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

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

Volume 10, Number 2, 2025



The effect of nickel powder and tool penetration depth on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded aluminum-copper joints

A. Heidarzadeh[1*], R. Khajeh[2], M. Sajed[3]

1- Department of Materials Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
2- School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
3- Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

Received 8 August 2024 ; Accepted 30 September 2024

Abstract

In this research, the effect of nickel powder as an interlayer and the tool penetration depth on the microstructure and mechanical properties of lap joints between aluminum 1050 (top sheet) and pure copper (bottom sheet), both with a thickness of 2 mm, was investigated. Nickel powder was added through a machined groove with a width and depth of 1 mm at the base of the aluminum sheet. Friction stir lap welding was performed using a hot work steel tool with a shoulder diameter of 16 mm, a pin diameter of 4 mm, a pin height of 2.1 mm, a rotational speed of 950 rpm, a feed rate of 85 mm/min, a tool tilt angle of 2°, and varying tool penetration depths of 0, 0.05, and 0.1 mm. The results revealed that in the sample with a 0 mm penetration depth, due to insufficient heat generation, defects such as tunnel voids were formed. Increasing the penetration depth to 0.05 mm resulted in the formation of uniform and thin intermetallic layers, including Al_3Ni_2, Al_7Cu_4Ni, and $Cu_{3.8}Ni$ at the interface, which enhanced joint quality and increased tensile strength to 185.2 MPa with a fracture strain of 8.7%. In the sample with a 0.1 mm penetration depth, thicker and less uniform intermetallic layers were formed, which, despite locally increasing hardness, led to a decrease in tensile strength and fracture strain to 136.6 MPa and 6.7%, respectively. This study demonstrates that under the conditions of this research, a tool penetration depth of 0.05 mm provides the optimal conditions for FSLW of aluminum-copper alloys using nickel powder.

Keywords:Friction stir welding, Copper, Aluminum, Nickel powder.

*Corresponding Author A. Heidarzadeh, ac.heydarzadeh@azaruniv.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.03]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره2، پاییز و زمستان 1403

تاثیر پودر نیکل و عمق نفوذ ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش همزن اصطکاکی لب روی‌هم آلومینیم-مس

اکبر حیدرزاده[1*]، رسول خواجه[2]، موسی ساجد[3]

1- گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

2- دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

3- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

دریافت مقاله: 1403/05/18 ؛ پذیرش مقاله: 1403/07/09

چکیده

در این پژوهش، تأثیر پودر نیکل به عنوان لایه واسط و عمق نفوذ ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات لب‌روی‌هم ورق آلومینیم 1050 (ورق فوقانی) و مس خالص (ورق تحتانی) هر دو به ضخامت 2 میلیمتر بررسی شده است. جهت اضافه نمودن پودر نیکل از یک شیار تراشیده شده به عرض و عمق 1 میلیمتر در کف ورق آلومینیم استفاده گردید. جوشکاری همزن اصطکاکی لب‌روی‌هم با استفاده از ابزار فولاد گرم‌کار با قطر شانه، قطر و ارتفاع پین به ترتیب برابر با 16، 4 و 2/1 میلیمتر، سرعت چرخش ابزار 950 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ابزار 85 میلیمتر بر دقیقه، زاویه ابزار 2 درجه و عمق نفوذ ابزار متفاوت برابر با صفر، 0/05 و 0/1 میلیمتر انجام شد. نتایج نشان داد که در نمونه‌ای با عمق نفوذ صفر، به دلیل عدم تولید حرارت کافی و تغییرشکل پلاستیک مناسب و متعاقب آن ایجاد عیوبی مانند نقص‌های تونلی اتفاق افتاد. با افزایش عمق نفوذ ابزار به 0/05 میلیمتر، ترکیبات بین‌فلزی Al_3Ni_2، Al_7Cu_4Ni و $Cu_{3.8}Ni$ به صورت یکنواخت و نازک در ناحیه فصل مشترک تشکیل شده و منجر به بهبود کیفیت اتصال و افزایش استحکام کششی تا 185/2 مگاپاسکال و کرنش شکست 8/7 درصد شد. در نمونه‌ای با عمق نفوذ 0/1 میلیمتر، ترکیبات بین‌فلزی ضخیم‌تر تشکیل شدند که با وجود افزایش سختی موضعی، منجر به کاهش استحکام کششی و کرنش شکست به ترتیب به 136/6 مگاپاسکال و 6/7 درصد گردید. این مطالعه نشان می‌دهد که در شرایط تهیه نمونه‌های جوشکاری در تحقیق حاضر، عمق نفوذ 0/05 میلیمتر بهینه‌ترین شرایط را برای جوشکاری همزن اصطکاکی لب روی هم آلومینیم-مس در حضور پودر نیکل فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: جوشکاری همزن اصطکاکی، مس، آلومینیم، پودر نیکل.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: اکبر حیدرزاده، ac.heydarzadeh@azaruniv.ac.ir

1- مقدمه

جوشکاری فلزات و آلیاژهای غیرهم‌جنس به دلیل تفاوت‌های فیزیکی و مکانیکی بین این مواد، چالش‌هایی را ایجاد می‌کند که نیاز به تحقیقات گسترده دارد [1, 2]. یکی از مشکلات اصلی در روش‌های جوشکاری ذوبی معمولی، تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ترد و ضخیم است که خواص مکانیکی اتصالات غیرهم‌جنس را تخریب می‌کند [3, 4]. روش‌های جوشکاری حالت جامد به دلیل دمای فرایند پایین‌تر، راه‌حلی بالقوه ارائه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.03]

