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

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

Volume 9, Number 1, 2023



Investigation of microstructure, hardness and intermetallic compound in friction stir welding of AA1050 aluminum alloy to copper

M. Ahmadi[1], H. R. Ahmadi[2], M. R. Khanzadeh[3*], H. Bakhtiari[4]

1- Department of Mechanical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah.
2-Materials Engineering, Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh.
3-Technical and Engineering Faculty, Mobarakeh Branch, Islamic Azad University, Mobarakeh, Isfahan.
4-Materials and Energy Research Center, Ceramics Research Institute, Karaj.

Received 11 December 2023 ; Accepted 18 March 2023

Abstract

In this research, friction stir welding of aluminum 1050 to copper with variable speed was investigated. For friction stir welding, rotational speeds of 900 and 1200 rpm and traverse speeds of 36, 63, and 125 mm/min were used. In order to check the phases and microstructure, scanning electron microscope analysis, X-ray spectrometry, and hardness testing were used. The disturbance zone included Al_2Cu_3, Al_4Cu_9, $AlCu_4$, Al_2Cu, and AlCu phases. The results showed that the formation of intermetallic phases and severe plastic deformation in the welding area caused an increase in hardness. The highest hardness value in the stirred area was 97.8 Vickers at a rotation speed of 900 rpm and an advance speed of 36 mm/min.

Keywords:Friction stir welding, aluminum 1050, copper, mechanical properties.

*Corresponding Author: Khanzade@gmail.com

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.03]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره1، بهار و تابستان 1402



بررسی ریزساختار، سختی و ترکیبات بین‌فلزی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی Al 1050 و مس

میثم احمدی[1]، حمیدرضا احمدی[2]، محمدرضا خانزاده[3*]، حمید بختیاری[4]

1- گروه مهندسی مکانیک، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه.

2- مهندسی مواد، واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه.

3- دانشکده فنی و مهندسی، واحد مبارکه، دانشگاه آزاد اسلامی، مبارکه، اصفهان.

4- پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، کرج.

دریافت مقاله: 1401/10/09 ؛ پذیرش مقاله: 1401/12/27

چکیده

در این پژوهش انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم 1050 به مس با سرعت متغیر مورد بررسی قرار گرفت. برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از سرعت‌های دورانی 900 و 1200 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 36، 63 و 125 میلی‌متر در دقیقه استفاده شد. جهت بررسی فازها و ریزساختار از آنالیزهای میکروسکوپ الکترون روبشی و آزمون طیف‌سنجی اشعه ایکس و سختی سنجی استفاده شد. منطقه اغتشاش شامل فازهای Al_2Cu_3, Al_4Cu_9, $AlCu_4$, Al_2Cu و AlCu بود. نتایج نشان داد که تشکیل فازهای بین فلزی و تغییر شکل شدید پلاستیک در ناحیه جوش باعث افزایش سختی شده است. بالاترین مقدار سختی در ناحیه هم زده 97/8 ویکرز در سرعت چرخش 900 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 36 میلی‌متر در دقیقه حاصل شد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلومینیوم 1050، مس، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: Khanzade@gmail.com

1- مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مؤسسه جوشکاری کمبریج (بریتانیا) از طریق توماس وین و همکاران اختراع و به ثبت رسید [1]. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیروهای رو به پایین در طول تغییر شکل پلاستیک به مواد اعمال می‌کند که دمای ماده را نزدیک به 70-80% نقطه ذوب افزایش می‌دهد [2-3]. این فرایند اتصال به‌عنوان یک اتصال حالت جامد باعث ایجاد فشار موضعی بر روی ناحیه جوش می‌شود. در این فرایند نیازی به تمیز کردن سطح نیست، ضایعات و یا آلودگی‌های تولیدی بسیار کم است[4-5]. فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل یک ابزار استوانه‌ای متحرک در جهت امتداد فصل مشترک دوفلز است. اصطکاک مواد در نزدیکی ابزار، مواد

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.03]

