ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(2):99-108

The Effect of Plastic Deformation Induced Rolling on the Mechanical Properties of Dissimilar Al/Cu Joints Produced by Friction Stir Welding

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Sonboli A.[1*] *PhD*,
Beygi R.[1] *PhD*,
Alirezaie Majd Kohneh M. H.[1] *MSc*

How to cite this article
Sonboli A, Beygi r, Alirezaie Majd Kohneh M H. The Effect of Plastic Deformation Induced Rolling on the Mechanical Properties of Dissimilar Al/Cu Joints Produced by Friction Stir Welding. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(2):99-108.

ABSTRACT

In this study, aluminum-to-copper welding was performed by friction stir welding (FSW) process and then the mechanical properties of the joints were evaluated and compared with the ones rolled to reductions of 30 and 60 percent.Ultimate Tensile strengths (UTS) of the joints were 99 MPa, 143 MPa, and 132 MPa, for the initial weld, 30% rolling reduction, and 60% rolling reduction, respectively and in the non-rolled weld specimen, fracture occurred from the aluminum base material but in rolled welds, the fracture occurred precisely from the weld interface. Microstructural studies of the weld region and fracture surface of the specimens showed that the Al4Cu9 and Al3Cu intermetallic compounds, which are the most common intermetallic compounds in this type of dissimilar joining, formed in these areas. The presence of these compounds at the weld interface and propagation cracking during rolling has been one of the important factors in the failure of the weld interface in the rolled specimens. Results of the hardness test also confirmed the existence of these intermetallic compounds. By increasing the percentage of rolling reduction from 30% to 60%, the welding strength decreased due to the increase in the number of micro-cracks of the intermetallic compounds. Finally, it can be said that by choosing the optimal percentage reduction in the rolling process (30%), the ultimate tensile strength of dissimilar Al/Cu joints produced by friction stir welding (FSW) can be significantly increased (about 43%).

Keywords Friction Stir Welding, Plastic Deformation, Rolling, Mechanical Properties, Dissimilar Al / Cu joints

[1] School of Materials Engineering and metallurgy, Arak University, Arak, Iran,

Correspondence
Address: School of Materials Engineering and metallurgy, Arak University, Arak, Iran,
Phone: +989362780248
Fax: -
a-sonboli@araku.ac.ir

Article History
Received: September 09, 2020
Accepted: November 11, 2020
ePublished: February 16, 2021

CITATION LINKS

[1] Solid-state flow visualization in the friction-stir welding ... [2] Mechanical and microstructural behavior ... [3] Effect of tool position on the fatigue properties of dissimilar ... [4] Process–microstructure–property correlations ... [5] Stress corrosion cracking susceptibility of friction stir welded ... [6] Microstructural evolution in the friction stir welded ... [7] Joining of aluminum alloy to steel ... [8] Friction stir welding process of dissimilar metals ... [9] Electrical performance of laser braze-welded ... [10] Growth rate of intermetallic compounds ... [11] Enhanced strength and ductility of friction stir ... [12] Experimental and theoretical analysis of friction stir welding ... [13] Effect of post-weld heat treatment on friction welded joint ... [14] Microstructure and XRD analysis of FSW joints ... [15] Dissimilar friction stir welding ... [16] Microstructure and mechanical properties of dissimilar ... [17] Butt joining of Al–Cu bilayer sheet ... [18] Microstructural evolution and fracture behavior ... [19] Influence of tool geometry on material flow ... [20] ASTM E8 / E8M ... [21] ASTM E3-11... [22] Tool wear in the friction-stir welding of aluminum alloy ... [23] Mechanical metallurgy ... [24] Imaging with Secondary and Backscattered Electrons ... [25] Is scanning electron microscopy ... [26] Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al–Cu joints ... [27] Metals handbook: properties and selection ... [28] Microstructural aspects in Al–Cu dissimilar joining ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

تاثیر تغییرشکل پلاستیک ناشی از نورد بر خواص مکانیکی اتصالات غیرمشابه Al/Cu تولید شده به روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی

علی سنبلی *PhD
استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژي، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
رضا بیگی PhD
استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژي، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
محمدحسین علیرضائی مجدآباد کهنه MSc
کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژي، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده
در این پژوهش، ابتدا جوشکاری آلومینیوم به مس با استفاده از فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی انجام شد و سپس خواص مکانیکی حاصل از تغییرشکل پلاستیک ناشی از نورد، با ۳۰ و ۶۰ درصد کاهش در ضخامت بررسی و با نمونه جوشکاری شده بدون نورد مقایسه شد. نتایج آزمون کشش نشان داد که استحکام کششی نهایی نمونه‌ها به ترتیب برای نمونه جوشکاری شده بدون نورد، ۹۹ مگاپاسکال، ۳۰ درصد کاهش در ضخامت،۱۴۳ مگاپاسکال و ۶۰ درصد کاهش در ضخامت، ۱۳۲ مگاپاسکال بوده و در نمونه جوشکاری شده بدون نورد، شکست از زمینه آلومینیومی رخ داده است ولی در حالت نورد شده با ۳۰ و ۶۰ درصد کاهش در ضخامت، شکست دقیقاً از مرز جوش بوده است. بررسی‌های ریزساختاری منطقه جوش و سطح شکست نمونه‌ها نشان داد که ترکیبات بین‌فلزی Al_4Cu_9 و Al_3Cu که از شایع‌ترین ترکیبات بین فلزی دراین نوع اتصالات غیر مشابه است، در این نواحی به‌وجود آمده است. به وجود آمدن این نوع ترکیبات در مرز جوش، یکی از عوامل مهم شکست از مرز اتصال در نمونه‌های جوشکاری و نورد شده است. نتایج سختی سنجی نیز وجود این ترکیبات بین‌فلزی را اثبات کرد. با افزایش درصد کاهش در ضخامت نورد از ۳۰ به ۶۰، استحکام جوش با افزایش میکروترک‌ها، ناشی از همین ترکیبات بین فلزی، کاهش یافته است. در نهایت می‌توان گفت با انتخاب بهینه درصد کاهش در ضخامت در فرآیند نورد (۳۰ درصد)، می‌توان استحکام کششی نهایی نمونه‌های غیر مشابه Al/Cu جوشکاری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی را به میزان قابل توجه (حدود ۴۳ %) افزایش داد.

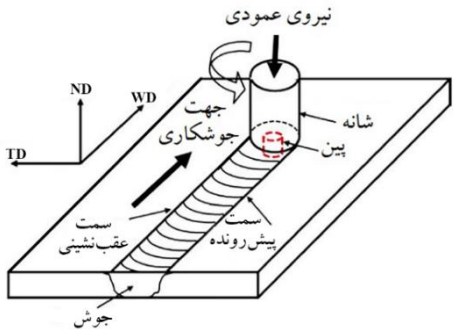
کلیدواژه‌ها: تغییرشکل پلاستیک، نورد، خواص مکانیکی، اتصالات غیر مشابهAl/Cu، جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۲
*نویسنده مسئول: a-sonboli@araku.ac.ir

۱- مقدمه
روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی(FSW) روشي مناسب جهت اتصال فلزات و آلیاژهاي غیر همجنس است. مطالعاتي زیادی بر روي اتصال انواع آلیاژهاي آلومینیوم به هم[1-5]، آلومینیوم به مس[6]، آلومینیوم به منیزیوم، آلومینیوم به فولاد[7] و منیزیوم به منیزیوم[8] صورت پذیرفته است. جوش‌هاي حاصل معمولا داراي حفرات بزرگ، و ناخالصي‌هاي اکسیدي در ریشه جوش هستند. به علاوه، موقعیت دو آلیاژ غیرهمجنس تأثیر مشخصي بر روي الگوي سیلان ماده و کیفیت جوش حاصل از خود نشان مي‌دهد. به عنوان مثال واتانابه و همکاران[7] اتصال فولاد را به آلیاژ A5083 آلومینیوم توسط روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی(FSW) بررسي کردند. مشاهدات آنها نشان داد که تنها در سرعت جوشکاري مشخصي جوشِ بدون عیب قابل حصول است. در سرعت‌های پایین‌تر گرمای لازم برای ذوب فلز ایجاد نمی‌شود و پین پس از مدت کوتاهی فرسوده می‌شود. اما در سرعت‌های بالای جوشکاری، گرمای زیاد ایجاد شده سبب می‌شود که منیزیم موجود در آلومینیوم از بین برود و جوش بی کیفیتی حاصل شود. همچنین آنها با بررسي استحکام جوش حاصل، استحکام کششي بیشینه اتصال را زمانیکه پین ۰/۲ میلیمتر نسبت به خط مرکزي جوش به سمت فولاد قرار دارد، بدست آوردند. تحقیقات آنها نشان داد که اگر میزان تمایل پین به سمت فولاد از این مقدار بیشتر شود فولاد به درون زمینه آلومینیوم پاشیده می‌شود.

