



## بررسی تجربی فرایند جوشکاری اصطکاکی قطعات فلزی غیرهمجنس

مهیار عاشوری پاشاکی، مجید علی طاوولی، سید روح‌الله کاظمی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران  
\* ایمیل نویسنده مسئول: kazemi@guilan.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۱ بهمن ۱۴۰۳  
پذیرش: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۴

## کلیدواژگان:

جوشکاری اصطکاکی دورانی  
فلزات غیرهمجنس  
استحکام کششی  
بررسی میکروسکوپی  
منطقه متأثر از حرارت

فرایند جوشکاری اصطکاکی یکی از روش‌های جوشکاری در حالت جامد است که دارای انواع مختلفی است. این پژوهش به بررسی روش جوشکاری اصطکاکی دورانی (چرخشی) برای اتصال فلزات غیرهمجنس پرداخته است. بدین منظور از یک دستگاه تراشکاری به عنوان ماشین جوشکاری اصطکاکی دورانی استفاده شد، و سه مؤلفه‌ی سرعت دوران، زمان اصطکاک و جنس قطعات نیز به عنوان متغیرهای آزمایش انتخاب شدند. قطعات مختلف در سه سرعت دورانی ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و سه زمان اصطکاکی ۸، ۱۲ و ۱۶ ثانیه بهم جوشکاری شدند. فلزات پایه مورد استفاده شامل میلگردهای فولاد CK۴۵، آلومینیوم AA۶۰۶۱ و مس CDA۱۰۱ با قطر ۱۰ میلی‌متر بودند. نتایج آزمون کشش نشان داد که بین سرعت دوران و زمان اصطکاک با استحکام کششی قطعات رابطه‌ی مستقیم وجود دارد. با افزایش سرعت دوران و زمان اصطکاک، تنش نهایی و تنش گسیختگی نمونه‌ها نیز افزایش یافت. بیشترین استحکام کششی با حدود ۱۷۴ مگاپاسکال برای نمونه فولاد-مس و کمترین استحکام کششی با حدود ۱۱ مگاپاسکال برای نمونه آلومینیوم-مس ثبت شد. تمامی نمونه‌ها به دلیل سخت شدن پس از جوشکاری و تغییر ساختار در منطقه متأثر از حرارت و منطقه جوش دچار شکست ترد شدند. بررسی ریزساختار نمونه‌ها نشان داد که افزایش سرعت دوران موجب ریزتر شدن دانه‌بندی در منطقه متأثر از حرارت و فلز جوش شده و نمونه‌های با دانه‌بندی ریزتر، استحکام کششی و سختی بالاتری دارند. همچنین، افزایش سرعت دوران باعث کاهش مشکلات ساختاری مانند فازهای بین‌فلزی و رسوب ترکیبات مضر در مرز اتصال می‌شود و حفره، ترک و فضاهای خالی نیز کاهش می‌یابد.

## Experimental investigations in friction welding process of dissimilar metal parts

Mahyar Ashouri Pashaki, Majid Alitavoli, Seyyed Roohollah Kazemi\*

Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran  
\* Corresponding Author's Email: kazemi@guilan.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 9 February 2025  
Accepted: 19 May 2025

## Keywords:

Rotary Friction Welding  
Dissimilar Metals  
Tensile Strength  
Microscopic Survey  
Heat Affected Zone (HAZ)

## Abstract

The friction welding process is a solid-state welding method with various types. This study investigates the rotary friction welding method for joining dissimilar metals. A lathe machine was utilized as a rotary friction welding machine, and three parameters—rotational speed, friction time, and material type—were selected as experimental variables. Different specimens were welded at three rotational speeds (1000, 1400, and 2000 rpm) and three friction times (8, 12, and 16 seconds). The base metals used were CK45 steel, AA6061 aluminum, and CDA101 copper rods with a diameter of 10 mm. Tensile test results indicated a direct relationship between rotational speed and friction time with the tensile strength of the joints. As rotational speed and friction time increased, the ultimate stress and fracture stress of the specimens also increased. The highest tensile strength of approximately 174 MPa was recorded for the steel-copper (St-Cu) specimen, while the lowest tensile strength of about 11 MPa was observed for the aluminum-copper (Al-Cu) specimen. All specimens exhibited brittle fracture at the weld interface due to post-weld hardening and microstructural changes in the heat-affected zone (HAZ) and weld zone (WZ). Microstructural analysis revealed that increasing the rotational speed led to grain refinement in the HAZ and weld metal, resulting in higher tensile strength and hardness in specimens with finer grains. Furthermore, increasing the rotational speed reduced structural defects such as intermetallic phases (IMC) and the precipitation of harmful compounds at the interface while minimizing the formation of porosity, cracks and voids.

## Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ashouri Pashaki M, Alitavoli M, Kazemi SR. Experimental investigations in friction welding process of dissimilar metal parts. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Jun 22;12(4):40-62. doi: 10.22034/ijme.2025.504440.2047 [In Persian]

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تمایل روزافزون برای کاهش وزن محصولات و سازه‌های مهندسی با هدف کاهش مصرف انرژی، کاهش آلودگی هوا، حصول نتیجه بهتر در کارایی قطعات و بهینه سازی خواص قطعات صنعتی و همچنین افزایش راندمان تولید، سبب شده تا بحث استفاده از فلزات غیرهمجنس جهت جایگزینی فلزات سنگین با فلزات سبک‌تر، به عنوان یک راهکار مؤثر در این زمینه، مورد توجه قرار گیرد. تفاوت در خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی در فلزات غیرهمجنس باعث شده تا ایجاد اتصال مناسب بین آن‌ها همواره به یک چالش مهندسی بدل شود. هرچند تاکنون روش‌های مختلفی برای غلبه بر این چالش ارائه شده است که هرکدام مزایا و معایب خاص خود را دارند، اما با توجه به تنوع قطعات فلزی غیرهمجنس تحقیق و مطالعه در این زمینه هنوز هم به عنوان یک حوزه تحقیقاتی جذاب مورد توجه مهندسان و پژوهشگران داخلی و خارجی قرار دارد. نظر به اینکه در منابع مختلف جوشکاری از فرایندهای جوشکاری حالت جامد به عنوان روشی مطلوب در اتصال فلزات غیرهمجنس نام برده شده است [۱-۴]. هدف این پژوهش بررسی فرایند جوشکاری اصطکاکی<sup>۱</sup> (FRW) در اتصال سه فلز غیرهمجنس فولاد، مس و آلومینیوم به یکدیگر و مطالعه‌ی خواص مکانیکی و متالورژیکی حاصل از این فرایند به صورت تجربی است. شیوه‌ی جوشکاری اصطکاکی دورانی اولین بار توسط یک ماشینکار آمریکایی به نام جیمز پوینگتون<sup>۲</sup> و پس از آن توسط یک ماشینکار روسی به نام چدیکوف<sup>۳</sup> به صورت کاملاً اتفاقی در حین کار با یک ماشین تراشکاری ساده ابداع گردید [۵-۸] و پس از آن مراحل پیشرفت خود را تا به امروز پشت سر گذاشته است. از مهم‌ترین کاربردهای جوشکاری اصطکاکی می‌توان به ساخت شافت و پرّه توربین‌های تولید برق و موتور هواپیما، درام کمپرسورها، نازل‌های مخازن تحت فشار راکتور، مبدل‌های حرارتی، انواع قطعات دوفلزی<sup>۴</sup> صنایع الکتریکی و هسته‌ای و انواع قطعات خودروهای سبک و سنگین نظیر محورها، بوش‌های غلتکی، پیستون موتور، سوپاپ موتور، محور فرمان، میل کمک فنر و غیره اشاره کرد [۹، ۱۰]. اصلی‌ترین مؤلفه‌های فرایند جوشکاری اصطکاکی عبارتند از: سرعت دوران، فشار اصطکاک، فشار آهنگری، زمان اصطکاک و زمان آهنگری [۲] که در پژوهش‌های مختلف به صورت متغیر مورد بررسی قرار می‌گیرند. در ادامه به صورت اجمالی به برخی از پژوهش‌های پیشین و کارهای صورت گرفته در این حوزه، اشاره خواهد شد.