حالت جامد را به حالت خمیری تبدیل می‌کند و فشار اعمال شده توسط ابزار جوشکاری، فرایند اتصال را تکمیل می‌کند[6]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌وسیله تغییر شکل مواد در دماهای زیر نقطه ذوب ایجاد می‌گردد. چرخش همزمان و حرکت انتقالی ابزار جوش حین فرایند جوشکاری یک تقارن خاص بین ورق‌های جوشکاری ایجاد می‌کند. در یک‌طرف جهت چرخش ابزار به سمت جهت انتقال ابزار جوشکاری و یا به عبارتی جهت پیشروی است[7-8]. این فرایند در ده سال گذشته به عنوان یک روش جوشکاری مطلوب و فاقد عیوب حاصل از روش‌های جوشکاری ذوبی، برای اتصال آلیاژهای مس، فولاد و تیتانیوم استفاده می‌شد که اتصالاتی موفق با خواص مکانیکی مناسبی بودند [9-11]. همچنین اتصال آلیاژهای غیرمشابه با فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی امکان‌پذیر است. بایسادی و همکاران [12] به بررسی خواص مکانیکی اتصالات آلومینیوم - مس با سرعت‌های پیشروی مختلف پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که فشار و جریان مواد ناشی از حرکات پیشروی و چرخشی پین باعث تغییر شکل شدید پلاستیک و تأثیر بر مکان‌های مختلف ناحیه جوش می‌شود.

اکبری و همکاران [13] اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم - مس را با چرخش و سرعت پیشروی ابزار به منظور به دست آوردن بالاترین مقاومت مکانیکی در جوش مورد مطالعه قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش سرعت دوران و کاهش سرعت پیشروی، کیفیت جوش بهبود می‌یابد و با افزایش سرعت سرد شدن، اندازه دانه‌های Al و Cu کاهش می‌یابد که باعث بهبود رفتار مکانیکی آن‌ها می شود.

حسینی و همکاران [14] ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال Cu -Al را که تحت عملیات حرارتی در فشار دادن شمش‌ها با سرعت پیشروی و دورانی قرار می‌گرفت، بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که تغییر شکل شدید پلاستیک، مقاومت جوش را تا 15 درصد به‌جای نمونه‌های آنیل شده افزایش می‌دهد.

بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی ریزساختار اتصال اصطکاکی مس به آلومینیوم و بررسی تأثیر سرعت دورانی و پیشروی بر خواص مکانیکی آن است.

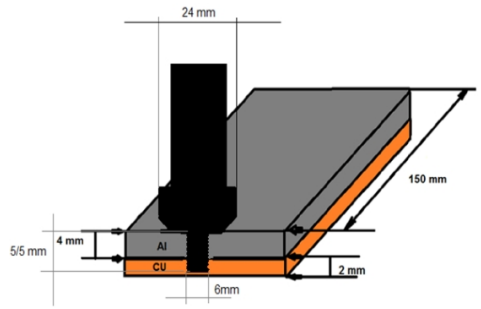
2- مواد و روش‌ها

جوشکاری‌های اصطکاکی اغتشاشی روی ورق‌های آلومینیوم خالص 1050 باضخامت 4 میلی‌متر و مس خالص 99/95% باضخامت 2 و ابعاد 100×150 میلی‌متر انجام‌گرفته است. در جدول (1) ترکیب شیمیایی فلزات پایه نشان داده‌شده است. از سه سرعت چرخش مختلف برای پین در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی Al 1050 و اتصالات مسی استفاده شد که در جدول (2) بیان شده‌اند. سرعت چرخش 900 و 1200 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 36، 63 و 125 میلی‌متر در دقیقه استفاده شد.

جدول 1- ترکیب شیمیایی فلزات پایه بر اساس درصد وزنی

نام ماده	Al	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Ti	Cu
آلومینیوم 1050	95/5	0/05	0/25	0/4	0/05	0/07	0/05	0/05
مس	-	-	0/009	-	-	0/001	-	99/94

برای انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از طرح اتصال به‌صورت لبه‌ای استفاده شد. در شکل (1) نحوه قرارگیری دو ورق به همراه پین بر روی یکدیگر نشان داده‌شده است. پین نیز از فولاد ابزار گرم کار AISI H13 و با ارتفاع 5/5 ، قطر پین 6 و قطر شانه 24 میلی‌متر ساخته شد.



شکل 1- ابعاد و نحوه قرارگیری ابزار و ورق آلومینیوم – مس.