در این میان آلومینیوم (Al) و مس (Cu) دو ماده مهندسی رایج هستند که به دلیل مقاومت در برابر خوردگی عالی، قابلیت انعطاف‌پذیری و هدایت الکتریکی بالا به طور گسترده در صنایع هوافضا، حمل و نقل و انتقال حرارت و الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرند[8-13] و اخیرا اتصال دو فلز غیرمشابه نظیر آلومینیوم و مس به دلیل افزایش کارایی و دلایل تکنیکی مورد توجه مهندسین قرار گرفته است. از جمله مزایای اتصال این دو فلز به یکدیگر کاهش هزینه‌ها به دلیل جایگزینی فلز ارزان‌تر می‌باشد. از طرفی به دلیل تفاوت زیاد در خواص فیزیکی این دو فلز اتصال آنها به یکدیگر بسیار مشکل است. روش‌های زیادی برای اتصال این دو فلز به یکدیگر به کار برده شده که با مشکلات زیادی از قبیل اکسیداسیون و ایجاد حفره و ترک رو به رو بوده است[6,14] روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی(FSW) که به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است، یکی از روش‌هایی است که به عنوان یک روش نوین برای اتصالات غیر مشابه[15,16] این مشکلات را مرتفع ساخته است، اما خود با مشکلاتی مواجه است که از آن جمله می‌توان به عدم صافی سطح و اعوجاج نمونه‌ها اشاره کرد. همچنین در این روش وجود ترکیب‌های بین فلزی از قبیل Al_2Cu، AlCu و Al_4Cu_9 باعث کاهش استحکام اتصالات می‌شود[6].

البته اینکه ابزار، مس را وارد منطقه آلومینیوم کند یا آلومینیوم را وارد زمینه مسی کند، بر تعداد و مقدار این ترکیبات اثر دارد. به‌طورکلی ورود مس به زمینه آلومینیومی، می‌تواند تا حد زیادی از تشکیل ترکیبات بین فلزی جلوگیری کند[6].



شکل ۱) شماتیک روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی(FSW) و دستگاه مختصات واقع بر نمونه
جهت جوشکاری :WD، جهت عرضی :TD و جهت عمودی :ND

در زمینه اتصال دو فلز غیر همجنس Al/Cu از طریق فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی (FSW)، اویانگ و همکاران[6]، تحولات ریزساختاري اتصال FSW آلیاژ ۶۰۶۱ به مس را بررسي کردند. آنها تشکیل ترکیبات بین فلزي را مشکل اصلي در ایجاد اتصال سالم برشمردند و به مطالعه ترکیبات بین فلزي تشکیل شده پرداختند. همچنین استفاده از میان لایه براي ایجاد جوش سالم را پیشنهاد کردند. همچنین بیگی و همکارانش از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۸ تحقیقاتی را در این زمینه انجام داده اند[17-19] که در نتایج این مطالعات وجود ترکیبات بین فلزی در مرز جوش و در زمینه آلومینیوم دلیلی بر کاهش استحکام جوش ذکر شده است. در جوشکاری غیر هم جنس آلومینیوم به مس با روش جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، نوع ترکیبات بین فلزی و توزیع و اندازه آن‌ها نقش اساسی در تعیین خواص مکانیکی اتصال دارند. به طور معمول ترکیبات بین فلزی به صورت ساختار لایه‌ای در زمینه مس توزیع می‌شوند و مکان‌های شکست در آزمون کشش عمدتا همین ترکیبات بین فلزی هستند[17]. بیگی و همکاران[18] در جوشکاری غیر هم جنس آلومینیم به مس گزارش کرده‌اند که نحوه قرارگیری ابزار نقش مهمی در نوع و توزیع ترکیبات بین فلزی در محل اتصال دارد. آن‌ها همچنین گزارش کرده‌اند که وجود این ترکیبات در کنار عیوبی مانند میکروترک‌ها به میزان قابل توجهی استحکام اتصال را کاهش می‌دهد[19].

یکی از فرآیندهایی که امروزه برای بهبود خواص مکانیکی(افزایش استحکام) اکثر فلزات و آلیاژها مورد استفاده قرار می‌گیرد فرآیند نورد است و با توجه به مطالب بیان شده چنین به نظر می‌رسد که فرایند نورد می‌تواند در راستای تامین استحکام بالا در این اتصالات غیر هم‌جنس کارامد بوده و به عنوان یک عملیات تکمیلی در ساخت و تولید این اتصالات غیر همجنس مطرح شود. از طرفی فرایند نورد می‌تواند تنش‌های کششی و اعوجاج به وجود آمده در قطعه ناشی از فرایند FSW را از بین ببرد. از طرفی دیده شد که در ارتباط با عملیات نورد پس از فرآیند FSW کاری صورت نگرفته است. همچنین اتصال ورق‌های نازک (زیر ۲میلی‌متر) با جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی با مشکلات تکنیکی عمده‌ای روبرواست و فرآیند نورد می‌تواند به منظور تولید این ورق‌ها از ورق‌های ضخیم‌تر که جوشکاری شده‌اند مورد استفاده قرار بگیرد. یکی از اهداف پژوهش حاضر امکان‌سنجی این مورد است. این نگاه دوسویه یعنی دستیابی به یک اتصال غیر مشابه آلومینیوم/مس با ضخامت پایین و استحکام بالا، ایده‌ی اصلی این پژوهش است. لذا در این پژوهش به بررسی تاثیر پارامترهای تغییرشکل پلاستیک ناشی از نورد سرد بر خواص مکانیکی اتصالات غیر مشابه آلومینیوم به مس با روش اصطکاکی-اغتشاشی و بهینه‌سازی و رفع مشکلات بیان شده در این زمینه پرداخته شده است. بدین منظور نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW در طی دو مرحله تحت نورد سرد قرار گرفته و ریزساختار و خواص مکانیکی آنها با نمونه جوشکاری شده بدون نورد سرد مقایسه شده است. در ادامه چگونگی انجام آزمایش‌ها و نتایج حاصل از این پژوهش آمده است.

۲- مواد و روش انجام آزمایش‌ها

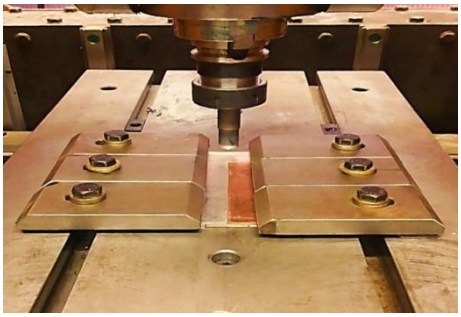
۲-۱- تهیه نمونه،آماده سازی و انجام فرآیند جوشکاری و نورد

در این پژوهش از ورق‌های مس و آلومینیوم مطابق جدول ۱ استفاده شده است. ابعاد نمونه‌ها توسط دستگاه برش به ۳ × ۵۰ × ۱۳۰ میلی‌متر رسید و با یک برس سیمی و توسط استون تمیزکاری شد تا لایه‌های اکسیدی آن از بین رفته و آماده برای فرآیند جوشکاری FSW شود.