شریفی و همکاران [۱۱] به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال متشابه آلومینیوم AAY۰۷۵ پرداختند. آن‌ها در این روش از سه سرعت دورانی ۱۱۲۰، ۱۴۰۰ و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه برای جوشکاری استفاده کردند و فشار اصطکاک و فشار آهنگری را به ترتیب ۲۳ و ۳۵ مگاپاسکال و زمان اصطکاک و زمان آهنگری را نیز به ترتیب ۱۵ و ۵ ثانیه برای هر سه سرعت به صورت بهینه، ثابت در نظر گرفتند. اشرفی و همکاران [۱۲] خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال متشابه لوله‌های فولادی X۵۲ را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش طرح اتصال جوش به دو صورت پخ‌دار و بدون پخ و سرعت چرخش قطعات در حین جوشکاری ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، زمان اصطکاک برای نمونه‌های پخ‌دار به ترتیب ۱۴، ۲۳ و ۲۸ ثانیه و برای نمونه‌های بدون پخ به ترتیب ۹، ۱۲ و ۱۶ ثانیه به صورت متغیر در نظر گرفته شد. همچنین زمان آهنگری به طور ثابت برای همه‌ی نمونه‌ها ۵ ثانیه و فشار اصطکاک و فشار آهنگری نیز برای همه‌ی نمونه‌ها به ترتیب ۸/۵ و ۱۷ مگاپاسکال ثابت قرار داده شد. ظهور و همکاران [۱۳] به بررسی هندسه سطح مقطع قطعه کار در دما و خواص منطقه جوش آلیاژ آلومینیوم T۶-۷۰۷۵ در جوشکاری اصطکاکی دورانی پرداختند. بدین منظور با استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی پیوسته با متغیر قرار دادن سرعت چرخشی در دو سطح ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ دور بر دقیقه و ثابت نگه داشتن فشار اصطکاکی، فشار آهنگری، زمان اصطکاک و زمان آهنگری به ترتیب برابر ۲۰ و ۴۰ مگاپاسکال و ۳ و ۱/۵ ثانیه هندسه سطح پیشانی قطعات آلومینیومی در سه حالت ساده، پین دار و سوراخ‌دار مورد بررسی‌های مکانیکی و نرم افزاری از طریق آزمون کشش، سختی سنجی و شبیه‌سازی المان محدود قرار گرفتند. خسروشاهی و همکاران [۱۴] با استفاده از روش شبیه سازی المان محدود به بررسی فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی لوله‌های فولادی غیرهمجنس ASTM A۱۰۶-B و AISI ۴۱۴۰ پرداختند. در این پژوهش تأثیر پارامترهای اصلی جوشکاری شامل سرعت دورانی، فشار اصطکاکی، زمان اصطکاکی، فشار آهنگری و زمان آهنگری بر میزان کوتاه شدگی نمونه‌های بعد از جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از تکنیک مش‌ریزی مجدد ابتکاری و اسکریپت نویسی در نرم‌افزار آباکوس استفاده گردید. اشکانی و همکاران [۱۵] به بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال غیرهمجنس فولادهای CK۲۲

<sup>1</sup> Friction Welding (FRW)