می‌دهند که می‌تواند تشکیل ترکیبات بین‌فلزی را کاهش دهد [4]. جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW) به عنوان یک تکنیک برجسته جوشکاری حالت جامد شناخته شده است و توجه زیادی به دلیل قابلیت‌های متنوع خود، از جمله جوشکاری همزن اصطکاکی لب‌روی‌هم (FSLW)، به خود جلب کرده است [5]. FSLW آلومینیم و مس به طور گسترده‌ای توسط پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است [6-12]. از دیدگاه متالورژیکی، تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که ترکیبات بین‌فلزی مانند Al_4Cu_9، AlCu و Al_2Cu در ناحیه فصل مشترک این جوش‌ها تشکیل می‌شوند که به دلیل ذات تردی‌شان می‌توانند تأثیرات قابل توجهی بر استحکام و انعطاف‌پذیری اتصالات داشته باشند [3, 10, 11]. برای مثال، عبدالله‌زاده و همکاران [12] در بررسی خواص ریزساختاری و مکانیکی جوش‌های اصطکاکی آلومینیم 1060 و مس خالص، تشکیل ترکیبات بین‌فلزی Al_4Cu_9، AlCu و Al_2Cu را گزارش کرده‌اند که بر استحکام برشی اتصالات تأثیرگذار بوده‌اند. همچنین، گالوو و همکاران [9] آلیاژهای آلومینیوم قابل عملیات حرارتی 6068 و غیر قابل عملیات حرارتی 5083 را به مس به روشFSLW جوشکاری کردند. در جوش آلیاژ 5083 به مس، عیوب داخلی ناشی از اختلاط نامناسب مواد مشاهده شد، در حالی‌که در مورد جوش آلیاژ 5083 به مس، اختلاط مواد به صورت یکنواخت‌تری شکل گرفت. جیانگ و همکاران [8]، آلیاژ آلومینیوم 5083 و مس T2 را با استفاده به روش متصل کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در سمت سمت پسرونده، یک ساختار متناوب Al/Cu به همراه ناحیه غنی از مس شکل گرفت. در محل اتصال، ترکیبات بین‌فلزی Al_2Cu و Al_4Cu_9 بدون تشکیل AlCu ایجاد شد. همچنین، تبلور مجدد دینامیکی و افزایش چگالی نابجایی‌ها باعث تقویت استحکام اتصال شد. استحکام نهایی اتصال حدود 80 درصد از استحکام آلیاژ آلومینیوم پایه 5083 بود. احمدی و همکاران [7]، ریزساختار و سختی اتصالات آلومینیم و مس تولید شده به روش FSLW را بررسی کردند. ایشان، تشکیل ترکیبات بین‌فلزی مختلف از قبیل Al_4Cu_9، AlCu، Al_2Cu، $AlCu_4$ و Al_2Cu_3 در ناحیه جوش را دلیل افزایش سختی گزارش کرده‌اند. نریمانی و همکاران [6]، تاثیر رزوه پین ابزار بر نحوه سیلان مواد و خواص مکانیکی در FSLW آلیاژ 6065 آلومینیم و مس خالص را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که در پارامترهای ثابت جریان داخلی مواد توسط پین رزوه‌ای بهتر از پین ساده است. همچنین، بیشینه استحکام اتصال تولید شده با پین رزوه‌ای حدود 345 مگاپاسکال با ازدیاد طول 2/6 میلیمتر و اتصال تولید شده با پین ساده حدود 272 مگاپاسکال و ازدیاد طول 2/2 میلیمتر بود که در سرعت دورانی 1130 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 24 میلیمتر بر دقیقه حاصل شد.

یکی از رویکردهای نویدبخش برای مقابله با چالش‌های مربوط به تردی ترکیبات بین‌فلزی، استفاده از لایه‌های واسط به منظور کنترل نوع و ضخامت این ترکیبات در جوش‌های همزن اصطکاکی آلومینیم و مس است. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از لایه‌های واسط مختلف، مانند روی و نقره، می‌تواند به بهبود خواص ریزساختاری و مکانیکی جوش‌های آلومینیم-مس کمک کند. برای مثال، عبدالله‌زاده و همکاران [13] با استفاده از لایه واسط روی، فازهای بین‌فلزی Al_2Cu، $CuZn_5$ و $CuZn_2$ را مشاهده کردند. لیو و همکاران [14] به منظور بهبود کیفیت جوش نقطه‌ای همزن اصطکاکی آلومینیوم و مس، از ورق‌های روی با ضخامت‌های مختلف به عنوان لایه واسط استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که ضخامت ورق روی تأثیر قابل توجهی بر مورفولوژی فصل‌مشترک و ضخامت ترکیبات بین‌فلزی دارد. ساختار و ترکیب لایه بین‌فلزی در اتصالات با افزودن روی مشابه بود، اما با افزایش ضخامت ورق روی، ضخامت لایه بین‌فلزی نیز افزایش یافت. همچنین، اتصال با ضخامت 0/02 میلیمتر ورق روی، حداکثر بار برشی کششی 6/84 کیلو نیوتن را به دست آورد که 0/52 کیلو نیوتن بیشتر از اتصال بدون ورق روی بود. پایاک و همکاران [15] به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های همزن اصطکاکی آلومینیوم 6101 و مس C11000 با و بدون لایه‌های واسط نقره و روی پرداخت. نتایج نشان داد که جوش با لایه‌های واسط ترکیبی بالاترین استحکام کششی را داشت که بیشتر از جوش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