پس از برش نمونه‌ها و تمیزکاری، به منظور فرآیند جوشکاری FSW، نمونه‌ها همانند شکل ۲ به صورت ثابت کنار یکدیگر قرار گرفتند به گونه‌ای که فلز با استحکام بالاتر(مس) در سمت راست(پیش رونده) و فلز با استحکام پایین‌تر(آلومینیم) در سمت چپ قرار گرفت. جنس پین از فولاد گرمکار H13 انتخاب و هندسه پین بر طبق پژوهش بیگی و همکاران[19] روی این اتصال انتخاب شد. در این حالت پین به صورت درجا بین ۵ تا ۸ ثانیه در جهت عقربه‌های ساعت با سرعت ۹۵۰ دور بر دقیقه چرخیده و سپس به

جدول ۱) ویژگی‌های ورق‌های جوشکاری شده

جنس ورق	درصد خلوص	ضخامت (mm)
آلومینیوم	۹۹/۵	۳
مس	۹۹/۹۹	۳



شکل ۲) دستگاه جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی و انجام جوشکاری با ابزار فولادی

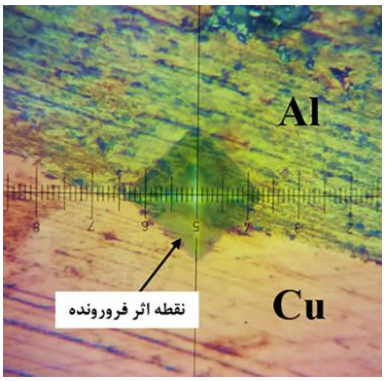
حرکت خود در راستای جوشکاری با سرعت پیشروی ۳۷/۵ میلی‌متر بر دقیقه ادامه داد. مس در سمت پیشرونده قرار گرفت و پین به میزان ۴ میلی‌متر در آلومینیوم و به اندازه یک میلی‌متر در مس قرار گرفت. ابزار مورد استفاده دارای یک شانه به قطر ۱۸ میلی‌متر و یک پین به قطر ۵ میلی‌متر و ارتفاع ۴/۷ میلی‌متر بود. بعد از تراشکاری نمونه‌ها و به دست آمدن یک سطح صاف به منظور انجام کار مکانیکی، اتصالات ایجاد شده تحت نورد سرد با کاهش در ضخامت‌های ۳۰ و ۶۰ درصد قرار گرفته به گونه‌ای که تمامی پارامترهای فرآیند نورد ثابت در نظر گرفته شد. از این به بعد نمونه‌ی پس از جوشکاری قبل از نورد، نمونه صفر درصد نورد و نمونه‌های نورد سرد شده با کاهش در ضخامت‌های ۳۰ و ۶۰ درصد، به ترتیب ۳۰ درصد نورد و ۶۰ درصد نورد نامیده می‌شوند. بعد از نورد سرد نمونه‌ها باز با استفاده از استون تمیز شده تا هیچ‌گونه آلودگی روی نمونه‌ها باقی نماند.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمون کشش، ریزسختی و بررسی‌های ریزساختاری

برش‌کاری نمونه‌های صفر درصد نورد، ۳۰ درصد نورد و ۶۰ درصد نورد بر طبق استاندارد ASTM-E8 در ابعاد مناسب به منظور آزمون کشش انجام شد[20]. همچنین برای انجام ریزسختی در فاصله مناسب از سطح مقطع برش داده شده، سختی بر حسب ویکرز برای دو نمونه قبل از نورد و بعد از ۳۰ درصد نورد اندازه‌گیری شده است. از هرکدام از نمونه‌ها سه عدد نمونه جهت آزمون کشش، ریز سختی، متالوگرافی، قبل و بعد از نورد تهیه شد.

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی به صورت موضعی از آزمون ریزسختی‌سنجی به روش ویکرز و مقدار بار اعمالی ۰/۲ کیلوگرم و زمان اعمال بار ۱۵ ثانیه استفاده شد. در این نوع سختی سنجی فرورونده از نوع هرم مربع القاعده می‌باشد. نمونه‌ای از نقطه اثر فرورونده در فصل مشترک اتصال در شکل ۳ آمده است.

بعد از برش نمونه‌ها به عرض تقریبی یک سانتی‌متر به دلیل کوچک بودن سطح مقطع برای بررسی‌های ریز ساختاری که نحوه برش‌کاری و تهیه آن‌ها در شکل ۴ آمده است، از مانت سرد استفاده شد.



شکل ۳) نقطه اثر فرورونده ریز سختی سنجی به روش ویکرز در فصل مشترک اتصال

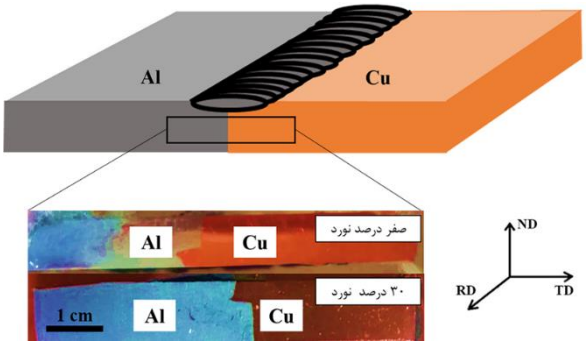
به منظور مشاهدات ریزساختاری، آماده‌سازی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E3 - 11 انجام شد[21] به گونه‌ای که سنباده زنی از شماره ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ و بعد از آن با دستگاه پولیش و خمیر الماسه آخرین مراحل آماده‌سازی برای بررسی ریزساختار با میکروسکوپ نوری انجام شد. به منظور مشاهده هم زمان ریزساختار آلومینیوم و مس با میکروسکوپ نوري (OM) با مارک تجاری Genius از محلولی شامل ۱۹۰ میلی‌لیتر آب مقطر، ۲ میلی‌لیتر اسید هیدروفلوئوریک، ۳ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک و ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک برای اچ کردن نمونه‌ها استفاده شد. به منظور مطالعه سطح شکست و ترکیبات بین فلزی به ترتیب از میکروسکوپ الکتروني روبشي (SEM) و روش طیف سنجي انرژي اشعه ایکس (EDS) بهره برده شد.

۳- نتایج و بحث

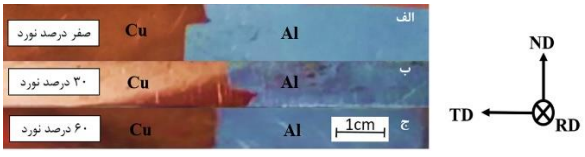
۳-۱- بررسی تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود دو فلز آلومینیم و مس توسط روش FSW به یکدیگر متصل شده و هیچگونه عیوب ظاهری در تصاویر ماکروسکوپی به چشم نمی‌خورد. شکل ۵ ب و ج مرحله اول و دوم نورد پس از جوشکاری را نشان می‌دهد (۳۰ درصد نورد و ۶۰ درصد نورد) که خود بیان کننده اتصال موفق پس از تغییرشکل پلاستیک است.