برای بررسی ریزساختاری از آنالیزهای میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالیزگر و پراش پرتو ایکس استفاده شد. همچنین از آزمون ریز سختی سنجی براساس استاندارد (ASTM E 384-05a) به روش ویکرز و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.03]

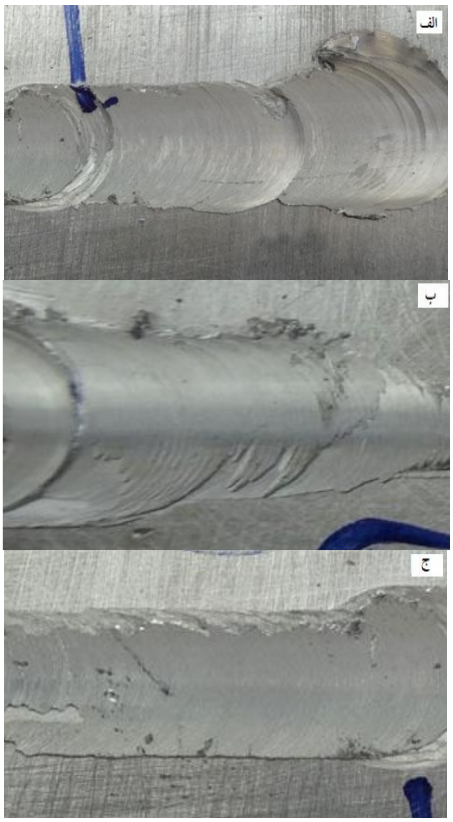
با نیروی اعمالی 100 گرم در مدت‌زمان 10 ثانیه در راستای عرضی جوش از سمت فلز مس به سمت جوش و سپس فلز آلومینیوم برای ریز سختی سنجی استفاده شد.

جدول 2- پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نمونه‌ها.

شماره نمونه	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت چرخش (rpm)
1	36	900
2	125	900
3	63	1200

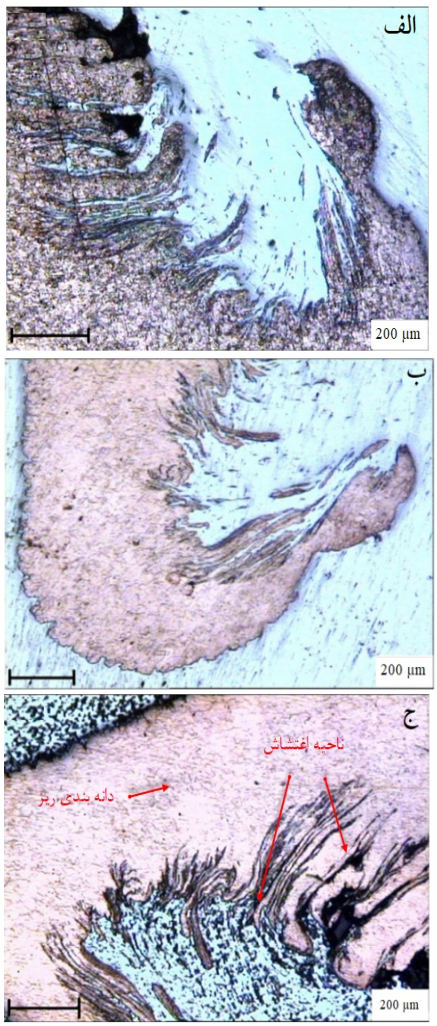
3- نتایج و بحث

سطوح حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نمونه‌ها و تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری آن‌ها به ترتیب در شکل‌های (2و3) نشان داده‌شده است.



شکل 2- نمای سطح جوش در سرعت‌های دورانی و چرخشی مختلف الف-نمونه شماره 1، ب- نمونه شماره 2، ج- نمونه شماره 3.

عیوبی مانند ترک، سطح جدایش و حفره‌های توخالی بسیار کم دیده می‌شود که دلیل بر مناسب بودن این نوع روش جوشکاری جهت اتصال آلیاژهای مس و آلومینیوم است. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سرعت‌بالای چرخشی ابزار و نیز سرعت‌پایین پیشروی در نمونه موجب بالا رفتن حرارت در منطقه اغتشاش می‌شود. همچنین سرعت چرخشی کم پین همراه با سرعت پیشروی بالا کمترین حرارت را در منطقه اغتشاش همراه با نقص در آن ایجاد می‌کند. حرارت بالا باعث ریزتر شدن دانه‌ها در منطقه اغتشاش می‌شود [16-15].