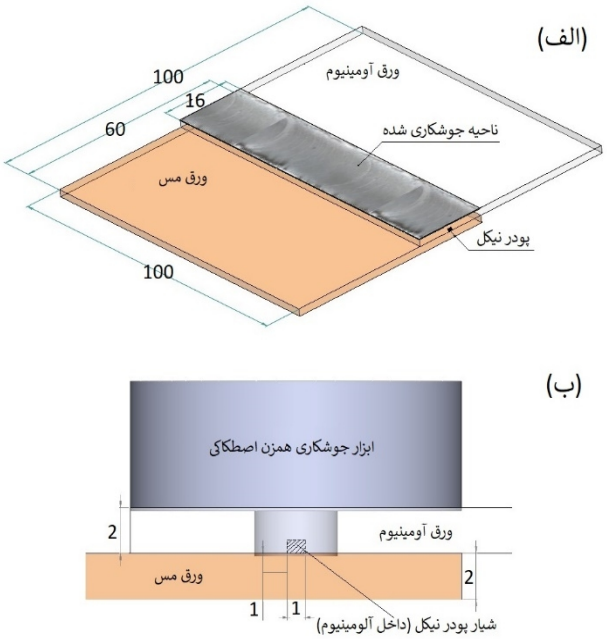
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.03]

بدون لایه واسط بود. بهبود استحکام ناشی از توزیع یکنواخت ترکیبات بین‌فلزی نازک ایجاد شده توسط روی و ترکیب Ag_2Al بود. در مطالعه این پژوهشگران، کاهش تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ترد در جوش‌های با لایه‌های واسط تأیید شد.

با وجود تحقیقات گسترده در مورد تأثیر لایه‌های واسط بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های همزن اصطکاکی آلومینیم و مس، استفاده از پودر نیکل به عنوان یک ماده واسط در FSLW هنوز به طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر استفاده از پودر نیکل به عنوان لایه واسط در FSLW بین صفحات آلومینیم و مس انجام شده است. علاوه بر این، تأثیر میزان عمق نفوذ ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های حاصل نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

2- روش پژوهش

برای انجام FSLW، آلومینیم 1050 و مس خالص تجاری به صورت صفحات با ابعاد 150 میلیمتر در طول، 100 میلیمتر در عرض و ضخامت 2 میلیمتر به عنوان فلزهای پایه استفاده شدند. پودر نیکل با اندازه ذرات متوسط حدود 47 میکرومتر به عنوان لایه واسط استفاده شد. پودر نیکل به یک شیار تراشیده شده به عرض و عمق 1 میلیمتر در کف ورق آلومینیم اضافه گردید. نحوه قرارگیری ورق‌ها و نیز محل قرارگیری شیار حاوی پودر نیکل همانطور در شکل 1-الف نشان داده شده است. پس از این مراحل، FSLW با استفاده از ابزار فولاد گرم-کار با قطر شانه، قطر و ارتفاع پین به ترتیب برابر با 16، 4 و 2/1 میلیمتر، سرعت چرخش ابزار 950 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ابزار 85 میلیمتر بر دقیقه، زاویه ابزار 2 درجه و عمق نفوذ ابزار متفاوت برابر با صفر (نمونه 1)، 0/05 (نمونه 2) و 0/1 میلیمتر (نمونه 3) انجام شد. جهت اعمال عمق نفوذ ابزار، پس از تماس پیشانی شانه ابزار با سطح ورق آلومینیم، ابزار به ترتیب به اندازه صفر، 0/05 و 0/1 میلیمتر برای تولید نمونه‌های 1، 2 و 3 فرو داده شد. باید توجه داشت که در زمان تماس پیشانی شانه ابزار با سطح ورق آلومینیم، میزان فروروی پین ابزار به اندازه ارتفاع آن خواهد بود. بعبارتی، در زمان تماس پیشانی شانه ابزار با سطح ورق آلومینیم، پین ابزار به اندازه 0/1میلی‌متر (اختلاف ضخامت ورق فوقانی آلومینیم (2 میلیمتر) و ارتفاع پین (2/1 میلیمتر)) وارد ورق تحتانی مس خواهد شد. بنابراین، حتی در عمق نفوذ ابزار صفر نیز امکان ایجاد اغتشاش در ناحیه اتصال وجود خواهد داشت. در شکل 1-ب، نحوه قرارگیری ابزار جوشکاری نسبت به ورق‌ها و شیار حاوی پودر نیکل نشان داده شده است.



شکل1-الف- شماتیک ابعاد و نحوه قرارگیری ورق‌های آلومینیم و مس. ب- شماتیک نحوه قرارگیری ابزار جوشکاری همزن اصطکاکی نسبت به ورق‌ها و محل اضافه شدن پودر نیکل در شیار داخل ورق آلومینیم. ابعاد بر حسب میلیمتر نوشته شده‌اند.

جهت بررسی ریزساختار نمونه‌ها، میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (SEM) مجهز به طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) به کار برده شد. نمونه‌های بریده شده از سطح مقطع عمود بر جهت جوشکاری پس از سمباده‌زنی و پولیش مکانیکی تحت حکاکی قرار گرفتند. برای آشکارسازی ریزساختار در سمت مس، از اچ شیمیایی با محلول رنگی استفاده شد که ترکیب آن شامل 20 گرم اسید کرومیک، 2 گرم سولفات سدیم، 1/7 میلی‌لیتر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.03]

اسید کلریدریک با غلظت 35% در 100 میلی‌لیتر آب مقطر بود. سطح آلومینیم با استفاده از محلول بارکر (2/5 درصد حجمی اسید فلوئوروبوریک) با ولتاژ 20 ولت و مدت زمان 180 ثانیه تحت حکاکی الکتروشیمیایی قرار گرفت. برای بررسی خواص مکانیکی اتصالات به دست آمده، نمونه‌های کشش عمود بر جهت جوشکاری بریده شد و با نرخ کرنش 1 میلیمتر بر دقیقه تحت آزمون کشش قرار گرفتند.

