۶۵ به ترتیب ۱/۱۵ و ۷/۱ میکرومتر بود.

مهمترین عوامل تاثیرگذار بر روی سختی محل اتصال، پارامترهای فرآیند می باشند. با تغییر در پارامترهای فرآیند اتصال، حرارت ورودی و اندازه ریزساختار اتصال تغییر می کند و به دنبال آن سختی محل اتصال نیز دستخوش تغییر می شود. نتایج حاصل آزمون سختی محل اتصال نشان داد که بیشترین سختی مربوط به اتصالی است که با سرعت خطی ۶۵ میلیمتر در دقیقه و سرعت دورانی ۶۹۰ دور در دقیقه جوشکاری شد و ۱۰۰ ویکرز سختی داشت. این پدیده نتیجه ریز دانگی دو فلز پایه در منطقه اغتشاش به وجود می آید. از طرف دیگر به دلیل نحوه قرار گیری دو فلز بصورت لب روی هم، نرخ کار مکانیکی و تولید حرارت کم در سرعت های دورانی کم و سرعت خطی زیاد، ذرات مسی جدا شده از فلز پایه در بستر آلومینیومی پخش میشوند و سبب می شوند تا سختی محل اتصال بالاتر رود. نمونه ای از ذرات مسی ریز گسترده شده در ریزساختار محل اتصال که در سرعت دورانی ۶۹۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۶۵ میلیمتر در دقیقه به وجود آمده است، در شکل (۱۲-الف) مشاهده می شود.



شکل (۱۲): توزیع دانه های ریز مسی در بستر آلومینیومی در اتصالی که با: (الف): سرعت دورانی ۶۹۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۶۵ میلیمتر بر دقیقه و (ب): سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه حاصل شد

Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 1205–1214, 2004.

- [5] S. Sundaresan & K. G. K. Murti, "The formation of intermetallic phases in aluminum–austenitic stainless steel friction welds", Material Forum, Vol. 17, pp. 301–307, 1993.
- [6] M. Hansen, Constitution of Binary Alloys, New York, McGraw- Hill Book Company Inc, pp. 365–382, 1958.

[۷] م. باباجانی، م. شمعیان و م. کثیری، "ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرمشابه اینکلوی ۸۲۵ به فولاد زنگ نزن آستینیتی ۳۱۶L"، فصلنامه فرآیند های نوین در مهندسی مواد، سال یازدهم، شماره سوم، صفحات ۸۷–۱۰۰، پاییز ۱۳۹۶.

- [8] H. Aghajani Derazkola, H. J. Aval & M. Elyasi, "Analysis of process parameters effects on dissimilar friction stir welding of AA1100 and A441 AISI steel", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 20, No. 7, pp. 553-562, 2015.

- [9] H. Aghajani Derazkola & A. Simchi, "Effects of alumina nanoparticles on the microstructure, strength and wear resistance of poly (methyl methacrylate)-based nanocomposites prepared by friction stir processing", Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Material, Vol. 79, pp. 246–253.

- [10] H. Aghajani Derazkola & A. Simchi, "Friction-stir lap-joining of aluminium-magnesium/poly-methyl-methacrylate hybrid structures: thermo-mechanical modelling and experimental feasibility study", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 23, No. 1, pp. 35-49, 2018.

- [11] H. Aghajani Derazkola & A. Simchi, "Experimental and thermomechanical analysis of friction stir welding of poly (methyl methacrylate) sheets", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 23, No. 3, pp. 209-218, 2018.

- [12] N. Kumar, W. Yuan & R. S. Mishra, "Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials", Elsevier. Inc, pp 86-92, 2015.

- [13] M. Farahati, M. Abbasi & S. H. Razavi, "Friction stir welding of AA1050 aluminum alloy to pure copper", Proceedings of The Tenth National Manufacturing Conference, Babol: Noushiravani

۳- به علت نرمی فلز پایه ی آلومینیومی و مسی در منطقه اغتشاش، ساختارهای لایه ای بین دو فلز شکل گرفت. این ساختارها دارای رگه های مسی فرو رفته به درون بستر آلومینیومی در محل اغتشاش بودند که با افزایش دما ابعاد رشته های مسی شکل گرفته نازکتر و طول آنها طویل تر بود. ترکیب بین این دو فلز در سرعت دورانی بالا و سرعت خطی پایین ابزار سبب شد تا ترکیبات بین فلزی  $CuAl_2$  و  $Cu_9Al_4$  درون این اتصال شکل بگیرد. با کاهش سرعت دورانی و افزایش سرعت خطی ابزار، دما و کارمکانیکی درون منطقه اغتشاش کاهش یافت و سبب شد تا ترکیبات بین فلزی کاهش پیدا کند.