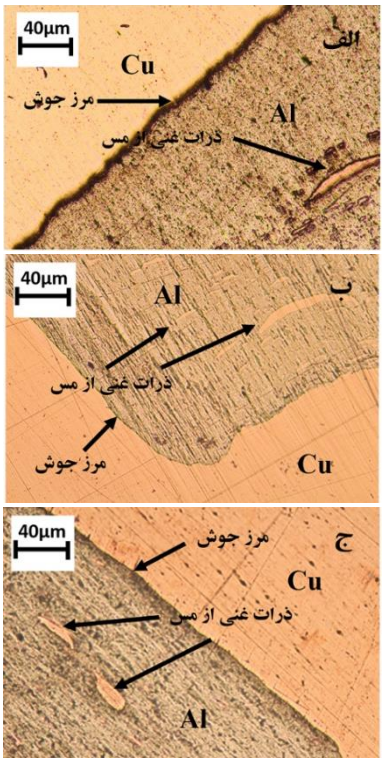
برای بررسی دقیق‌تر منطقه اتصال، تصویر میکروسکوپی مربوط به منطقه جوش با بزرگنمایی‌های یکسان در شکل ۶ آمده است. شکل ۶ الف مربوط به نمونه صفر درصد نورد، نشان می‌دهد که ذرات غنی از مس در زمینه آلومینیم قرار گرفته است. این مساله در شکل ۶ ب و ج برای نمونه ۳۰ درصد نورد و ۶۰ درصد نورد نیز وجود دارد.



شکل ۴) چگونگی برش و آماده‌سازی نمونه‌های قبل از نورد و بعد از ۳۰ درصد نورد برای بررسی‌های ریز ساختاری و همچنین سختی سنجی



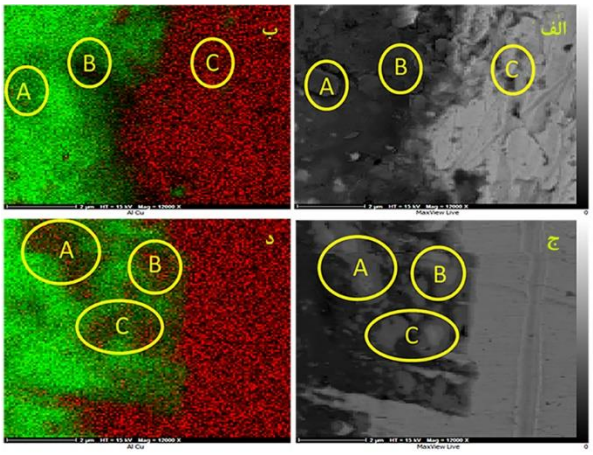
شکل ۵) تصاویر ماکروسکوپی نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW الف) صفر درصد نورد، ب) ۳۰ درصد نورد و ج) ۶۰ درصد نورد



شکل ۶) تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW الف) صفر درصد نورد، ب) ۳۰ دزصد نورد و ج) ۶۰ درصد نورد

به منظور اثبات وجود این ذرات و فازهای غنی از مس، از نقشه EDS کمک گرفته شده و نتایج آن در شکل ۷ آورده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود نقاط متناظر با تصویر SEM در نقشه EDS (A، B و C) مربوط به فازهای غنی از مس می‌باشد که در زمینه آلومینیمی پراکنده شده‌اند.

زمینه مسی در حین جوشکاری در سمت پیش رونده اتصال بوده است و پین چرخان در زمینه آلومینیومی با یک لایه آلومینیوم که در حین چرخش به آن چسبیده است، مس را با خود به درون زمینه آلومینیوم آورده و باعث به وجود آمدن ذرات غنی از مس در نزدیکی خط اتصال شده است. توجه به این نکته ضروری است که شروع کردن جوشکاری از زمینه آلومینیومی می‌تواند از میزان این



شکل ۷) تصاویر SEM و نقشه EDS متناظر با آن برای نمونه‌های الف) و ب) صفر درصد نورد و ج) و د) ۳۰ درصد نورد

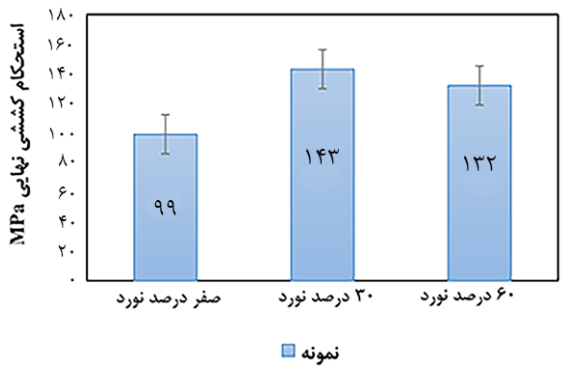
ذرات کم کند و یک جوش با استحکام بالا و انعطاف‌پذیری خوب حاصل شود. اما همان‌طور که بیان شد ترکیبات بین فلزی در منطقه جوش به وجود آمده که باعث می‌شود استحکام جوش کاهش پیدا کند[22] که همین مساله زمینه تحقیق پیش رو را فراهم آورده است. در بخش‌های بعدی به صورت دقیق‌تر تاثیر تغییرشکل پلاستیک بر خواص مکانیکی و ریزساختار بیان شده است.

۳-۲- بررسی استحکام جوش نمونه‌ها

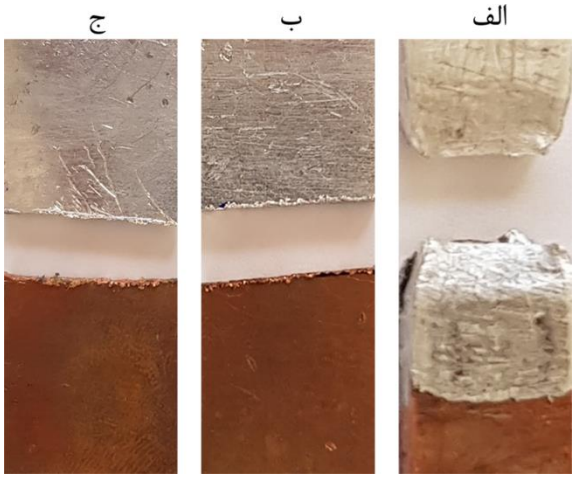
برای ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-E8 استفاده شد. نتایج استحکام کششی نهایی حاصل از انجام این آزمون برای هر سه نمونه صفر درصد نورد، ۳۰ درصد نورد و ۶۰ درصد نورد در شکل ۸ آمده است.

هدف از انجام کار پلاستیک افزایش استحکام اتصال دو فلز آلومینیوم و مس پس از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی(FSW) بود. همانطور که در این شکل دیده می‌شود پس از ۳۰ درصد کاهش در ضخامت بر اثر فرآیند نورد، استحکام کششی نهایی افزایش یافته و پس از ۶۰ درصد، این استحکام کاهش یافته است. دو نکته در این شکل قابل اهمیت است. نکته اول در خصوص افزایش استحکام هر دو نمونه نسبت به نمونه اولیه است. پس می‌توان گفت تغییرشکل پلاستیک بر اثر افزایش دانسیته نابجایی‌ها باعث افزایش استحکام در هر دو فلز آلومینیوم و مس شده[23]، که خود باعث افزایش استحکام کششی نهایی جوش در این اتصال شده است. نکته دوم کاهش استحکام با افزایش درصد کاهش در ضخامت پس از عملیات نورد از ۳۰ درصد به ۶۰ درصد می‌باشد. با توجه به شکل ۹ مشخص است که نمونه اولیه قبل از نورد (پس از جوشکاری) از زمینه آلومینیوم که دارای استحکام کمتری نسبت به فلز مس است، شکسته است.

این مساله بیان کننده این مطلب است که استحکام جوش از استحکام آلومینیوم بیشتر است. این در حالی است که در هر دو نمونه نورد شده، شکست از مرز اتصال رخ داده است. این مساله نیز بیان کننده این مطلب است که استحکام آلومینیوم به قدری بالا رفته است که از استحکام جوش بیشتر شده است. استحکام



شکل ۸) مقایسه میزان استحکام کششی نهایی در هر سه نمونه صفر، ۳۰ و ۶۰ درصد نورد.