3- نتایج و بحث

در شکل 2، ماکروساختار مقطع عرضی نمونه‌های جوشکاری شده نشان داده شده است. در بررسی عیوب، مشاهده می‌شود که نمونه 1 (با عمق نفوذ صفر میلیمتر) حاوی نقص‌های تونلی (شکل 2-الف) می‌باشد. این نقص‌ها عمدتاً به دلیل عدم نفوذ کافی ابزار و عدم ایجاد حرارت و تغییرشکل پلاستیک مناسب برای تولید پیوند مؤثر بین آلومینیم و مس به وجود آمده‌اند. در واقع، افزایش عمق نفوذ ابزار باعث افزایش نیروی عمودی اعمال‌شده توسط ابزار می‌شود [16].

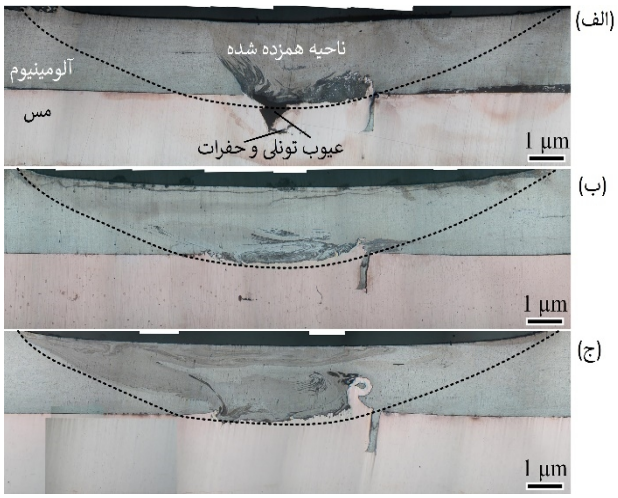
افزایش نیروی عمودی منجر به افزایش اصطکاک بین ابزار و ماده و در نتیجه تولید حرارت بیشتر در ناحیه جوش می‌گردد. این افزایش حرارت به نوبه خود باعث تسهیل تغییر شکل پلاستیک و بهبود اختلاط مواد در ناحیه جوش می‌شود، که در نهایت منجر به کاهش عیوب و بهبود کیفیت اتصال می‌گردد [16, 17]. همین موضوع سبب عدم توزیع مناسب و آگلومره شدن پودر نیکل در زمینه آلومینیم شده است که مانع از عملکرد مناسب پودر در حین تشکیل ساختار جوش می‌گردد.

در مقابل با توجه به شکل‌های 2-ب و ج، نمونه‌های 2 و 3، که با عمق نفوذهای 0,05 و 0,1 میلیمتر به ترتیب جوش داده شده‌اند، فاقد عیوب حفره‌ای اعم از نقص تونلی هستند و پودر نیکل توزیع بهتری در زمینه آلومینیم پیدا کرده است. بنابراین، در نمونه‌های 2 و 3، بهبود کیفیت جوش به دلیل نفوذ کافی ابزار (تولید حرارت و تغییرشکل پلاستیک کافی) برای سیلان و اختلاط مناسب ورق‌های آلومینیم و مس میسر گردیده است.

در شکل 3-الف، ریزساختار معمول مربوط به ناحیه مرکزی هم‌زده (SZ) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ناحیه SZ نمونه‌ها حاوی تکه‌های مس پخش‌شده در زمینه آلومینیم بوده که در توافق کامل با پژوهش‌های انجام شده قبلی در زمینه FSW آلیاژهای آلومینیم و مس می‌باشد [18]. در شکل‌های 3-ب الی ج، ریزساختار مربوط به ناحیه فصل مشترک بین آلومینیم و مس در نمونه‌های مختلف نشان داده است. در نمونه 1 (شکل 3-ب)، به دلیل عدم نفوذ کافی ابزار و متعاقب آن وجود حفرات، در فصل مشترک هیچ‌گونه ترکیب بین‌فلزی مشاهده نشد که تایید دیگری بر عدم ایجاد اتصال مناسب می‌باشد. در نمونه 2 (شکل 3-ج)، فازهای بین‌فلزی محتمل به صورت لایه‌های نازک و یکنواخت تشکیل شده‌اند. در ادامه مقاله، از نتایج تحلیل‌های SEM و EDS استفاده شده که به طور دقیق حضور این فازهای بین‌فلزی را تأیید خواهد کرد. این شرایط به دلیل استفاده از عمق نفوذ مناسب ابزار و ایجاد حرارت کافی برای تشکیل ترکیبات بین‌فلزی کمک کرده است. در نمونه 3 (شکل 3-د)، با افزایش میزان عمق نفوذ ابزار به 0/1 میلی‌متر، ترکیبات بین‌فلزی ضخیم‌تر و بزرگتر تشکیل شده که به دلیل افزایش دما و زمان در معرض حرارت بالا ایجاد شده است. این تغییرات می‌توانند به کاهش یکنواختی ساختار و کیفیت جوش منجر شوند. از تصاویر OM نمونه‌های 2 و 3 در شکل 3، با توجه به رنگ فازهای موجود (خاکستری تیره و روشن) می‌توان به تشکیل فازهای بین‌فلزی مشابه در هر دو نمونه پی برد. باید توجه داشت که تفاوت رنگ مشاهده شده در تصاویر میکروسکوپ نوری می‌تواند به عنوان یک راهنمای اولیه برای شناسایی کیفی فازهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. این تفاوت رنگ ناشی از استفاده عمدی از فرایند اچ رنگی است که به منظور بهبود شناسایی فازها در میکروسکوپ نوری به کار گرفته شد. نکته قابل توجه دیگر در فصل‌مشترک نمونه‌های 2 و3، وجود لایه میانی ضخیم (زرد رنگ) بین مس و ترکیبات بین‌فلزی می‌باشد. این لایه میانی در واقع نشان‌دهنده یک ناحیه نفوذی و محلول جامد مس-نیکل می‌باشد که از تغییرات ناگهانی ساختار در فصل‌مشترک جلوگیری می‌کند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