۴- به دلیل تغییرات ریزساختاری و ریزدانگی محل اتصال و نیز شکل گیری لایه های بین فلزی، سختی محل اتصال از دو سمت فلز پایه بیشتر بود. بیشترین سختی محل اتصال بر اساس ریزسختی ویکرز ۱۱۱ بود که در سرعت دورانی ۱۱۳۰ دور در دقیقه و سرعت خطی ۲۴ میلیمتر بر دقیقه تولید شد.

## ۵- مراجع

- [1] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola & M. Hosseinzadeh, "Investigations of tool tilt angle on properties friction stir welding of A441 AISI to AA1100 aluminium", Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture, Vol. 230, No. 7, pp. 1234–1241, 2016.

[۲] م. شعبانی، ب. شایق بروجنی و ر. ابراهیمی کهریزسنگی، "تأثیر سرعت چرخش ابزار بر خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال غیرهمجنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و تیتانیوم خالص تجاری به روش جوشکاری همزن اصطکاکی"، فصلنامه فرآیند های نوین در مهندسی مواد، سال یازدهم، شماره چهارم، صفحات ۷۹–۹۶، زمستان ۱۳۹۶.

[۳] ح. آقاچانی درازکلا، م. الیاسی و م. حسین زاده، "بررسی شکل گیری عیوب و لایه های بین فلزی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم AA100 به فولاد A441 AISI"، فصلنامه فرآیند های نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره سوم، صفحات ۲۳۳–۱۱۹، پاییز ۱۳۹۴.

- [4] C. M. Chen & R. Kovacevic, "Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding", International

- Y. Chen, "Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar Al/Cu joints produced by friction stir welding", *Materials and Design*, Vol. 51, pp. 466-473, 2013.
- [23] P. Xue, B. L. Xiao, D. R. Ni & Z. Y. Ma, "Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al-Cu joint by intermetallic compounds", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 21-22, pp. 5723-5727, 2010.
- [24] P. Xue, B. L. Xiao, D. R. Ni & Z. Y. Ma, "Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 13-14, pp. 4683-4689, 2011.
- [25] J. R. Davis, "Aluminum and aluminum alloys", 10th ed., *AWS welding Handbook*, Ohio Metal Park, Vol. 3, Chap. 1, 1998.
- [26] J. R. Davis, "Copper and copper alloys", 10th ed., *AWS welding Handbook*, Ohio Metal Park, Vol. 3, Chap. 3, 1998.
- [27] O. Al Roubaiy, S. M. Nabat & A. D. L. Batako, "Experimental and theoretical analysis of friction stir welding of Al-Cu joints", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, pp. 1631-1642, 2014.
- [28] H. A. Derazkola, M. Elyasi & M. Hosseinzadeh "Formation of Defects and Intermetallic Compound in Friction Stir welding of AA1100 Aluminum alloy to A441 AISI steel", *Advance Processes in Material Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 219-233, 2015.
- [29] T. K. Bhattacharya, H. Das & T. K. Pal, "Influence of welding parameters on material flow, mechanical property and intermetallic characterization of friction stir welded AA6063 to HCP copper dissimilar butt joint without offset", *Transaction of Nonferrous Metal Society of China*, Vol. 25, pp. 2833-2846, 2015.
- [30] Elrefaey, M. Takahashi & K. Ikeuchi, "Preliminary Investigation of Friction Stir Welding Aluminium/Copper Lap Joints", *Welding in the World*, Vol. 49, pp. 93-101, 2005.
- [31] P. K. Saha, S. Pala, S. K. Pal & R. Jainb, "Influence of plate position, tool offset and tool rotational speed on mechanical properties and University of Technology Press, pp. 23-40, 2008.
- [14] H. Barekatin, "Microstructure and Mechanical Properties in Dissimilar Butt Friction Stir Welding of Severely Plastic Deformed Aluminum AA 1050 and Commercially Pure Copper Sheets", PhD Thesis, Department of Material Science, Sharif University of Technology, 2013.
- [15] L. Xia wei, Z. Da tong, Q. Cheng & Z. Wen, "Microstructure and mechanical properties of dissimilar pure copper/1350 aluminum alloy butt joints by friction stir welding", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 1298-1306, 2012.
- [16] E. T. Akinlabi & S. A. Akinlabi, "Effect of Heat Input on the Properties of Dissimilar Friction Stir Welds of Aluminium and Copper", *American Journal of Materials Science*, Vol. 2, No. 5, pp. 147-152, 2012.
- [17] P. Liu, Q. Shi, W. Wang, X. Wang & Z. Zhang, "Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06 dissimilar materials", *Materials Letters*, Vol. 62, No. 25, pp. 4106-4108, 2008.
- [18] Galvão, D. Verdera, D. Gestó, A. Loureiro & D. M. Rodrigues, "Analysing The Challenge of Aluminium to Copper FSW", *Proceedings ninth International Symposium on Friction Stir Welding*, Alabama, Huntsville University Press, pp. 113-126, 2012.
- [19] P. Xue, B. L. Xiao, D. Wang & Z. Y. Ma, "Achieving high property friction stir welded aluminium/copper lap joint at low heat input", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 16, No. 8, pp. 657-661, 2011.
- [20] J. A. Al Jarrah, "Surface Morphology and Mechanical Properties of Aluminum-Copper Joints Welded by Friction Stir Welding", *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 7, No. 5, pp. 219-230, 2014.
- [21] T. Saeida, A. Abdollah zadehb & B. Sazgarib, "Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction stir welding", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 490, No 1-2, pp. 652-655, 2010.
- [22] C. W. Tan, Z. G. Jiang, L. Q. Li, Y. B. Chen & X.