شکل ۹) تصاویر ماکروسکوپی پس از شکست نمونه‌های آزمون کشش الف) صفر درصد نورد، ب) ۳۰ درصد نورد و ج) ۶۰ درصد نورد

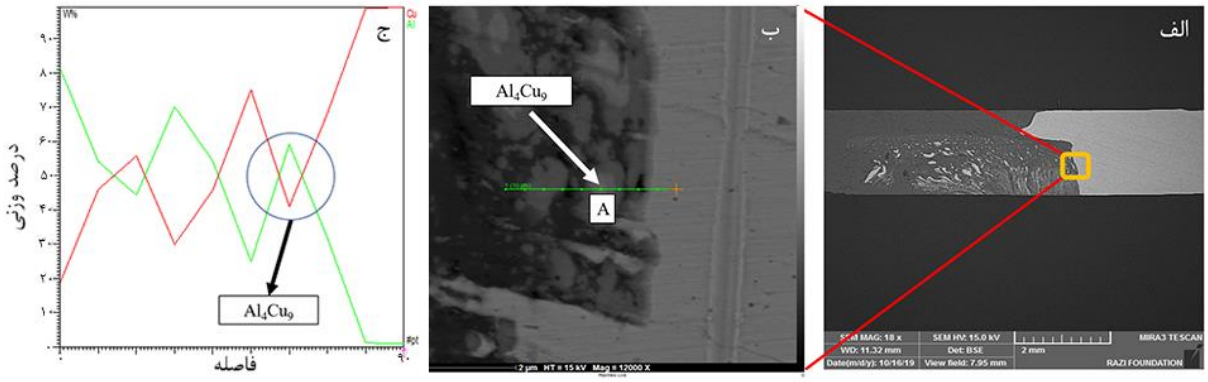
مس به دلیل مقدار انرژی نقص در چیده شدن (SFE) کمتر، نسبت به آلومینیوم، بیشتر است. پس از انجام تغییرشکل پلاستیک و فعال شدن منابع فرانک رید، چگالی ناجایی‌ها در هر دو فلز آلومینیوم و مس افزایش یافته، احتمال برخورد آن‌ها با یکدیگر افزایش می‌یابد. برخورد نابجایی‌ها با یکدیگر سبب ایجاد قفل‌های لومرکاترل (Lomer-Cottrell) شده و مانع حرکت نابجایی‌های آزاد در هر دو فلز می‌گردد. قفل شدن نابجایی‌ها و عدم حرکت آن‌ها به معنی افزایش استحکام در این فلزات است[23]. اما همانطور که بیان شد این افزایش استحکام در فلز آلومینیوم با استحکام کمتر نسبت به مس، به قدری بوده که از استحکام جوش نیز فراتر رفته است. در این حالت شکست از مرز جوش رخ داده است.

کاهش استحکام جوش در نمونه ۶۰ درصد نورد شده، بیان کننده این مطلب مهم است که انجام کار مکانیکی و تغییرشکل پلاستیک، همزمان با افزایش استحکام هر یک از دو فلز آلومینیوم و مس، سبب کاهش استحکام جوش می‌شود. برای تحلیل دقیق‌تر این موضوع، از تصاویر میکروسکوپ الکترنی روبشی (SEM) به منظور بررسی سطوح شکست استفاده شده است. ضمن این که در قسمت‌های بعدی این موضوع به طور مفصل و دقیق مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است، باید بیان کرد که در این تحقیق مشخص است که با انجام فرآیند نورد، می‌توان به استحکامی بالاتر از استحکام اولیه جوش دست یافت. البته میزان تغییرشکل بایستی بهینه باشد چرا که همزمان با افزایش استحکام دو فلز غیر مشابه جوشکاری شده، استحکام جوش نیز بر اثر تغییرشکل پلاستیک، کاهش می‌یابد. در یک جمله، در این مطالعه و تحقیق مشخص است که میزان کاهش در سطح مقطع پس از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی(FSW) دو فلز غیرمشابه Al/Cu در فرآیند نورد سرد به مقدار ۳۰ درصد می‌تواند استحکام کششی نهایی جوش را از ۱۵± ۹۹ مگاپاسکال به ۱۵± ۱۴۳ مگاپاسکال افزایش دهد(حدود ۴۳٪ افزایش در استحکام کششی نهایی).

۳-۳- بررسی تصویر SEM مقطع ND-TD و آنالیز EDS

با توجه به اینکه در تمامی نمونه‌های جوشکاری شده به روش FSW پس از نورد، شکست از مرز جوش رخ داده است، سطح شکست و مقطع ND-TD نمونه‌های نورد شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفته است.

قبل از بررسی سطح شکست نمونه‌های نورد شده، تصویر SEM مربوط به نمونه ۳۰ درصد نورد از مقطع ND-TD در شکل ۱۰ الف آمده است. در تصویر SEM با بزرگنمایی بالاتر، یعنی شکل ۱۰ ب، مسیر آنالیز عنصری به صورت خطی در شش نقطه متمایز از سمت فلز آلومینیوم به سمت مس نشان داده شده است. از آنجا که تصویر SEM مربوط به الکترون‌های برگشتی (BSE) می‌باشد تمامی نقاط در درون تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نقاط روشن‌تر مربوط به فاز غنی از مس، یعنی فاز غنی از عنصر سنگین‌تر (عدد جرمی بیشتر)، است و نقاط تیره‌تر مربوط به فاز غنی از آلومینیوم، یعنی فاز غنی از عنصر سبکتر(عدد جرمی کمتر)، می‌باشد[24]. برای مثال نقطه A در شکل ۱۰ ب به طور خاص مورد نظر قرار گرفته و با توجه به این که آنالیز عنصری EDS یک آنالیز نسبتا کیفی می‌باشد[25] و همواره از فاز زمینه نیز پراش‌هایی را در



شکل ۱۰) الف) تصویر SEM مقطع TD-ND نمونه ۳۰ درصد نورد، ب) تصویر SEM مقطع TD-ND نمونه ۳۰ درصد نورد در مرز جوش با بزرگنمایی بالاتر و ج) نمودار تغییرات درصد وزنی عناصر آلومینیوم و مس ناشی از آنالیز عنصری EDS متناظر با تصویر SEM

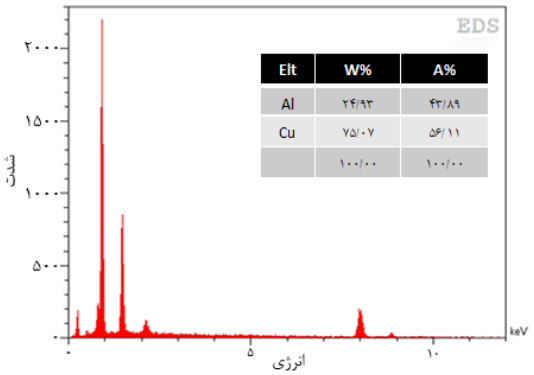
نظر می‌گیرد می‌توان احتمال وجود ترکیب بین فلزی $Al4Cu_9$ به عنوان یکی از مرسوم‌ترین ترکیبات بین فلزی در فرآیند FSW دو فلز غیر مشابه آلومینیوم و مس، در نظر گرفت[26].

شکل ۱۱ به طور دقیق‌تر آنالیز عنصری نقطه A متناظر با تصویر SEM مربوط به شکل ۱۰ الف را نشان می‌دهد.