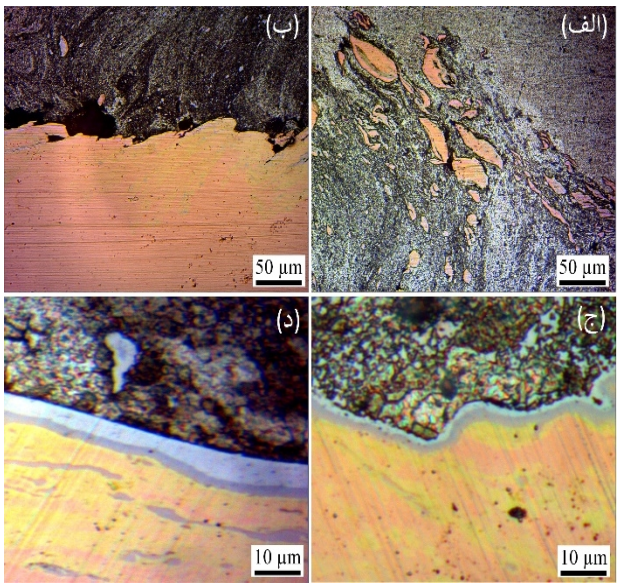
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.03]



شکل2- ماکروساختار مربوط به نمونه‌های مختلف در جهت عمود بر جهت جوشکاری همزن اصطکاکی

الف- نمونه 1 (عمق نفوذ صفر)، ب- نمونه 2 (عمق نفوذ 0/05 میلیمتر) و ج- نمونه 3 (عمق نفوذ 0/1 میلیمتر).

تفاوت دیگر در فصل‌مشترک نمونه‌های 2 و3، ساختار موجی شکل آن در نمونه 2 در مقایسه با ساختار صاف در نمونه 3 می‌باشد که می‌تواند معرف اثر قفل مکانیکی و اتصال بهتر در نمونه 2 باشد. جهت بررسی دقیق‌تر ترکیبات بین‌فلزی در ادامه نتایج SEM و EDS نمونه‌های 2 و 3 بررسی خواهند شد.

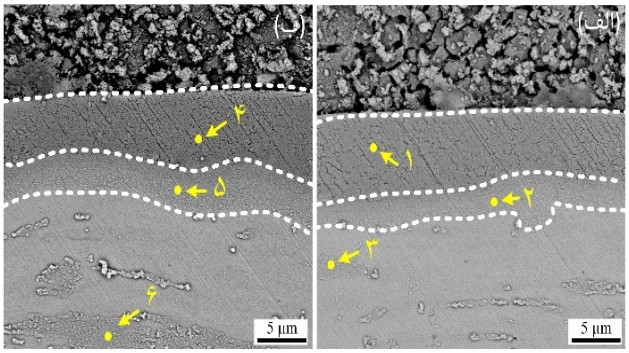


شکل3-الف- ریزساختار معمول (نمونه 2) مربوط به ناحیه مرکزی هم‌زده که حاوی تکه‌های مس پخش‌شده در زمینه آلومینیم است. ریزساختار مربوط به ناحیه فصل مشترک بین آلومینیم و مس در نمونه‌های مختلف

ب- نمونه 1 (عمق نفوذ صفر)، ج- نمونه 2 (عمق نفوذ 0/05 میلیمتر) و د- نمونه 3 (عمق نفوذ 0/1 میلیمتر).

تصاویر SEM و EDS از ناحیه فصل‌مشترک بین آلومینیم و مس نمونه‌های 2 و 3 به ترتیب در شکل‌های 4 و 5 نشان داده شده است. نقاط 1 الی 6 در شکل 4، بیانگر نقاط مربوط به نتایج EDS متناظر در شکل 5 می‌باشند. با توجه به شکل‌های 4 و 5، در نمونه‌های 2 و3، ترکیبات بین‌فلزی مشابه اعم از Al_3Ni_2، Al_7Cu_4Ni و $Cu_{3.8}Ni$ به ترتیب در نقاط 1 و4، 2 و 5، 3 و 6 تشکیل شده‌اند.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در اثر جوشکاری، ترکیبات بین‌فلزی مشابه در فصل‌مشترک نمونه‌های 2 و 3 به وجود آمده است و تفاوت آن‌ها در ضخامت می‌باشد. در نمونه 2، ترکیبات بین‌فلزی به صورت لایه‌های نازک تشکیل شده‌اند. در نمونه 3، با افزایش عمق نفوذ ابزار، ترکیبات بین‌فلزی به صورت لایه‌های ضخیم‌تر مشاهده می‌شوند که نشان‌دهنده تأثیر دما و زمان بیشتر در تشکیل این فازها است. این پدیده با نتایج تحقیقات مشابه در زمینه تاثیر عمق نفوذ و نیروی عمودی ابزار هم‌راستا است [16, 17].