شکل3- تصاویر متالوگرافی نوری در ناحیه اغتشاش آلومینیوم – مس الف- نمونه شماره 1، ب- نمونه شماره 2، ج- نمونه شماره 3.

با دقت در تصاویر میکروسکوپ نوری در شکل (3) نیز مشاهده می‌شود که در نمونه شماره 3 ساختار با دانه‌های ریزتر و اغتشاش خوب آلومینیوم و مس در یکدیگر رخداده است. عامل ایجاد چنین ساختاری تبلور مجدد دینامیکی است. با چرخش پین درون ماده، تغییر شکل پلاستیک بسیار شدیدی در آن ناحیه ایجاد شده و انرژی بالایی در مواد ذخیره می‌شود.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.03]

دمای بالا، وجود انرژی زیادی ناشی از کار سرد روی فلزپایه و تولید انرژی بسیار زیاد بوجود آمده حین فرایند، عواملی هستند که باعث جوانه‌زنی و تبلور مجدد دینامیکی می‌شوند.

جدول 3- نتایج آنالیز عنصری گرفته‌شده از نقاط A در شکل4 (At. %)

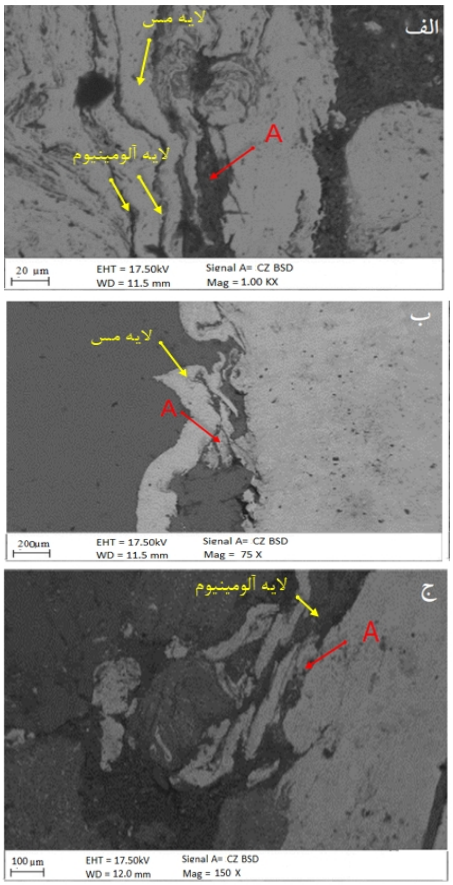
شماره نمونه/ عنصر	O	Al	Cu	N	فاز های پیشنهادی
نمونه شماره (1)	9/51	54/77	35/70	-	Al_2Cu
نمونه شماره (2)	12/92	14/68	66/59	5/79	Al_4Cu_9 $AlCu_4$
نمونه شماره (3)	50/02	15/60	24/52	9/83	Al_2Cu_3 $AlCu$

شکل (4) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ها را نشان می‌دهد، نواحی روشن مس و نواحی تیره آلومینیوم هستند. شکل (4- الف) مربوط به نمونه شماره 1، نشان می‌دهد که به دلیل سرعت پیشروی کمتر و سرعت چرخش مناسب، یک‌لایه مس پیوسته و هم زده روی Al تشکیل‌شده است.

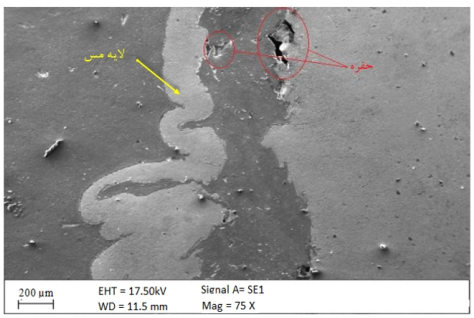
شکل (4-ب) نشان می‌دهد که در اثر سرعت سریع پین، مس بر روی آلومینیوم اغتشاش یافته و به‌صورت یک‌لایه کشیده شده نمود پیداکرده است. در شکل (4- ج) مربوط به نمونه 3 نشان داده‌شده است که آلومینیوم موجود به‌صورت یک‌لایه نازک دربرش‌های مس منتشرشده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و تجزیه‌وتحلیل نمونه 1 نمایانگر اختلاط و ترکیب بهتر بین مس و آلومینیوم در منطقه اغتشاش در مقایسه با دو نمونه دیگر است.