<sup>2</sup> J. H. Bevington

<sup>3</sup> A. J. Chdikov

<sup>4</sup> Bimetal

و CK35 پرداختند. در این پژوهش با توجه به دستگاه جوش اصطکاکی به کار رفته پارامترهای جوشکاری در سه سرعت دوران ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه و دو فشار آهنگری ۱۰ و ۴۰ مگاپاسکال تعیین گردید. قربانی و همکاران [۱۶] به بررسی خواص مکانیکی، فیزیکی و متالورژیکی اتصال لوله‌های غیرهمجنس آلومینیوم و مس پرداختند. در این پژوهش از یک دستگاه جوش اصطکاکی کلاچ ترمزی استفاده شد. سرعت دورانی با ۱۵۰۰ دور بر دقیقه برای همه‌ی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد و فشار اصطکاک، فشار آهنگری و عمق نفوذ قطعات در سه حالت متغیر به ترتیب دفعه‌ی اول ۱۰ بار، ۱۵ بار و ۵ میلی‌متر، دفعه‌ی دوم ۱۵ بار، ۲۵ بار و ۹ میلی‌متر و در نهایت دفعه‌ی سوم ۵ بار، ۵ بار و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد. قاسمی و همکاران [۱۷] خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال غیرهمجنس فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۰۴ و مس را بررسی نمودند. در این پژوهش از دستگاه فرز به عنوان ماشین جوشکاری اصطکاکی استفاده شد و متغیرهای فرایند شامل سه سرعت دورانی ۱۲۵۰، ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و فشار آهنگری در سه حالت کم، متوسط و زیاد در نظر گرفته شد. آلوز و همکاران [۱۸] به بررسی تغییرات دمایی در سطح اتصال و تأثیر نرخ سرد و گرم شدن بر خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۰۴ AISI و آلومینیوم AA۱۰۵۰ پرداختند. در این پژوهش از یک ماشین مخصوص جوشکاری اصطکاکی استفاده شد و پارامترهای فرایند نظیر سرعت دوران، فشار اصطکاک، فشار آهنگری، زمان اصطکاک و زمان آهنگری به ترتیب معادل ۳۲۰۰ دور بر دقیقه، ۲/۱ مگاپاسکال، ۱/۴ مگاپاسکال، ۳۲ ثانیه و ۲ ثانیه در نظر گرفته شد. چیپو و همکاران [۱۹] به بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال غیرهمجنس فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۰۴ و تیتانیوم خالص تجاری با استفاده از لایه میانی نیکل الکترولیتی پرداختند. هدف اصلی، کاهش تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ترد نظیر Fe-Ti و Cr-Ti و بهبود خواص مکانیکی جوش بود. برای این منظور از یک ماشین جوشکاری اصطکاکی مداوم با ظرفیت ۱۵۰ کیلوواتن ساخت شرکت کوکا آلمان استفاده شد. در این آزمایش فشار آهنگری به صورت متغیر به ترتیب برابر ۱۳۰، ۱۴۰، ۱۵۰، ۱۶۰، ۱۷۰ و ۱۸۰ مگاپاسکال و دیگر پارامترها نظیر فشار اصطکاک برابر ۱۸۰ مگاپاسکال، زمان اصطکاک از ۱ تا ۶ ثانیه، زمان آهنگری ۴ ثانیه و سرعت دوران ۱۱۲۵ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. خُلف‌الله و همکاران [۲۰] به بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال غیرهمجنس فولاد کم کربن و آلومینیوم AA۱۱۰۰ پرداختند. هدف آن‌ها در این پژوهش بهینه‌سازی پارامترهای فشار اصطکاک در زمان، فشار آهنگری در زمان و سرعت دوران با استفاده از تکنیک روش‌شناسی سطح پاسخ<sup>۱</sup> بود؛ به طوری که با این روش یک رابطه‌ی تجربی برای پیش‌بینی استحکام کششی و سختی نمونه‌های تولید شده ایجاد کردند و در پنج سطح مختلف سه پارامتر مذکور را به صورت متغیر قرار دادند تا بهترین و بدترین نتیجه را از طریق تنظیم این پارامترها روی یک ماشین جوشکاری اصطکاکی مداوم به دست آورند. ماریموتو و همکاران [۲۱] خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال غیرهمجنس مونل سری K5۰۰ (آلیاژی از نیکل) را به مس خالص از نوع دارای اکسیژن<sup>۲</sup> (ETP) مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش سرعت دورانی با ۱۵۰۰ دور بر دقیقه برای همه‌ی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد و بقیه پارامترها نظیر فشار اصطکاک به ترتیب ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ بار، فشار آهنگری به ترتیب ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ بار و نرخ پیشروی در حین جوشکاری به طور ثابت ۹ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. مورگان و همکاران [۲۲] به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال غیرهمجنس آلومینیوم AA۶۰۶۳ به فولاد ضدزنگ آستنیتی ۳۰۴ پرداختند. آن‌ها در این پژوهش تأثیر شکل مقطع اتصال را در جوشکاری اصطکاکی دورانی مورد ارزیابی قرار دادند. لذا بدین منظور سه نمونه با سطح مقطع ساده‌ی تخت، سطح مقطع به شکل مخروط ناقص و سطح مقطع به شکل کروی در نظر گرفتند و متغیرهای دیگر فرایند را برای همه‌ی نمونه‌ها ثابت قرار دادند. رحمان و همکاران [۲۳] با بهره‌گیری از فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی، به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال غیرهمجنس میان اینکونل ۷۱۸ (آبرآلیاژ<sup>۳</sup> آستنیتی بر پایه نیکل) و فولاد کم‌آلیاژ F۲۲ پرداختند. در این پژوهش، به‌منظور کاهش نفوذ کربن از فولاد به اینکونل ۷۱۸، از لایه‌ی میانی اینکونل ۶۲۵ استفاده شد. قطعات در دو مرحله ابتدا بدون لایه‌ی میانی و سپس با لایه‌ی میانی اینکونل ۶۲۵ جوشکاری شدند. عملیات جوشکاری با استفاده از دستگاه اصطکاکی ساخت شرکت ای تی ای<sup>۴</sup> هند با ظرفیت نیروی محوری ۱۵۰ کیلوواتن انجام گرفت. شرایط نهایی فرایند نیز برای همه قطعات به طور ثابت در نظر گرفته شد که عبارت بودند از فشار اصطکاکی ۲۰۰ مگاپاسکال، فشار آهنگری ۴۰۰ مگاپاسکال، سرعت چرخش ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و طول درهم‌شدگی نیز ۶ میلی‌متر انتخاب شد. بارنجی و همکاران [۲۴] به بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال غیرهمجنس میله‌های فولادی از جنس فولاد

<sup>1</sup> Response Surface Methodology (RSM)

<sup>2</sup> Electrolytic Tough Pitch Copper (ETP)

<sup>3</sup> Superalloy

<sup>4</sup> ETA Technology, Bangalore, India

ضدزنگ آستنیتی ۳۱۶ و فولاد فریتی A۵۱۶ پرداختند. در این پژوهش از یک ماشین جوشکاری اصطکاکی لحظه‌ای با ظرفیت ۱۲۵ تن ساخت شرکت ام تی آی<sup>۱</sup> آمریکا استفاده شد. باتوجه به نوع فرایند برای جوشکاری قطعات دو پارامتر ثابت، از جمله سرعت دورانی برابر ۱۸۰۵ دور بر دقیقه و انرژی اصطکاک معادل ۳۳۲/۱۷ کیلوژول و یک پارامتر متغیر شامل سه فشار آهنگری به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. باتوجه به پیشینه‌های مورد مطالعه تاکنون جوشکاری سه فلز غیرهمجنس فولاد، مس و آلومینیوم به شیوه‌ی اصطکاکی در یک پژوهش واحد مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا با توجه به خواص مکانیکی، فیزیکی و ترکیب شیمیایی متفاوت این سه فلز و همچنین کاربرد زیاد آن‌ها در صنایع مختلف، در پژوهش حاضر تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی بر خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال غیرهمجنس این فلزات با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و تجهیزات