شکل4-تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ناحیه فصل مشترک بین آلومینیم و مس

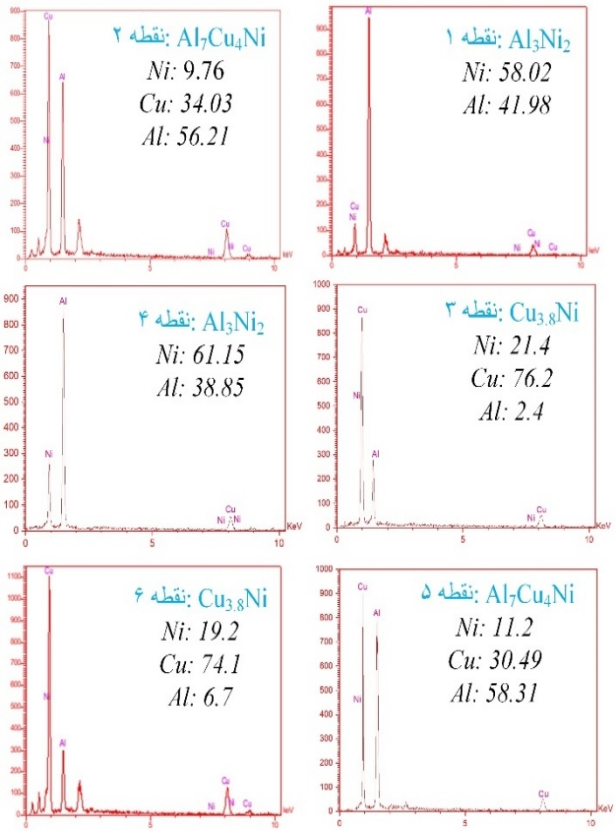
الف- نمونه 2 (عمق نفوذ 0/05 میلیمتر) و ب- نمونه 3 (عمق نفوذ 0/1 میلیمتر)، نقاط 1 الی 3 در نمونه 2 و نقاط 4 الی 6 در نمونه 3 بیانگر نقاط مربوط به نتایج طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) در شکل 5 می‌باشند.

به دلیل وجود عیوب در نمونه 1، خواص مکانیکی فقط نمونه‌های 2 و 3 مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. در واقع، نمونه 1 با عمق نفوذ صفر، ضعیف‌ترین خواص مکانیکی را دارد که به دلیل عدم توزیع مناسب پودر نیکل و تشکیل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

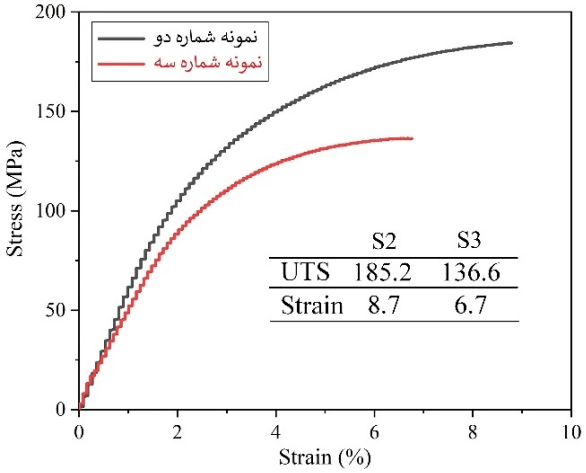
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.03]

نقص‌های تونلی و حفره‌ای شکل است. این نقص‌ها و عدم پیوند مناسب باعث کاهش استحکام جوش می‌شود. نتایج آزمون کشش در شکل 6 نشان داده شده است که بیانگر مقادیر استحکام کششی نهایی و کرنش شکست برابر با 185/2 مگاپاسکال- 8/7 درصد و 136/6 مگاپاسکال – 6/7 درصد به ترتیب برای نمونه‌های 2 و 3 می‌باشد. بنابراین، در بین نمونه‌های جوشکاری شده، نمونه 2 بهترین عملکرد را از نظر خواص کششی دارا می‌باشد. در واقع، عمق نفوذ مناسب ابزار باعث ایجاد شرایط بهینه برای جوش و اختلاط شده که بهبود خواص مکانیکی را به همراه داشته است.

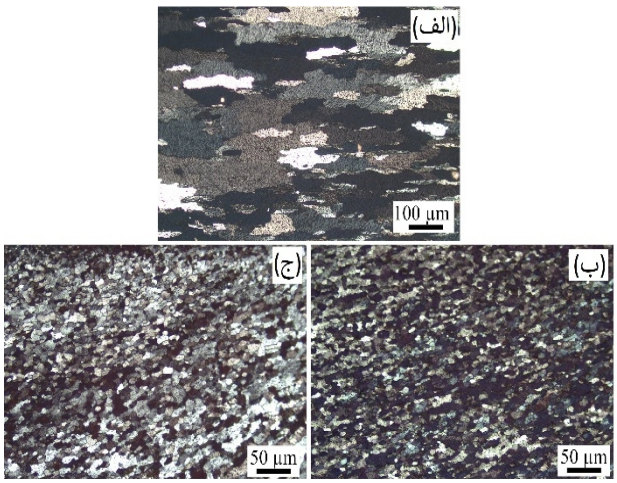


شکل5-نتایج طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) نقاط 1 الی 3 در نمونه 2 و نقاط 4 الی 6 در نمونه 3 در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل 4.