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه شماره 2 با سرعت چرخشی 900 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 125 میلی‌متر در دقیقه نشان می‌دهد که در اثر حرکت سریع ابزار در مقایسه با دو نمونه دیگر، در برخی از نقاط فصل مشترک اتصال می‌توان حفره‌هایی را مشاهده نمود که در اثر اغتشاش ناکافی در زمان هدایت مواد اغتشاش یافته توسط پین ابزار به وجود آمده است (شکل 5).

در جدول (3) نتایج حاصل از آنالیز عنصری A مشخص‌شده در شکل (4)، نشان داده‌شده است. برای نمونه شماره 1 نمایانگر تشکیل ترکیب بین فلزی براساس نتایج آنالیز است. نسبت مس به آلومینیوم تقریباً دو برابر بوده و بر اساس نتایج آنالیز فازی (شکل 6) فاز Al_2Cu تشخیص داده شد.



شکل 4- تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها
الف- نمونه شماره 1 ب- نمونه شماره 2 ج- نمونه شماره 3

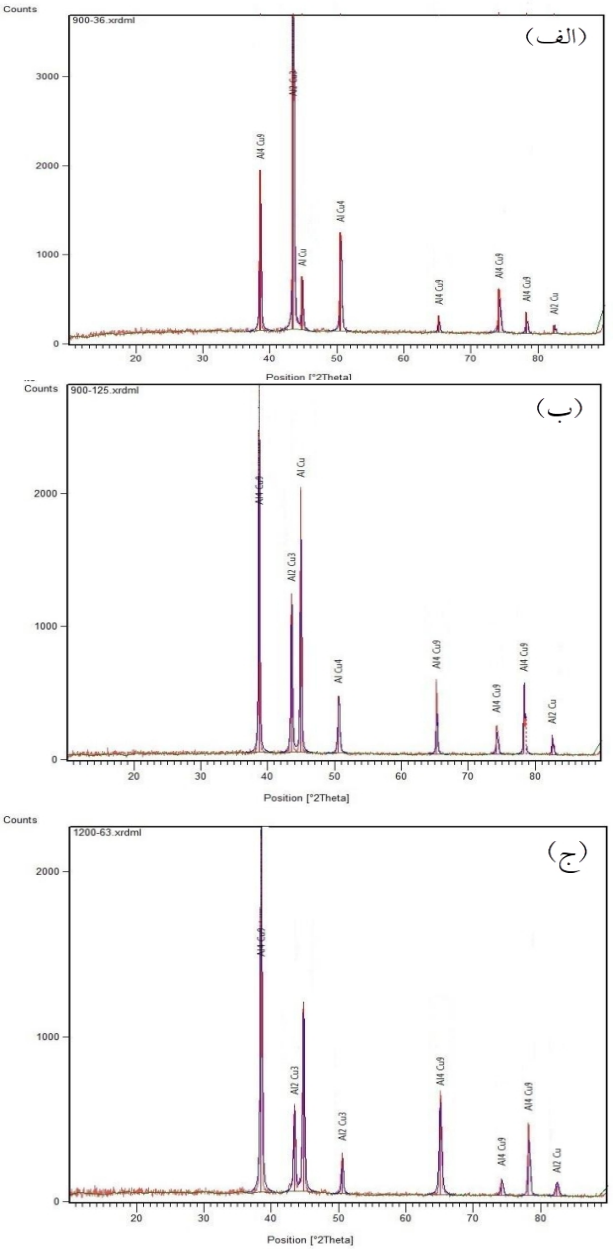


شکل 5- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی منطقه اغتشاش نمونه شماره 2 با سرعت چرخشی 900 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 125 میلی‌متر در دقیقه

نتایج آنالیز عنصری برای نمونه شماره 2 نیز نشان‌دهنده تشکیل ترکیبات بین فلزی در منطقه اتصال است. مس مورد اغتشاش قرارگرفته و به‌صورت تکه‌های جدا از یکدیگر در فلز آلومینیوم پخش گردیده است. آلومینیوم موجود نیز به‌صورت لایه‌های