۳-۴- بررسی تصاویر SEM سطوح شکست و آنالیز EDS

شکل ۱۲ تصاویر SEM مربوط به سطح شکست نمونه ۳۰ درصد نورد و آنالیز عنصری نقطه A است. به منظور تفکیک فاز غنی از مس و فاز غنی از آلومینیوم، در کنار تصویر ناشی از الکترون‌های ثانویه (SE)، تصویر ناشی از الکترون‌های برگشتی (BSE) آمده است. از آنجا که در قسمت قبلی حضور فاز غنی از مس در زمینه آلومینیوم و مرز جوش به اثبات رسید، در این بخش سطح شکست در سمت آلومینیوم مورد ارزیابی قرار گرفته است. در تصویر گرفته شده از الکترون‌های ثانویه مورفولوژی و توپوگرافی سطح شکست کاملا مشخص است. این در حالی است که تصویر ناشی از الکترون‌های برگشتی تفکیک فازی را به خوبی انجام می‌دهد[27]. به کمک آنالیز عنصری EDS که در این شکل به صورت نقطه‌ای انجام شده است (نقطه A)، وجود فاز غنی از مس(Al_4Cu_9) در سطح شکست به اثبات می‌رسد. وجود این ترکیبات بین فلزی ترد در مرز جوش می‌تواند دلیلی بر کاهش استحکام جوش باشد[28].

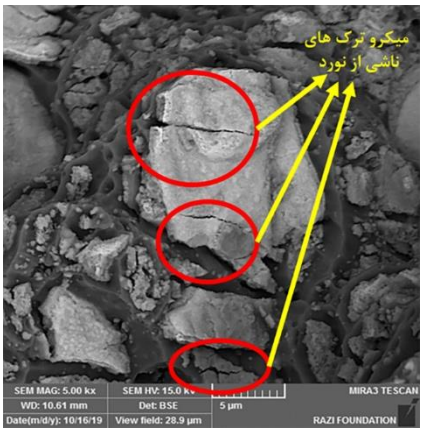
شکل ۱۳ میکروترک‌های به وجود آمده روی فاز ترد غنی از مس(Al_4Cu_9) را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل دیده



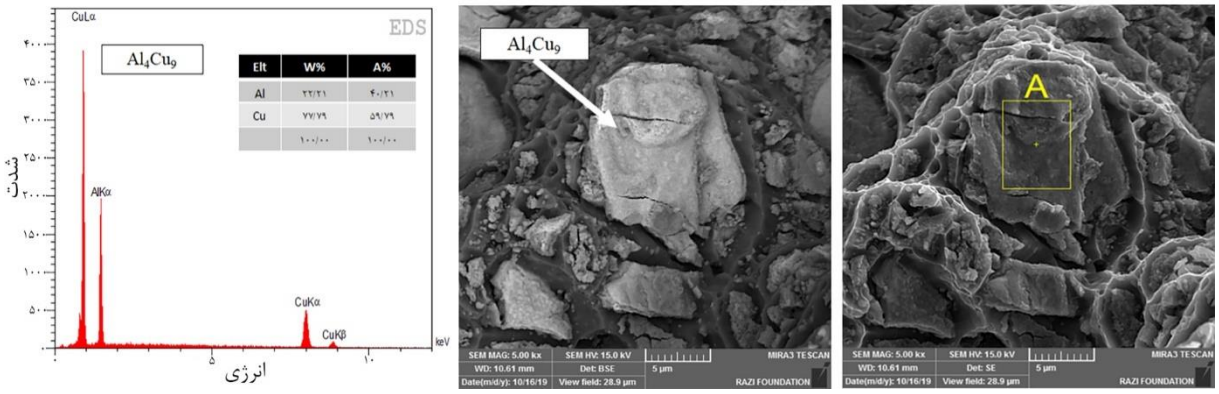
شکل ۱۱) آنالیز عنصری EDS نقطه A متناظر با تصویر SEM مربوط به شکل ۱۰ الف

می‌شود میکروترک‌ها در یک راستای مشخص (موازی با سطح نمونه کشش) و بیشتر از مرز بین فازی شروع به اشاعه کرده‌اند. در نتیجه می‌توان کاهش استحکام منطقه جوش پس از فرآیند نورد (تغییر شکل پلاستیک) را به وجود آمدن میکروترک‌ها در مرزهای فازی به ویژه فازهای ترد (ترکیبات بین فلزی) که خود در مرز جوش دیده می‌شوند مرتبط دانست. می‌توان اینگونه بیان کرد که این میکروترک‌ها در حین فرآیند نورد جوانه زده و در هنگام آزمون کشش اشاعه می‌یابند.

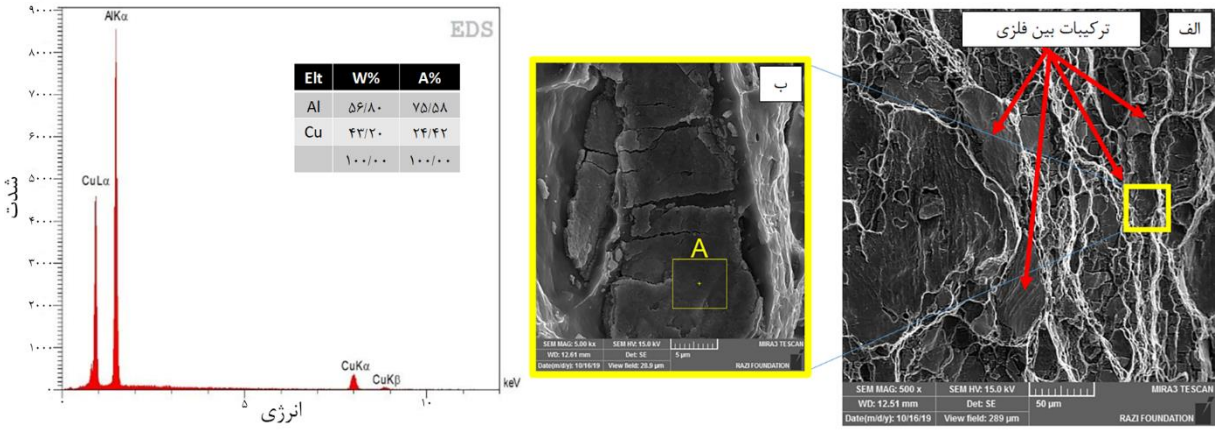
با بررسی تصویر SE از تصویر SEM سطح شکست از سمت مس از نمونه ۳۰ درصد نورد که در شکل ۱۴ نشان داده شده است می‌توان شکست نیمه ترد را مشاهده کرد. شکل ۱۴ الف شامل دیمپل‌ها (Dimples) و ترکیبات بین فلزی است که بیان کننده شکست نیمه ترد می‌باشد. این ترکیبات بین فلزی که در شکل ۱۴ الف با پیکان قرمز نشان داده شده‌اند در شکل ۱۴ ب با بزرگنمایی بالاتر در نقطه A مورد آنالیز عنصری EDS قرار گرفته و این بار ترکیب بین فلزی Al_3Cu روی سطح شکست به اثبات می‌رسد. میکروترک‌ها در روی این ترکیب بین فلزی نیز به خوبی در شکل ۱۴ الف قابل مشاهده است. این میکروترک‌ها که در هنگام نورد سرد جوانه زده‌اند باعث کاهش استحکام جوش در کنار افزایش استحکام مواد جوش می‌شوند[19, 28].