در این پژوهش از سه میلگرد فلزی شامل فولاد CK۴۵، آلومینیوم AA۶۰۶۱ و مس CDA۱۰۱ با قطر ۱۰ میلی‌متر به عنوان فلزات پایه در جوشکاری استفاده شد. برای انجام جوشکاری اصطکاکی دورانی از فرایند جوشکاری اصطکاکی کلاسیک (سنتی) استفاده شد که از نظر ساختار ماشین و متغیرهای جوشکاری متفاوت از فرایندهای جوشکاری اصطکاکی درایو مستقیم و جوشکاری اصطکاکی لحظه‌ای است. بدین منظور از یک ماشین تراشکاری اُنیورسال مدل TN50-BR ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز به عنوان ماشین جوشکاری اصطکاکی کلاسیک استفاده شد. این روش برای تولید و تعمیر قطعات جوشکاری اصطکاکی در تعداد کم و کارهای پژوهشی کاربرد دارد. در روش جوشکاری اصطکاکی کلاسیک تعداد دوران و زمان جوشکاری از مؤلفه‌های اصلی فرایند هستند که در برنامه‌ریزی انجام شده برای جوشکاری مورد استفاده قرار گرفتند؛ همچنین تغییر جنس مواد اولیه نیز به عنوان یک مؤلفه‌ی اصلی غیروابسته به ماشین در برنامه‌ریزی لحاظ شد. بر اساس جدول ۱ با متغیر قرار دادن سه مؤلفه‌ی سرعت دوران ( $N_{1,2,3}$ )، زمان اصطکاک ( $t_{1,2,3}$ ) و جنس قطعات ( $S_{1,2,3}$ ) در مجموع ۲۷ مرحله آزمون برای انجام ارزیابی‌های مکانیکی و متالورژیکی در نظر گرفته شد. همچنین دو مؤلفه‌ی زمان سایش ( $t_A$ ) و زمان آهنگری ( $t_B$ ) به عنوان مؤلفه‌های فرعی برای همه‌ی نمونه‌ها ثابت هستند و در زمان کل جوشکاری ( $T_w$ ) محاسبه می‌شوند.  $(T_w = t_A + t_B + t_{1,2,3})$  ضمناً برای ارزیابی‌های متالورژیکی ۹ عدد از نمونه‌ها بر اساس متغیر قرار دادن سرعت دوران و ثابت نگه داشتن زمان اصطکاک انتخاب شدند، که شماره‌ی آن‌ها در جدول ۱ با رنگ سبز مشخص شده است.

برای جوشکاری ابتدا با کمان اژه هر کدام از میلگردهای فلز پایه به طول ۵۰ میلی‌متر بریده شده و توسط دستگاه تراش دو سر آن‌ها آماده سازی و گونیا گردید. سپس طبق پارامترهای ذکر شده برای هر نمونه در جدول ۱ عملیات جوشکاری اصطکاکی دورانی به وسیله‌ی ماشین تراش با رعایت کلیه‌ی موارد ایمنی انجام شد. بدین منظور یک میله به عنوان قطعه‌ی چرخشی درون سه‌نظام محرک ماشین تراش و میله‌ی دیگر به عنوان قطعه‌ی ثابت درون سه‌نظام غیرمحرک دستگاه مرگک ماشین بسته شد. عملیات جوشکاری برای هر نمونه دوفلزی در سه سرعت دورانی ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و در سه زمان اصطکاکی ۸، ۱۲ و ۱۶ ثانیه با رعایت زمان سایش ۷ ثانیه و زمان آهنگری ۱۰ ثانیه برای همه نمونه‌ها اجرا شد. قابل ذکر است که به مجموع زمان سایش، زمان اصطکاک و زمان آهنگری، زمان جوشکاری اطلاق می‌شود، که برای هر نمونه باید به طور دقیق و پیوسته به ترتیب رعایت شود. ترتیب مراحل جوشکاری در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همچنین در شکل ۲ نحوه‌ی جوشکاری میله‌ها و نمونه‌های آماده شده پس از جوشکاری و روتراشی دیده می‌شود.

در این پژوهش برای ارزیابی‌های مکانیکی و متالورژیکی نمونه‌ها از آزمون‌های غیرمخرب<sup>۲</sup> و مخرب<sup>۳</sup> استفاده گردید. لذا جهت مطالعه‌ی خواص مکانیکی قطعات جوشکاری شده آزمایش کشش و برای مطالعه‌ی ریزساختار نمونه‌ها آزمون متالوگرافی به عمل آمد. بدین منظور، پس از جوشکاری، همه‌ی نمونه‌ها برای انجام آزمون کشش و آزمون متالوگرافی آماده‌سازی شدند. در این راستا، نمونه‌های آزمون کشش پس از جوشکاری با دستگاه تراش تحت عملیات روتراشی قرار گرفتند و طوفه‌ی قارچی شکل<sup>۴</sup> حاصل از فرایند جوشکاری از روی آن‌ها زوده شد. سپس نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش شرکت سنتام مدل STM-150 با ظرفیت کششی ۱۵ تن تحت استاندارد ASTM-E8 با نرخ کشش ۱ میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمون کشش قرار گرفتند. همچنین فلزات پایه نیز به طور جداگانه

<sup>1</sup> Manufacturing Technology Inc. (MTI)

<sup>2</sup> Non Destructive Testing (NDT)

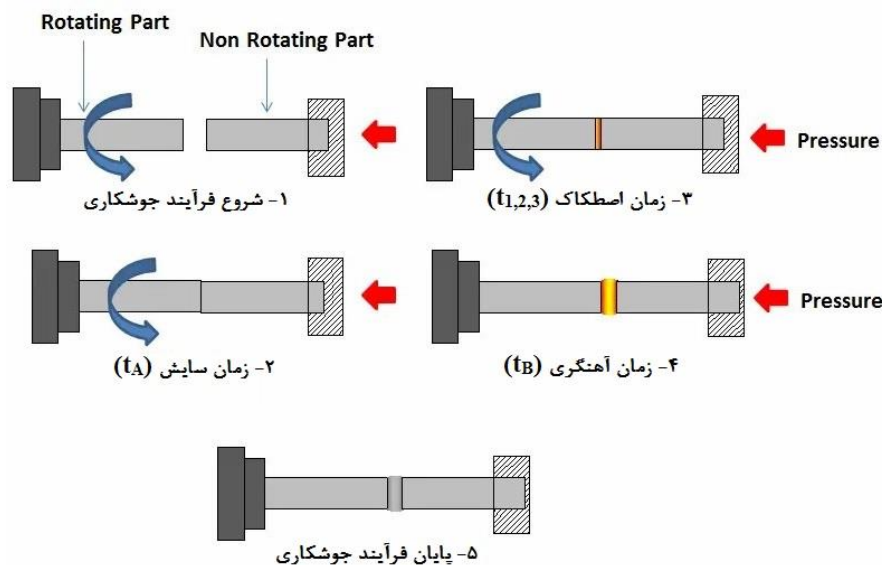
<sup>3</sup> Destructive Testing (DT)