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.03]

نازک در تکه‌های مس نفوذ کرده است. به دلیل سرعت چرخشی بالای پین و سرعت پیشروی نسبتاً کم آن در ناحیه اغتشاش حرارت زیاد در زمان اختلاط می‌گردد، فلز آلومینیوم به دلیل نقطه ذوب کمتر نسبت به فلز مس حالت خمیری بیشتری به خود می‌گیرد، تکه‌های مس جداشده از فلزپایه خود به‌صورت تکه‌هایی که در آلومینیوم به حالت غوطه‌ور شده درمی‌آید که تکه‌های مس بعد از گذشتن پین از آن ناحیه در منطقه هم زده‌شده محبوس می‌شود.



شکل 6- نتایج آنالیز فازی

الف-نمونه شماره 1، ب- نمونه شماره 2، ج- نمونه شماره 3

الگوهای آنالیز فازی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نشان‌دهنده ایجاد فازهای اصلی Al_2Cu_3، Al_4Cu_9، $AlCu_4$، Al_2Cu و AlCu در منطقه اغتشاش است. در نمونه 1 فازهای: Al_2Cu_3، Al_4Cu_9، AlCu4، Al_2Cu و AlCu و در نمونه 2 فازهای تولیدشده عبارتند از: Al_2Cu_3، Al_4Cu_9، $AlCu_4$، Al_2Cu و در نمونه 3 فازهای تولیدشده عبارتند از: Al_2Cu_3، Al_4Cu_9، AlCu و Al_2Cu می‌باشند که در شکل (6) نشان داده‌شده است. نتایج الگوهای آنالیز فازی نشان می‌دهد که فاز $AlCu_4$ در نمونه‌های 1 و 2 ایجادشده است درحالی‌که در نمونه شماره 3 اثری از این فاز وجود ندارد. فازهای بین فلزی به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید و اختلاط در اثر چرخش پین به وجود آمده است. کار مکانیکی ناشی از پیشروی و سرعت پین باعث می‌شود که لایه‌های رشته‌ای شکل دو فلز، درهم فرو روند و منجر به شکل گیری ساختار کامپوزیتی شود. این ساختار لایه‌ای حساسیت زیادی به نرخ گرمای ورودی و نرخ خنک شوندگی منطقه اتصال دارند. افزایش سرعت دورانی باعث افزایش کار مکانیکی و حرارتی ورودی در ناحیه اتصال می‌شود، در نتیجه مقدار بیشتری از فلز مس تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد. این امر منجر به افزایش ساختار لایه‌ای می‌شود. همچنین در اثر افزایش سرعت خطی ابزار، نرخ خنک شوندگی منطقه جوشکاری نیز بیشتر می‌شود. این مهم نیز باعث ناتوانی حرارت ناشی از اصطکاک جهت ایجاد حالت خمیری می‌شود. بنابراین احتمال شکل‌گیری عیوب و ترک‌های ریز در فصل مشترک بین دو فلز مس و آلومینیوم افزایش می‌یابد. از لحاظ متالورژیکی، لایه‌های بین فلزی در این ساختارها می‌تواند شکل گیرد [19-17].

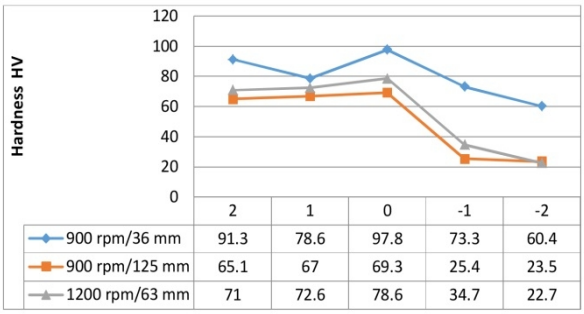
نتایج ثبت شده ازآزمون ریزسختی خط مرکزی جوش در شکل(7) به تصویرکشیده شده است. به طور کلی سختی هر فلز با مقاومت آن در مقابل تغییر شکل تعریف می‌شود. ریزسختی یک نوع سختی سنج مقطعی است که نسبت به فازهای فلزی، کارسختی و محل اندازه گیری سختی حساس است و با تغییر هریک از آن‌ها، تغییر می‌کند [19]. نتایج آزمون سختی مقدار سختی مس را 57 ویکرز و مقدار سختی آلومینیوم را 36 ویکرز