microstructures of dissimilar Al/Cu friction stir welding joints”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 235, pp. 55–67, 2016.

## Investigation of microstructure, hardness and intermetallic compound in friction stir welding of AA6065 aluminum alloy to copper

Rahim Narimani<sup>1</sup>, Majid Elyasi<sup>2\*</sup>, Morteza Hosseinzadeh<sup>3</sup>, Hamed Aghajani Derazkola<sup>4</sup>

1- M.sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Mazandaran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Noushiravani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Mazandaran, Iran

4- Ph.D. Student, Young Researchers and Elites Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\*Corresponding author: elyasi@nit.ac.ir

---

### Abstract

In this study, metallurgical properties lap joint of pure copper and 6065 aluminum alloy with friction stir welding technique were investigated. To purpose the metallurgical properties of joint optical microscopy, X-ray diffraction analysis (XRD), energy dispersive X-ray (EDS) and Vickers hardness junction of micro gauge were used. The results show that due to the direct contact between aluminum alloy and tool shoulder, the microstructure change of AA6065 was more than copper. With increasing tool rotation speed the microstructure size of AA6065 and copper became smaller and with increasing linear speed and cooling rate, the microstructure size of base material became more. The results show that the structured layers were formed in stir zone which with increasing heat generation they geometry became thinner and stretcher. The combination of base materials in high tool rotation and low travelling speed caused the  $\text{CuAl}_2$  and  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  intermetallic compounds were formed in base metal interface. For changes in microstructure size and formation of intermetallic compounds, the hardness of stir zone was more than other area of joint. The maximum hardness of joint area was 111 Vickers which allocated to the joint that welded with 1130 rpm and 24mm/min tool speed.

### Keywords:

Friction Stir Welding, Non-Homogeneous Connection, Metallurgical Properties, AA6065 Aluminum Alloy, Copper.

---

Journal homepage: [ma.iaumajlesi.ac.ir](http://ma.iaumajlesi.ac.ir)

### Please cite this article using:

Rahim Narimani, Majid Elyasi, Morteza Hosseinzadeh, Hamed Aghajani Derazkola, Investigation of microstructure, hardness and intermetallic compound in friction stir welding of AA6065 aluminum alloy to copper, in Persian, New Process in Material Engineering, 2018, 12(2), 63-76.