<sup>4</sup> Flash

مورد آزمایش کشش قرار گرفتند. بدین منظور از هر میلگرد فلز پایه یک نمونه استاندارد با طول اولیه ۱۰۰ و قطر میانی ۷ میلی‌متر به فرم دمپلی ساخته شد که تصویر آن در شکل ۸-ب مشخص است. نمونه‌های آزمون متالوگرافی نیز با استفاده از دستگاه فرز در جهت طولی تا مرکز قطعه براده برداری شدند تا مقطع اتصال دو فلز برای بررسی‌های متالورژیکی آشکار شود. در ادامه نمونه‌ها درون دستگاه مانیت گرم قالب‌گیری شدند و پس از آن سطح نمونه‌های مانیت شده با استفاده از سنباده‌های شماره‌ی ۳۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ به ترتیب از مش بندی خشن تا نرم سنباده‌کاری شدند، سپس عملیات پولیش‌کاری سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پولیش مکانیکی و پودر اکسید آلومینیوم انجام شد تا سطح نمونه‌ها کاملاً صاف و صیقلی شود. در نهایت نمونه‌های آماده شده با استفاده از میکروسکوپ نوری<sup>۱</sup> (استریوسکوپ) یا کسون مدل YX-AK36 با بزرگنمایی حداقل ۸ برابر و حداکثر ۵۰ برابر اندازه واقعی و همچنین میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> فیلیپس مدل XL30 با دقت عکس برداری ۲۰ نانومتر و قدرت بزرگنمایی ۱۰۰،۰۰۰ برابر اندازه واقعی، مورد بررسی و مطالعه‌ی ساختاری قرار گرفتند. در شکل‌های ۲ تا ۴ برخی از کارهای انجام شده مشاهده می‌شود.

جدول ۱ بیست و هفت مرحله آزمون جوشکاری اصطکاکی میله‌های غیرهمجنس

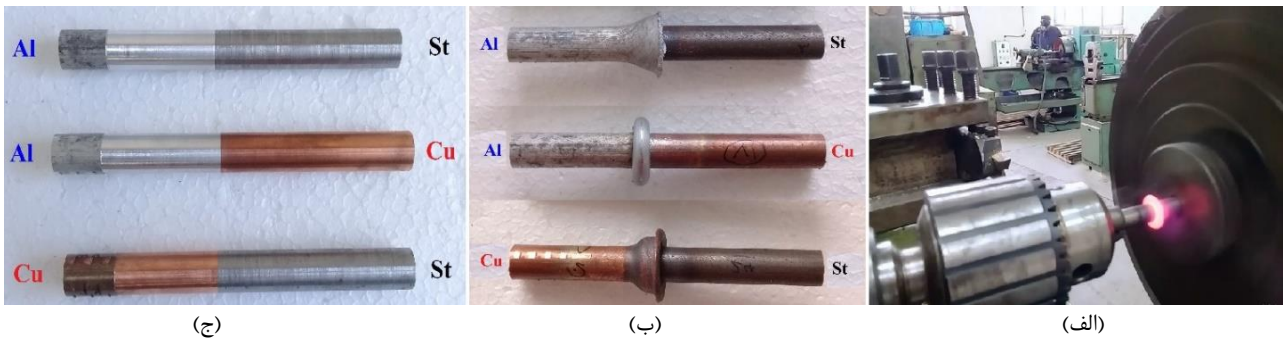
فولاد و مس (St-Cu)			آلومینیوم و مس (Al-Cu)			آلومینیوم و فولاد (Al-St)		
زمان اصطکاک $t_{1,2,3}$ (s)	سرعت دوران $N_{1,2,3}$ (rpm)	شماره نمونه	زمان اصطکاک $t_{1,2,3}$ (s)	سرعت دوران $N_{1,2,3}$ (rpm)	شماره نمونه	زمان اصطکاک $t_{1,2,3}$ (s)	سرعت دوران $N_{1,2,3}$ (rpm)	شماره نمونه
۸		۱۹	۸		۱۰	۸		۱
۱۲	۱۰۰۰	۲۰	۱۲	۱۰۰۰	۱۱	۱۲	۱۰۰۰	۲
۱۶		۲۱	۱۶		۱۲	۱۶		۳
۸		۲۲	۸		۱۳	۸		۴
۱۲	۱۴۰۰	۲۳	۱۲	۱۴۰۰	۱۴	۱۲	۱۴۰۰	۵
۱۶		۲۴	۱۶		۱۵	۱۶		۶
۸		۲۵	۸		۱۶	۸		۷
۱۲	۲۰۰۰	۲۶	۱۲	۲۰۰۰	۱۷	۱۲	۲۰۰۰	۸
۱۶		۲۷	۱۶		۱۸	۱۶		۹



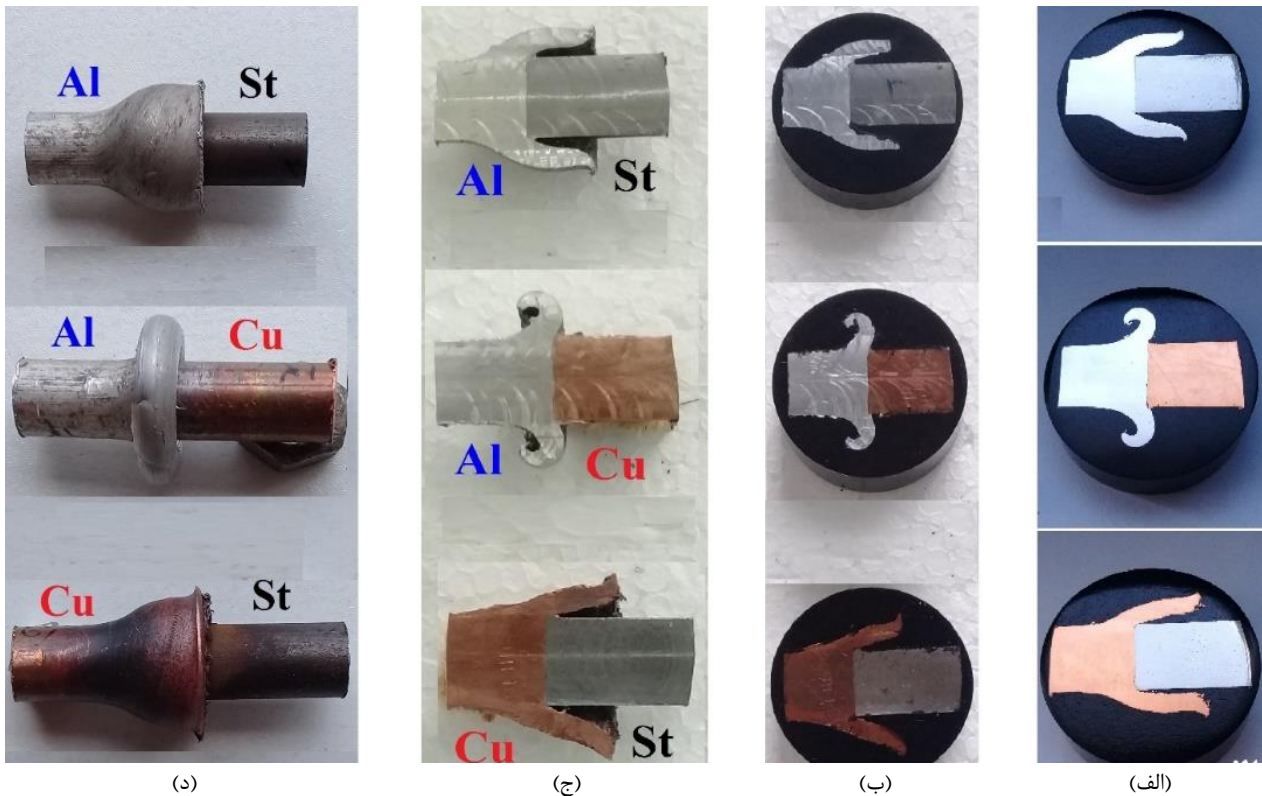
شکل ۱ مراحل اجرای جوشکاری اصطکاکی دورانی به صورت شماتیک