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.03]

نشان می‌دهد. اگرچه سختی ناحیه همزن در سرعت‌های چرخش 900 و 1200 دور در دقیقه و سرعت‌های پیشروی 36، 63 و 125 میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب 97/8، 69/3 و 78/6 بود که نشان‌دهنده سختی بالای نقطه‌جوش در هر 3 نمونه نسبت به فلزپایه است. اغتشاش و کار مکانیکی بالاتر ابزار رزوه ای شکل باعث کاهش اندازه دانه در ناحیه تحت فرایند جوشکاری نسبت به فلزپایه شده و می‌تواند باعث افزایش سختی در آن ناحیه شود. طبق رابطه هال – پچ (رابطه 1) [20]، سختی رابطه عکس با اندازه دانه دارد. در این رابطه σ_1 تنش تسلیم، σ_0 تنش اصطکاکی، K پارامتر قفل شدن و D قطر متوسط دانه‌ها است.

$$\sigma_0 = \sigma_{1+KD^{-1/2}} \quad (1)$$

سختی ناحیه اغتشاش به علت تغییر شکل پلاستیکی شدید و فازهای بین فلزی در حین جوشکاری و درنتیجه آن اندازه دانه‌ریز آن، افزایش‌یافته است. نتایج حاکی از آن است که به دلیل حرکت پیشروی سریع پین و کم بودن زمان اختلاط در نمونه شماره 2 سختی حاصل‌شده در ناحیه اغتشاش نسبت به دیگر پارامترهای جوشکاری شده کمتر است.



	2	1	0	-1	-2
900 rpm/36 mm	91.3	78.6	97.8	73.3	60.4
900 rpm/125 mm	65.1	67	69.3	25.4	23.5
1200 rpm/63 mm	71	72.6	78.6	34.7	22.7

شکل 7- پروفیل سختی نمونه‌های جوشکاری شده.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق‌های آلومینیوم 1050 به مس با سرعت پیشروی و چرخشی متفاوت انجام و نتایج زیر حاصل شد:

- بهترین کیفیت و ظاهر جوش‌ها مربوط به نمونه با مشخصات 900 دور در دقیقه و 36 میلی‌متر در دقیقه بودند.
- نتایج آنالیز فازی و عنصری نشان‌دهنده وجود فازهای بین فلزی Al و Cu در منطقه اغتشاش بود.
- فازهای بین فلزی Al_2Cu_3 ، Al_4Cu_9، $AlCu_4$، Al_2Cu و AlCu در منطقه اغتشاش به دلیل تغییر شکل پلاستیکی شدید تشکیل شدند.
- نتایج سختی سنجی نشان داد که به دلیل تغییر اندازه دانه و وجود فازهای بین فلزی در سرعت چرخش 900 و 1200 دور در دقیقه همراه با سرعت پیشروی 36 و 63 میلی‌متر در دقیقه به ترتیب 97/8 و 78/6 ویکرز به دست آمد است که نشان‌دهنده افزایش سختی بودند.

منابع

1-Xie, G.M., Ma, Z.Y., and Geng, L., "Development of a Fine-Grained Microstructure and the Properties of a Nugget Zone in Friction Stir Welded Pure Copper", *Scripta Materialia*, Vol. 57, Issue 2, pp. 73-76, 2007.

2-Senthil, S. M., Bhuvanesh Kumar, M., Selvam Dennison, M., "A Contemporary Review on Friction Stir Welding of Circular Pipe Joints and the Influence of Fixtures on This Process", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2022, pp. 1-25, 2022.

3-صفربالی، ب.، شمعانیان، م. و اسلامی، ع.، " تاثیر عملیات حرارتی پیرسازی بر خواص اتصال غیرمشابه آلیاژهای آلومینیوم 2024AA به 7075 AA جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی"، *نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران*، جلد 5، شماره 1، 11-1، 1398.

4-Nikola, S., Vukcevic, M., "Numerical Simulation for FSW Process at Welding Aluminium Alloy AA6082-T6", *Metals, Vol. 9, pp. 747-759*, 2019.