شکل ۱۳) میکروترک‌ها در سطح شکست نمونه ۳۰ درصد نورد در سمت آلومینیوم



شکل ۱۲) تصاویر BSE وآنالیز EDX مربوط به سطح شکست نمونه ۳۰ درصد نورد از سمت آلومینیوم

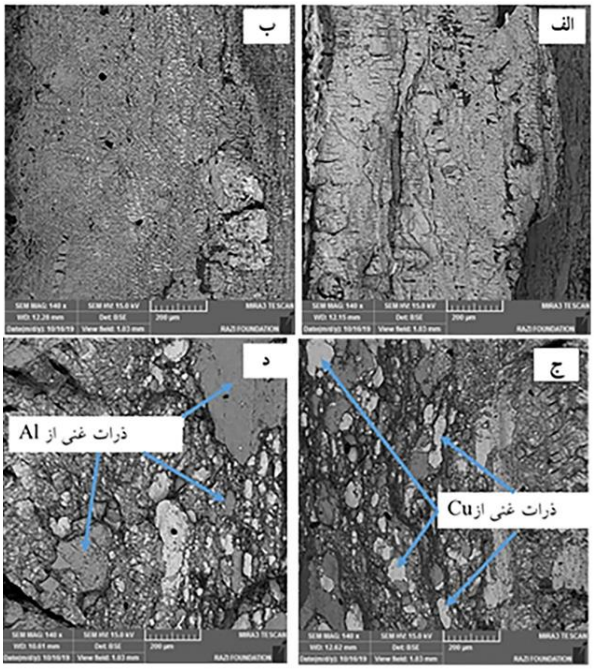


شکل ۱۴) تصاویر SE وآنالیز EDS مربوط به سطح شکست نمونه ۳۰ درصد نورد از سمت مس الف) بزرگنمایی ۵۰۰ و ب) بزرگ نمایی ۵۰۰۰

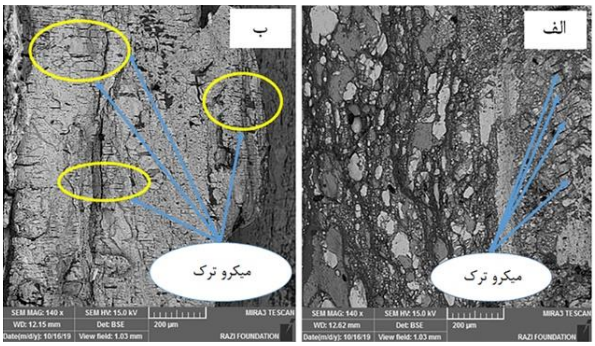
تا به اینجا درباره دلیل افزایش استحکام مواد جوش و کاهش استحکام جوش ناشی از تغییرشکل پلاستیک ایجاد شده توسط فرایند نورد صحبت شد. در قسمت بعدی سعی بر آن است که دلیل پیشی گرفتن کاهش استحکام جوش از افزایش استحکام مواد جوش با افزایش درصد کاهش در سطح مقطع در فرایند نورد سرد توضیح داده شود.

از آنجا که در هر دو نمونه جوشکاری شده پس از فرآیند نورد، شکست در آزمون کشش در مرز جوش رخ داده است می‌توان کنترل کننده استحکام جوش را همین میکروترک‌ها دانست. همانطور که قبلا بیان شد این میکروترک‌ها در مرز فازی یعنی مرز بین زمینه و ترکیبات میانی (ترکیبات بین فلزی) جوانه زده و در اثر تغییر شکل پلاستیک ناشی از آزمون کشش رشد می‌کنند. با توجه به این که فرآیند نورد یک فرآیند با شرایط تنش پیچیده (Complex) است، می‌تواند تعداد میکروترک‌های ایجاد شده در اثر این فرآیند با افزایش درصد کاهش در ضخامت، افزایش یابد. این مساله در شکل ۱۵ به خوبی دیده می‌شود.

با یک نگاه کلی به شکل ۱۵ درمی‌یابیم که سطح شکست برای نمونه ۳۰ درصد نورد کاملا متفاوت با نمونه ۶۰ درصد نورد است. با توجه به این که این تصویر به کمک BSE گرفته شده است می‌توان توزیع فازها را در تصویر مشاهده کرد به طوری که فاز غنی از مس به صورت روشن‌تر و فاز غنی از آلومینیوم تیره‌تر هستند. در نمونه ۶۰ درصد نورد، پیوستگی فاز غنی از مس دیده می‌شود. این در حالی است که در نمونه ۳۰ درصد نورد، این پیوستگی وجود ندارد. برای وضوح بیشتر در نمونه ۳۰ درصد نورد فازهای غنی از مس و آلومینیوم به ترتیب در شکل‌های ۱۵ ج و د نشان داده شده است. به منظور بررسی میکروترک‌های به وجود آمده در اثر تغییر شکل پلاستیک ناشی از نورد، نمونه ۳۰ درصد نورد با نمونه ۶۰ درصد نورد در شکل ۱۶ مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۵) تصاویر SEM سطح شکست نمونه الف) ۶۰ درصد نورد از سمت مس ب) ۶۰ درصد نورد از سمت آلومینیوم ج) ۳۰ درصد نورد از سمت مس د) ۳۰ درصد نورد از سمت آلومینیوم



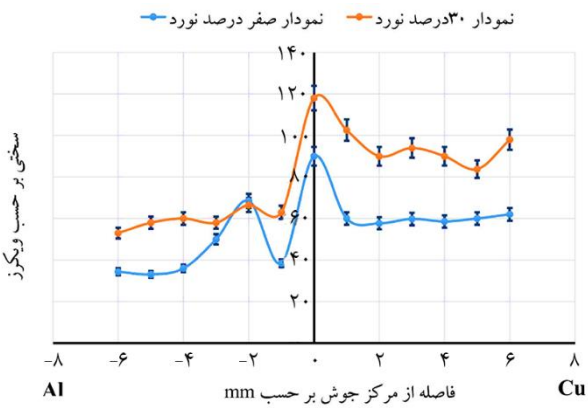
شکل ۱۶) میکروترک‌های ناشی از نورد در سطح شکست پس از آزمون کشش از سمت مس الف) نمونه ۳۰ درصد نورد ب) نمونه ۶۰ درصد نورد

همانطور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش میزان کاهش در سطح مقطع در فرایند نورد سرد، تعداد میکروترک‌ها افزایش یافته‌است. این افزایش تعداد میکروترک‌ها سبب کاهش استحکام نمونه در تست کشش شده است (به شکل ۸ رجوع کنید).

۳-۵- تحلیل نمودار ریز سختی مقطع TD-ND

شکل ۱۷ نمودار سختی مقطع TD-ND در مرکز جوش را برای نمونه جوشکاری شده قبل از نورد (نمونه‌ی صفر درصد نورد) و نمونه ۳۰ درصد نورد نشان می‌دهد. در این نمودار بالاتر بودن سختی فلز مس نسبت به آلومینیوم در هر دو نمونه به خوبی قابل مشاهده است. یعنی در این نمودار هر چه از سمت چپ (فلز آلومینیوم) به سمت راست (فلز مس) حرکت کنیم سختی افزایش می‌یابد. این افزایش سختی از آلومینیوم به مس را می‌توان به انرژی نقص در چیده شدن (SFE) این دو فلز مربوط دانست. از آنجا که انرژی نقص در چیده شدن مس پایین‌تر از فلز آلومینیوم است، پس سختی مس بالاتر از آلومینیوم می‌باشد[23]. نکته قابل اهمیت در این نمودار تاثیر تغییرشکل پلاستیک ناشی از نورد سرد بر سختی هر دو فلز است. دیده می‌شود که نمودار سختی نمونه ۳۰ درصد نورد شده نسبت به نمونه فقط جوشکاری شده (صفر درصد نورد) بالاتر است. دلیل افزایش سختی ناشی از تغییر شکل پلاستیک همان کارسختی و یا افزایش چگالی نابجایی‌ها در اثر تغییر شکل پلاستیک است. نکته دیگر در این نمودار، پیکی است که در مرکز جوش دیده می‌شود. این پیک می‌تواند ناشی از اندازه گیری سختی روی یکی از ترکیبات میانی (ترکیبات بین فلزی) مانند Al_4Cu_9 و Al3Cu، که وجود آن‌ها در مرز جوش در قسمت‌های قبلی اثبات شد.

جالب‌ترین نکته در این نمودار پیکی است که در ۲ میلی‌متری از مرکز جوش به سمت Al رخ داده است. این افزایش ناگهانی سختی ناشی از اندازه‌گیری آن روی یکی از ترکیبات بین فلزی است که باز هم در قسمت‌های قبلی ثابت شد که علاوه بر مرز جوش در سمت آلومینیوم تشکیل می‌شوند.