<sup>1</sup> Optical Microscope (OM)

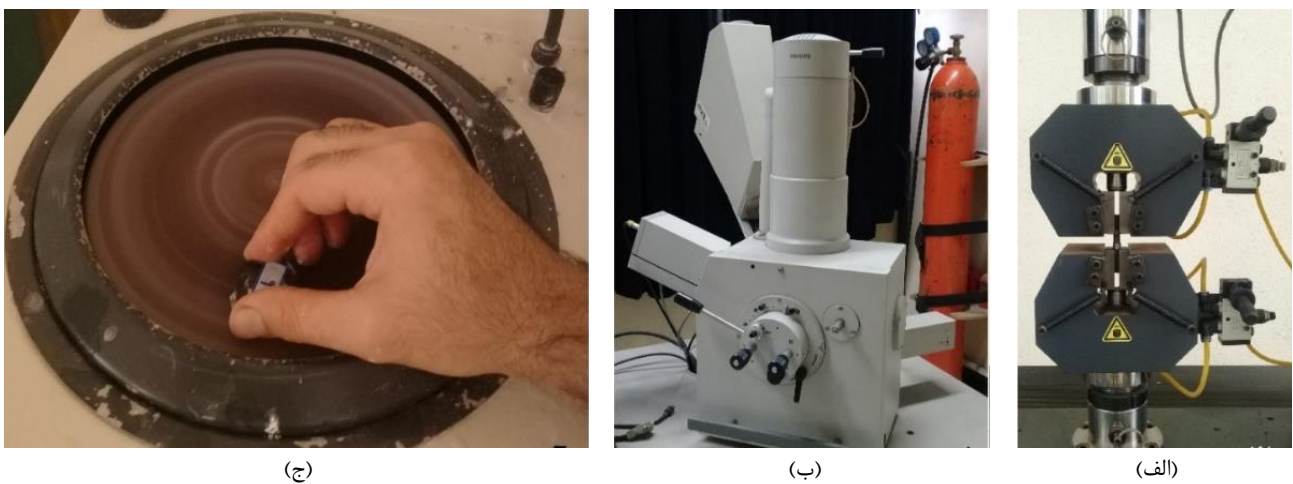
<sup>2</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)



شکل ۲ الف) جوشکاری اصطکاکی دورانی ب) قطعات دوفلزی پس از جوشکاری، ج) قطعات دوفلزی پس از روتراشی



شکل ۳ الف) نمونه پس از سنباده کاری، ب) نمونه پس از مانت شدن، ج) نمونه بعد از فرزکاری، د) نمونه قبل از فرزکاری

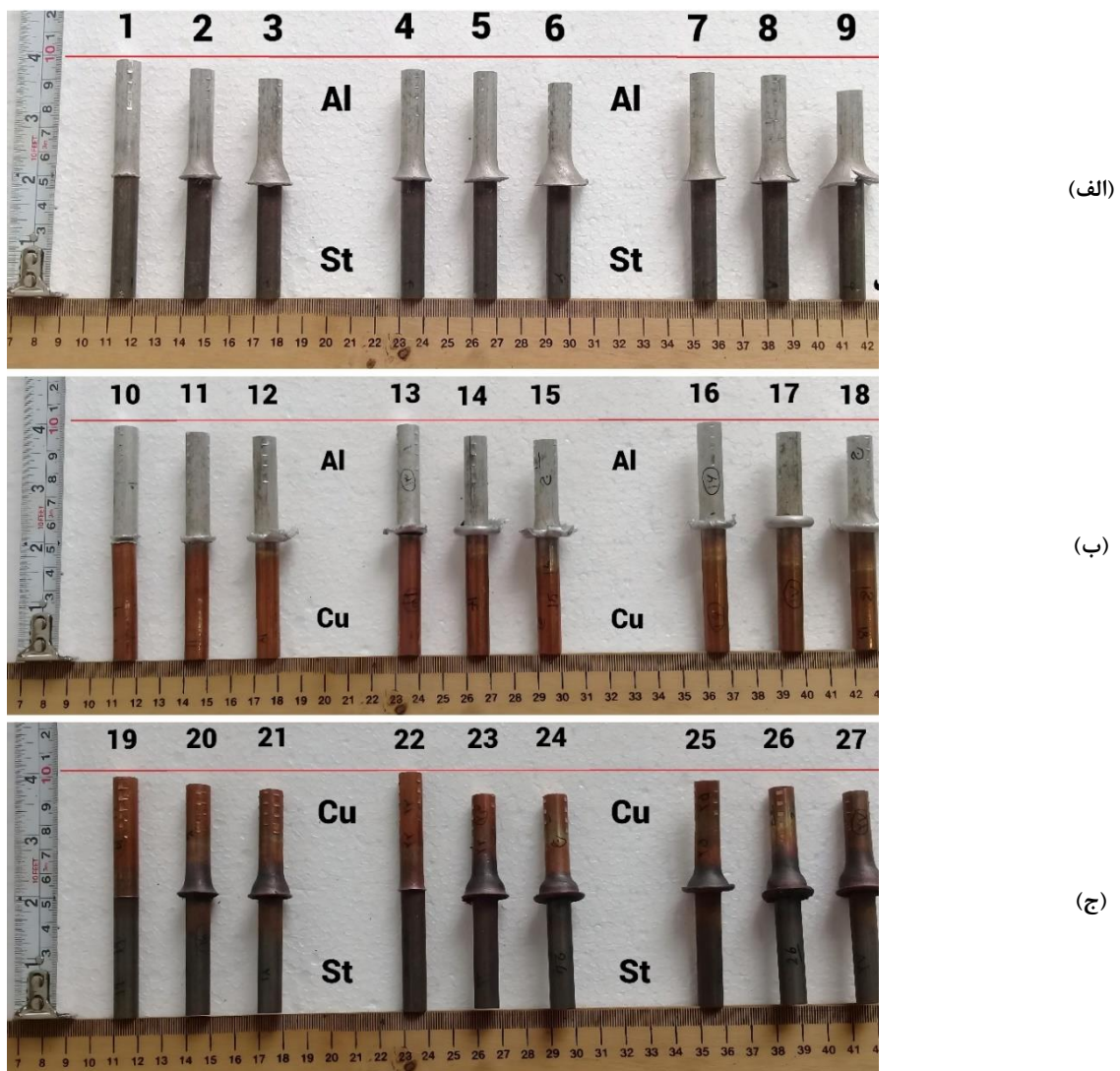


شکل ۴ الف) نمونه در دستگاه آزمون کشش، ب) نمایی از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، ج) دستگاه پولیش مکانیکی و پولیش کاری نمونه