در شکل 7، تصاویر میکروسکوپ نوری ساختار دانه‌بندی فلز پایه و ناحیه همزده در سمت ورق آلومینیم نمونه‌های 2 و 3 نشان داده شده است که بیانگر تاثیر FSLW بر ریزدانه شدن در اثر سازوکار تبلورمجدد دینامیکی می‌باشد [3]. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که اندازه دانه در نمونه‌های 2 و3 به ترتیب برابر با 7/3 و 7/9 میکرومتر بوده که حاکی از اختلاف جزئی آن‌ها است. بنابراین، سازوکار استحکام‌بخشی از طریق مرزدانه‌ها براساس رابطه هال-پچ [19] در نمونه‌های 2 و3 به دلیل تفاوت جزیی در اندازه دانه نمی‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در اختلاف استحکام دو نمونه داشته باشد.



شکل 6- نتایج آزمون کشش نمونه 2 (عمق نفوذ 0/05 میلیمتر) و نمونه 3 (عمق نفوذ 0/1 میلیمتر).



شکل7-ریزساختار فلز پایه
الف- ناحیه همزده نمونه 2 ب- و ناحیه همزده نمونه 3
ج- در سمت ورق آلومینیم.

به طور مشابه، سایر سازوکارهای استحکام‌بخشی از قبیل اثر عناصر محلول، نابجایی و رسوب‌سختی [20-22] به دلیل یکسان بودن ترکیب شیمیایی و سازوکار پیدایش ریزساختار، پیش‌بینی می‌شود در نمونه‌های 2 و 3 برابر تقریبا برابر باشند. در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.03]

نتیجه، مشابه با پژوهش‌های انجام شده در زمینه جوشکاری غیرهمجنس آلیاژهای آلومینیم و مس، تفاوت در خواص مکانیکی نهایی نمونه‌های 2 و 3 تحت تاثیر ریزساختار ناحیه فصل‌مشترک می‌باشد. به عبارتی، در نمونه 3، تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ضخیم‌تر، استحکام و کرنش شکست کمتری را نسبت به نمونه 2 ایجاد کرده است. با وجود اینکه ترکیبات بین‌فلزی ضخیم‌تر می‌توانند سختی بیشتری را در جوش تامین کنند، اما این لایه‌های ضخیم معمولاً شکننده هستند و در نتیجه استحکام و کرنش شکست کلی جوش را کاهش می‌دهند. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از پودرنیکل برای FSLW آلیاژهای مس و آلومینیم به شرطی می‌تواند موثر واقع شود که از عمق نفوذ ابزار برابر با 0/05 میلیمتر در جهت رفع عیوب و نیز تشکیل ترکیبات بین‌فلزی نازک در ناحیه فصل‌مشترک، استفاده شود.

4- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیر استفاده از پودر نیکل به عنوان لایه واسط و عمق نفوذ ابزار بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های همزن اصطکاکی لب‌روی‌هم آلومینیم 1050 و مس خالص تجاری پرداخت. نتایج زیر را می‌توان برای این پژوهش دسته‌بندی کرد:

-در سال‌های اخیر، یکی از چالش‌های اصلی در جوشکاری فلزات غیرهم‌جنس مانند آلومینیوم و مس، تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ترد در ناحیه جوش است که به شدت بر خواص مکانیکی اتصالات تأثیر منفی می‌گذارد. این موضوع به‌ویژه در صنایع الکترونیک و برق که نیاز به اتصالات آلومینیوم-مس دارند، اهمیت بسیاری دارد. در این تحقیق، استفاده از پودر نیکل به‌عنوان یک لایه واسط بین آلومینیوم و مس در جوشکاری FSLW نشان داد که پودر نیکل موجب بهبود خواص مکانیکی اتصالات می‌شود. از دیدگاه صنعتی، این روش به دلیل هزینه پایین‌تر نیکل نسبت به مواد گران‌قیمت‌تر مانند نقره و طلا که در برخی تحقیقات به‌عنوان لایه‌های واسط استفاده می‌شوند، می‌تواند راه‌حلی‌اقتصادی برای بهبود استحکام و دوام اتصالات آلومینیوم-مس ارائه دهد.

- مشاهدات ریزساختاری: در نمونه‌ای که با عمق نفوذ صفر میلی‌متر جوش داده شده بود، عدم ایجاد حرارت کافی و تغییرشکل پلاستیک مناسب منجر به ایجاد نقص‌های تونلی شد که کیفیت جوش را به طور قابل توجهی کاهش داد. در مقابل، در عمق نفوذ 0/05 میلیمتر، لایه‌های بین‌فلزی نازک و یکنواخت در ناحیه فصل مشترک تشکیل شدند که به بهبود جوش کمک کردند. با افزایش عمق نفوذ به 0/01 میلیمتر، ترکیبات بین‌فلزی ضخیم‌تر و کمتر یکنواخت تشکیل شدند که بر یکنواختی ساختاری جوش تأثیر منفی گذاشت.

- خواص مکانیکی: نمونه‌ای که با عمق نفوذ 0/05 میلیمتر جوش داده شد، بهترین استحکام کششی و کرنش شکست را نشان داد، که بیانگر بهینه بودن این عمق برای دستیابی به تعادل مناسب بین تشکیل ترکیبات بین‌فلزی و سالم‌بودن جوش است. در مقابل، عمق نفوذ 0/01 میلیمتر، در حالی که ترکیبات بین‌فلزی ضخیم‌تری را ایجاد کرد، منجر به کاهش استحکام کششی و انعطاف‌پذیری به دلیل شکنندگی این ترکیبات و عدم یکنواختی ساختاری در ناحیه فصل مشترک شد.