شکل ۱۷) نمودار سختی ویکرز بر حسب فاصله از مرکز جوش

۴- نتیجه‌گیری

۱. با فرآیند FSW می‌توان به یک اتصال سالم بین فلزات غیر هم جنس آلومینیوم ۱۰۵۰و مس خالص ۹۹/۹۹ درصد خلوص دست پیدا کرد.

۲. فرآیند نورد سرد پس از جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی استحکام جوش غیر مشابه Al/Cu را افزایش داد.

۳. در حین فرایند نورد سرد همواره دو مکانیزم در تعیین استحکام جوش در تقابل هستند: ۱- افزایش استحکام دو فلز پایه ناشی از کار سختی ۲- کاهش استحکام مرز اتصال ناشی از ایجاد میکروترک‌های بین فازی. این میکروترک‌ها عمدتا به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی Al_4Cu_9 و Al_3Cu که در زمینه آلومینیومی و مرز جوش تشکیل می‌شوند، به وجود آمده‌اند.

۴. در فرآیند نورد تا ۳۰ درصد کاهش در ضخامت، مکانیزم اول غالب است و افزایش استحکام کششی نهایی جوش ناشی از کارسختی دو فلز پایه مشهود است ولی با ادامه دادن فرآیند نورد و افزایش درصد کاهش در ضخامت از ۳۰ درصد به ۶۰ درصد، مکانیزم دوم غالب شده و کاهش در استحکام، ناشی از افزایش تعداد میکروترک‌هایی که از ترکیبات بین فلزی جوانه می‌زند، دیده می‌شود.

۵. با انتخاب بهینه درصد کاهش در ضخامت در فرآیند نورد (در این تحقیق ۳۰ درصد)، می‌توان استحکام نمونه‌های غیر مشابه Al/Cu جوشکاری شده به روش اصطکاکی-اغتشاشی را به میزان قابل توجه (حدود ۴۳ %) افزایش داد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر از طرح پژوهشی علی سنبلی با عنوان " تاثیر تغییرشکل پلاستیک ناشی از نورد بر خواص مکانیکی اتصالات غیر مشابه Al/Cu تولید شده به روش FSW " در دانشگاه اراک می‌باشد و هیچ‌گونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: علی سنبلی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی، تحلیل‌گر داده‌ها، نگارنده مقدمه، نگارنده بحث، درصد مشارکت ۵۰٪؛ رضا بیگی (نویسنده دوم)، پژوهشگر فرعی، تحلیل‌گر داده‌ها، روش‌شناس، درصد مشارکت ۲۵٪؛ محمدحسین علیرضائی مجدآباد کهنه (نویسنده سوم)، پژوهشگر فرعی، انجام کارهای آزمایشگاهی، درصد مشارکت ۲۵٪.

منابع مالی: منابع مالی توسط دانشگاه اراک تأمین شده است.

منابع

1- Li Y, Murr LE, McClure JC. Solid-state flow visualization in the friction-stir welding of 2024 Al to 6061 Al. Scripta materialia. 1999;40(9):1041-6.

2- Cavaliere P, Nobile R, Panella FW, Squillace A. Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006 ;46(6):588-94.

3- Cavaliere P, Panella F. Effect of tool position on the fatigue properties of dissimilar 2024-7075 sheets joined by friction stir welding. Journal of materials processing technology. 2008;206(1-3):249-55.

4- Altenkirch J, Steuwer A, Withers PJ. Process–microstructure–property correlations in Al–Li AA2199 friction stir welds. Science and Technology of Welding and Joining. 2010;15(6):522-7.

5- Srinivasan PB, Dietzel W, Zettler R, Dos Santos JF, Sivan V. Stress corrosion cracking susceptibility of friction stir welded AA7075–AA6056 dissimilar joint. Materials Science and Engineering: A. 2005;392(1-2):292-300.

6- Ouyang J, Yarrapareddy E, Kovacevic R. Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper. Journal of Materials Processing Technology. 2006;172(1):110-22.

7- Watanabe T, Takayama H, Yanagisawa A. Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding. Journal of Materials Processing Technology. 2006;178(1-3):342-9.

8- Fu B, Qin G, Li F, Meng X, Zhang J, Wu C. Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061-T6 aluminum alloy to AZ31B magnesium alloy. Journal of Materials Processing Technology. 2015;218:38-47.

9- Solchenbach T, Plapper P, Cai W. Electrical performance of laser braze-welded aluminum–copper interconnects. Journal of Manufacturing Processes. 2014 ;16(2):183-9.

10- Abbasi M, Taheri AK, Salehi MT. Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. Journal of Alloys and Compounds. 2001;319(1-2):233-41.

11- Xue P, Xiao BL, Ma ZY. Enhanced strength and ductility of friction stir processed Cu–Al alloys with abundant twin boundaries. Scripta Materialia. 2013 ;68(9):751-4.

12- Al-Roubaiy AO, Nabat SM, Batako AD. Experimental and theoretical analysis of friction stir welding of Al–Cu joints. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014;71(9-12):1631-42.

13- Ma H, Qin G, Geng P, Li F, Meng X, Fu B. Effect of post-weld heat treatment on friction welded joint of carbon steel to stainless steel. Journal of Materials Processing Technology. 2016;227:24-33.

14- Liu P, Shi Q, Wang W, Wang X, Zhang Z. Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06 dissimilar materials. Materials letters. 2008;62(25):4106-8.

15- Yong YA, Zhang DT, Cheng QI, Zhang W. Dissimilar friction stir welding between 5052 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010;20:619-23.

16- Li XW, Zhang DT, Cheng QI, Zhang W. Microstructure and mechanical properties of dissimilar pure copper/1350 aluminum alloy butt joints by friction stir welding. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012;22(6):1298-306.

17- Beygi R, Kazeminezhad M, Kokabi AH. Butt joining of Al–Cu bilayer sheet through friction stir welding. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012;22(12):2925-9.

18- Beygi R, Kazeminezhad M, Kokabi AH. Microstructural evolution and fracture behavior of friction-stir-welded Al-Cu laminated composites. Metallurgical and Materials Transactions A. 2014;45(1):361-70.

19- Beygi R, Mehrizi MZ, Verdera D, Loureiro A. Influence of tool geometry on material flow and mechanical properties of friction stir welded Al-Cu bimetals. Journal of Materials Processing Technology. 2018;255:739-48.

20- ASTM E8 / E8M-16ae1, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

21- ASTM E3-11(2017), Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

22- Prado RA, Murr LE, Shindo DJ, Soto KF. Tool wear in the friction-stir welding of aluminum alloy 6061+ 20% Al2O3: a preliminary study. Scripta materialia. 2001;45(1):75-80.

23- Dieter GE, Bacon DJ. Mechanical metallurgy. New York: McGraw-hill; 1986.

24- Reimer L. Imaging with Secondary and Backscattered Electrons. InScanning Electron Microscopy 1985 (pp. 227-271). Springer, Berlin, Heidelberg.

25- Newbury DE, Ritchie NW. Is scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometry (SEM/EDS) quantitative?. Scanning. 2013;35(3):141-68.

26- Ryl'kov EN, Isupov FY, Naumov AA, Panchenko OV, Shamshurin AI. Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al–Cu joints formed by friction stir welding. Metal Science and Heat Treatment. 2019;60(11-12):734-8.

27- Davis JR, Allen P, Lampman S, Zorc TB, Henry SD, Daquila JL, Ronke AW, editors. Metals handbook: properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. ASM International; 1990.

28- Carlone P, Astarita A, Palazzo GS, Paradiso V, Squillace A. Microstructural aspects in Al–Cu dissimilar joining by FSW. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015;79(5-8):1109-16.