## ۳- نتایج و بحث

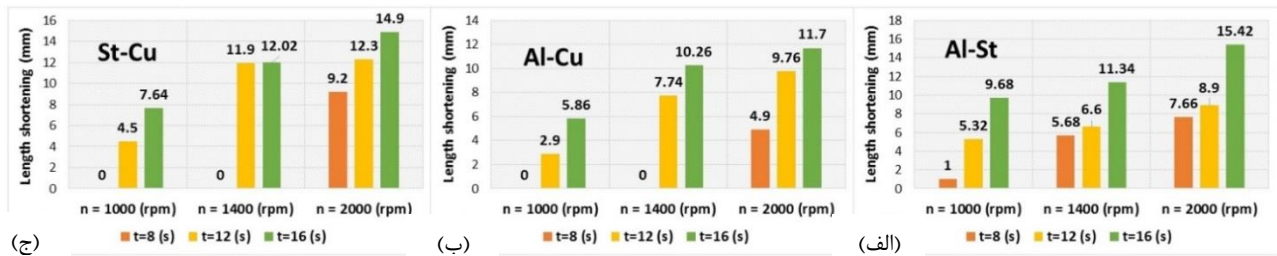
## ۳-۱- ارائه‌ی نتایج جوشکاری و ارزیابی‌های غیرمخرب قطعات (NDT)

از ۲۷ نمونه‌ی جوشکاری شده با فرایند اصطکاکی دورانی ۲۳ نمونه اتصال موفقیت آمیزی داشتند و ۴ نمونه نیز مردود شدند که در ادامه جزئیات آن توضیح داده خواهد شد. نمونه‌های جوشکاری شده، ابتدا به وسیله‌ی بازرسی چشمی<sup>۱</sup> مورد ارزیابی‌های فنی و ظاهری قرار گرفتند. در این بازرسی‌ها ابعاد و شکل گرده‌ی جوش نمونه‌ها و همچنین طول ثانویه آن‌ها پس از جوشکاری بررسی شد. در این بررسی‌ها مشخص شد که نمونه‌های جوشکاری شده دارای ظاهری سالم و بی‌عیب و نقص هستند و اندازه‌ی طوقه‌ی قارچی شکل (گرده) آن‌ها نیز باتوجه به دوران و زمان جوشکاری از تناسب خوبی برخوردار است به طوری که هرچه به سرعت چرخش و زمان جوشکاری افزوده شده گرده‌ی جوش نمونه‌ها نیز در اثر تغییر شکل پلاستیک بزرگتر شده‌اند. این تغییر فرم قارچی شکل در سمتی از نمونه‌های دوفلزی ایجاد شده که میله از جنس نرم‌تری برخوردار بوده است. همچنین با استفاده از کولیس، طول کوتاه شدگی نمونه‌ها با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بررسی‌ها نیز مشخص شد که بین سرعت دوران و زمان جوشکاری و کوتاه شدگی ثانویه میله‌ها رابطه‌ی مستقیم وجود دارد؛ به طوری که هرچه سرعت دوران و زمان جوشکاری افزایش یافته طول نمونه‌ها نیز در اثر تغییر شکل پلاستیک کوتاه‌تر شده است. این موضوع در پژوهش خسروشاهی و همکاران [۱۴] نیز گزارش شده است. در شکل ۵ ابعاد و طول هر نمونه در مقایسه با خط‌کش مشخص است و در نمودار ستونی شکل ۶ نیز مقدار کوتاه شدگی نمونه‌ها درج شده است.



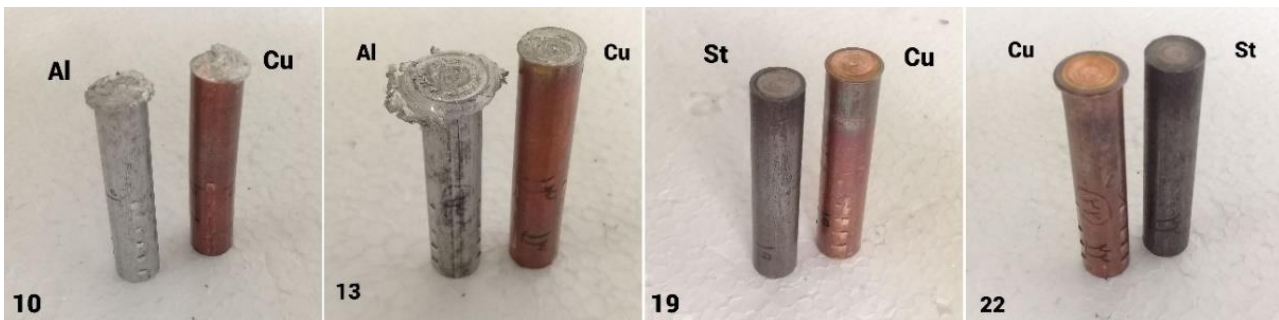
شکل ۵ تناسب طول قطعات پس از جوشکاری، الف) آلومینیوم- فولاد (Al-St)، ب) آلومینیوم- مس (Al-Cu)، ج) فولاد- مس (St-Cu)

<sup>۱</sup> Visual Testing (VT)



شکل ۶ نمودار کوتاه شدگی طول ثانویه نمونه‌ها پس از جوشکاری، الف) آلومینیوم- فولاد (Al-St)، ب) آلومینیوم- مس (Al-Cu)، ج) فولاد- مس (St-Cu)