5-Cai, B., Zheng, Z.Q., He, D.Q., Li, S.C., and Li, H.P., "Friction Stir Weld of 2060 Al–Cu–Li Alloy: Microstructure and Mechanical Properties", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 649, pp. 19–27, 2015.

6-Tucci, F., Carlone, P., Silvestri, A.T., "Dissimilar Friction Stir Lap Welding of AA2198- AA6082: Process Analysis and Joint Characterization", *The CIRP Journal* of *Manufacturing Science* and *Technology*, Vol. 35, pp. 753-764, 2021.

7-Barbini, A., Carstensen, J., and dos Santos, J., "Influence of Alloys Position, Rolling and Welding Directions on Properties of AA2024/AA7050 Dissimilar Butt Weld Obtained by Friction Stir Welding", *Metals*, Vol. 8, pp. 202-214, 2018.

8-Thilagham, K.T., Muthukumaran, S., "Process parameter optimization and characterization of friction stir welded advancing side AA6082-T6 with retreating side AA7075- T651", *Materials Today: Proceedings*, Vol 27, pp. 2260-2264, 2020.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.03]

9-سلیمانی، ح.، امینی، ک. و غروی، ف.، "اثر موقعیت ابزار بر خواص ساختاری و مکانیکی اتصال لب به لب آلیاژهای غیرهمجنس آلومینیوم 2024 به 7075 جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی"، *نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران*، جلد 7، شماره 2، 58-47، 1400.

10-Mishra, R.S., and Ma, Z.Y., "Influence of Friction Stir Welding Parameters on Sliding Wear Behavior of AA6061/0-10 wt.% ZrB2 in-situ Composite Butt Joints", *Materials Science and Engineering*, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.

11- Schmidt, H.N. B., Dickerson, T.L., and Hattel, J.H., "Influence of Microstructure and Experimental Parameters on Mechanical and Wear Properties of Al-TiC Surface Composite by FSP Route", *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 1199, 2006.

12-Bisadi, H., Tavakoli, A., and Tour Sangsaraki M., "The Influences Of Rotational And Welding Speeds On Microstructures And Mechanical Properties Of Friction Stir Welded Al5083 And Commercially Pure Copper Sheets Lap Joints", *Materials And Design*, Vol. 43, pp. 80-88, 2013.

13-Akbari1, R., and Abdi Behnagh A., "Effect of Materials Position on Friction Stir Lap Welding of Cu/ Al", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 17, pp. 581-588, 2012.

14-Hosseini, E., and Kazeminezhad, M., "RETRACTED: Nanostructure and Mechanical Properties of 0–7 Strained Aluminum by CGP: XRD, TEM and Tensile Test", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 526, pp. 219-224, 2009.

15- Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M., and Withers, PJ., "Microstructure Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminum AA5083 Friction Stir Welds", *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 4791–801, 2003.

16-قربانی امیر، ی.، ذوالریاستین، ا. و ترابیان، ح.، "تاثیر متغیرهای فرایند جوش اصطکاکی چرخشی بر خواص مکانیکی و فیزیکی اتصال لوله آلومینیوم به مس"، *نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران*، جلد 6، شماره 2، 39-29، 1399.

17- F. Jafari, M. Khanzadeh Gharah Shiran, Z. Bakhtiari, M. Akbari, Y. shajari, Z. S. Seyedraoufi, H. bakhtiyari "Electrochemical and Microstructural Investigation of AA6063 Friction Stir Welded Joint", *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 56, No.1, pp. 13-21, 2020.

18-Mehri, M., KhanzadehGharahshiran, M.R., Bakhtiari, H., "Study of the Effect of Instrument Pin Geometry on Mechanical and Microstructural Properties of the Welding Region in the Process of Friction Stir Butt Welding of AlMg6", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No 9, pp. 25-36, 2020.

19- Hao, D.D., Okazaki, M., and Tra, T.H., "Fatigue Behavior of Dissimilar Friction Stir Welded T-Lap Joints Between AA5083 and AA7075", *The International Journal of Fatigue, Vol. 145, pp. 1-10*, 2021.

20- Morisada, Y., Fujji, H., Nagaoka, and Fukusumi, T., "Effect of Friction Stir Processing with SiC Particles on Microstructure and Hardness of AZ31, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 433, pp. 50-54. 2006.

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

[DOI: 10.47176/JWSTI.2023.03]