- موثر بودن لایه نیکل: استفاده از پودر نیکل به عنوان لایه واسط، به تشکیل ترکیبات بین‌فلزی مفیدی مانند Al_3Ni_2، Al_7Cu_4Ni و $Cu_{3.8}Ni$ کمک کرد که در ترکیب با عمق نفوذ مناسب ابزار، خواص مکانیکی کلی جوش را بهبود بخشید.

- بطور خلاصه، این تحقیق نشان می‌دهد که بهینه‌سازی عمق نفوذ ابزار برای حداکثر کردن مزایای استفاده از لایه واسط پودر نیکل در جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژهای آلومینیم و مس اهمیت زیادی دارد. این موضوع، اهمیت بهینه‌سازی پارامترهای فرایند را در دستیابی به نتایج مطلوب جوش‌های همزن اصطکاکی نشان می‌دهد.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرا شده به شماره قرارداد ط-1400/1514 از محل اعتبار ویژه پژوهشی(Grant) دانشگاه شهید مدنی آذربایجان می‌باشد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.03]

منابع

1-Çam G, Javaheri V, Heidarzadeh A. 2022. Advances in FSW and FSSW of dissimilar Al-alloy plates. Journal of Adhesion Science and Technology:1-33.

2-Khodai Delouei I, Sabet H, Abouei Mehrizi V. 2019. The effect of transvers speeds on microstructure and mechanical properties of the AA2024 to AA6061 joint welded by FSW. JWSTI.4(2):71-86.

3-Heidarzadeh A, Mironov S, Kaibyshev R, Çam G, Simar A, Gerlich A, et al. 2021. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. Progress in Materials Science:100752.

4-Abasi Baharanchi M, Askari SB. 2019. Dissimilar Welding of EN 10025 Carbon Steel to AISI 316L Stainless Steel by Friction Stir Welding. JWSTI.5(1):13-29.

5-Nandan R, DebRoy T, Bhadeshia HKDH. 2.008.Recent advances in friction-stir welding–process, weldment structure and properties. Progress in materials science.53(6):980-1023.

6-Narimani R, Eliasi M, Hosseinzadeh M, Aghajani Derazkola H. 2019. Effect of Tool Pin Threat on the Material Flow and Mechanical Properties Friction Stir Welding of 6061 Aluminum Alloy to Copper. JWSTI.5(1):125-36.

7-Ahmadi M, Ahmadi HR, Khanzadeh MR, Bakhtiari H. 2023. Investigation of microstructure, hardness and intermetallic compound in friction stir welding of AA1 ۰۵۰aluminum alloy to copper. JWSTI.9(1):31-8.

8-Jiang F, Wang W, Zhang X, Gong W. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welding Joint of Al/CU Dissimilar Metals. Metals [Internet]. 2023; 13(12).

9-Galvão I, Verdera D, Gesto D, Loureiro A, Rodrigues DM. 2013. Influence of aluminium alloy type on dissimilar friction stir lap welding of aluminium to copper. Journal of Materials Processing Technology.213(11):1920-8.

10-Meng X, Huang Y, Cao J, Shen J, dos Santos JF. 2021. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding. Progress in Materials Science.115:100706.

11-Mishra RS, Ma Z. 2005. Friction stir welding and processing. Materials science and engineering: R: reports.50(1-2):1-78.

12-Abdollah-Zadeh A, Saeid T, Sazgari B. 2008. Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints. Journal of Alloys and Compounds.460(1):535-8.

13-Abdollahzadeh A, Bagheri B, Vaneghi AH, Shamsipur A, Mirsalehi SE. 2022. Advances in simulation and experimental study on intermetallic formation and thermomechanical evolution of Al–Cu composite with Zn interlayer: Effect of spot pass and shoulder diameter during the pinless friction stir spot welding process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 237(6):1475-94.

14-Liu H, Ma L, Gong P, Dong J, Yue Y. 2023. Friction Stir Spot Welding of Al–Cu with Different Zn Foils. Transactions of the Indian Institute of Metals.76(4):979-88.

15-Payak V, Paulraj J, Roy BS, Bhargava M, Choudhury S. 2023. Microstructural and mechanical characteristics of friction stir welded Al6101/C11000 joints with zinc and silver interlayer. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.128(3):1419-39.

16-Chen D, Li J, Zhao H, Tan Z, Xiong J. 2020. Effect of Submillimeter Variation in Plunge Depth on Microstructure and Mechanical Properties of FSLW 2A12 Aluminum Alloy Joints. Acta Metallurgica Sinica (English Letters).33(1),71-165.

17-Banik A, Saha Roy B, Deb Barma J, Saha SC. 2018. An experimental investigation of torque and force generation for varying tool tilt angles and their effects on microstructure and mechanical properties: Friction stir welding of AA 6061-T6. Journal of Manufacturing Processes.31:395-404.

18-Mehta KP, Badheka VJ. 2016. A review on dissimilar friction stir welding of copper to aluminum: process, properties, and variants. Materials and Manufacturing Processes.31(3):233-54.

19-Hansen N. 2004. Hall–Petch relation and boundary strengthening. Scripta materialia. 51(8): 801-6.

20-Huskins E, Cao B, Ramesh K. 2010. Strengthening mechanisms in an Al–Mg alloy. Materials Science and Engineering: A.527(6):1292-8.

21-Abd El-Aty A, Xu Y, Guo X, Zhang S-H, Ma Y, Chen D. 2018. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review. Journal of advanced research.10:49-67.

22-Ryen Ø, Holmedal B, Nijs O, Nes E, Sjölander E, Ekström H-E. 2006. Strengthening mechanisms in solid solution aluminum alloys. Metallurgical and Materials Transactions A.37:1999-2006.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.03]