در جوشکاری فلزات غیرهمجنس همواره ملاحظاتی به عنوان چالش جدی در شکل‌گیری اتصال وجود دارد که تفاوت خواص حرارتی فلزات با یکدیگر از مهم‌ترین آن‌هاست. همان‌گونه که در تصاویر شکل ۷ مشاهده می‌شود، در بین همه‌ی قطعات نمونه‌های شماره‌ی ۱۰ و ۱۳ از گروه آلومینیوم- مس و همچنین نمونه‌های شماره‌ی ۱۹ و ۲۲ از گروه فولاد- مس به ترتیب در سرعت‌های ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و زمان اصطکاکی ۸ ثانیه به یکدیگر متصل نشدند. این موضوع نشان می‌دهد که زمان اصطکاکی ۸ ثانیه برای جوشکاری اصطکاکی مس و آلومینیوم در سرعت‌های ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه مناسب نبوده و باید در این سرعت‌ها از زمان اصطکاکی بیشتری استفاده نمود و یا سرعت دوران را افزایش داد. در توضیح بیشتر باید گفت که انقباض و انقباض آلومینیوم و آلیاژهای آن در اثر جوشکاری و سرد شدن پس از آن نزدیک به دو برابر فولاد است و انقباض حجمی ناشی از انجماد<sup>۱</sup> آن نیز در حدود ۴ تا ۶ درصد است این قضیه باعث ایجاد تمرکز تنش‌های داخلی (تنش‌های پسماند) در قطعه می‌شود که منجر به پیچیدگی، تاب برداشتن، تغییر ابعاد و در نهایت ترک‌زدگی فلز جوش و شکست اتصال خواهد شد [۱، ۳، ۴]. این موضوع در فلزاتی نظیر مس و آلومینیوم که از ضریب انقباض حرارتی<sup>۲</sup> بالاتری برخوردار هستند مشهود است. همچنین از دیگر نکات قابل توجه که باعث عدم جوش‌پذیری مس در سرعت و زمان‌های کم می‌شود باید به دمای آهنگری بالای مس (حدود ۹۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) در کنار هدایت حرارتی<sup>۳</sup> و رسانایی گرمایی<sup>۴</sup> زیاد آن اشاره کرد. به طوری که این خواص باعث به هدر رفتن گرما قبل از رسیدن به محدوده‌ی دمای آهنگری (خمیری) در فلز می‌شود. در جدول ۲ مقدار دمای لازم برای آهنگری فولاد، مس و آلومینیوم و همچنین مشخصات حرارتی آن‌ها بیان شده است.



شکل ۷ نمونه‌هایی که در زمان اصطکاکی ۸ ثانیه جوشکاری نشدند. (شماره هر نمونه روی تصویر درج شده است)

جدول ۲ مشخصات حرارتی فلزات به کار رفته در پژوهش [۲۵]

جنس فلز	دمای ذوب (°C)	دمای آهنگری (°C)	ضریب انقباض حرارتی ( $\mu\text{m}/\text{m.k}$ )	هدایت حرارتی ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	رسانایی گرمایی ( $^{\text{W}}/\text{m.k}$ )
فولاد (CK45)	۱۴۶۰	۸۵۰ - ۱۱۵۰	۱۲	۱۳	۴۸
مس (CDA101)	۱۰۸۳	۶۵۰ - ۹۰۰	۱۷	۱۱۰	۳۹۰
آلومینیوم (AA6061)	۶۵۰	۳۷۰ - ۵۱۰	۲۴	۶۸	۱۷۰

<sup>1</sup> Solidification Shrinkage

<sup>2</sup> Thermal Expansion

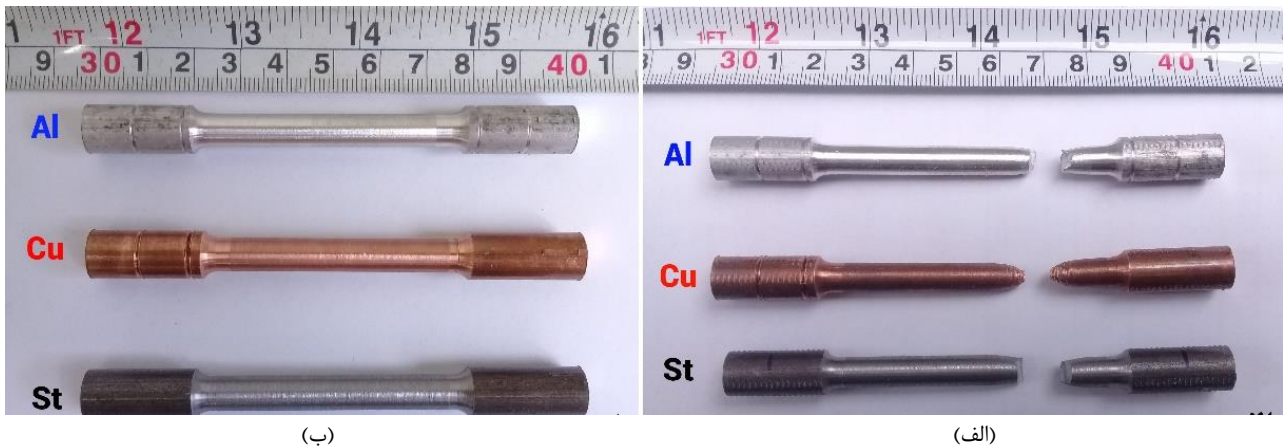
<sup>3</sup> Thermal Diffusivity

<sup>4</sup> Thermal Conductivity

### ۳-۲-ارائه‌ی نتایج آزمون کشش و متالوگرافی و ارزیابی‌های مخرب قطعات (DT)

#### ۳-۲-۱-نتایج آزمون کشش فلزات پایه

بر اساس اصول علم مواد، در کشش تک محوری فلزات و مواد مختلف سه نوع رفتار را در ناحیه‌ی شکست از خود بروز می‌دهند که عبارتند از شکست نرم که در مواد با جنس نرم و منعطف ایجاد می‌شود؛ شکست مختلط که در مواد چقرمه (دارای استحکام کششی توأم با انعطاف پذیری) به وجود می‌آید و شکست ترد که در مواد با جنس سخت و شکننده ایجاد می‌شود [۲۶]. در شکل ۸ تصاویر میلگردهای فلز پایه قبل و بعد از آزمون کشش مشاهده می‌شود.



شکل ۸ میلگردهای فلز پایه به فرم دمبلی، الف) میلگردها پس از آزمون کشش، ب) میلگردها پیش از آزمون کشش

همچنین در شکل ۹ تصاویر مقاطع شکست فلزات پایه پس از آزمون کشش ارائه شده است. همان‌گونه که در تصاویر مشخص است مقطع شکسته شده‌ی میلگرد فولادی و آلومینیومی به دلیل داشتن خاصیت چقرمگی<sup>۱</sup> پس از گلوبی شدن<sup>۲</sup> دچار شکست مختلط شده‌اند و مقطع شکستشان فرم خشن و دنداندار به خود گرفته است. اما میلگرد مسی به دلیل اینکه جز فلزات نرم و منعطف است و از استحکام و سختی کمی برخوردار است دچار الگوی شکست نرم شده و فرم کشیده شده‌ی مخروطی به خود گرفته است.

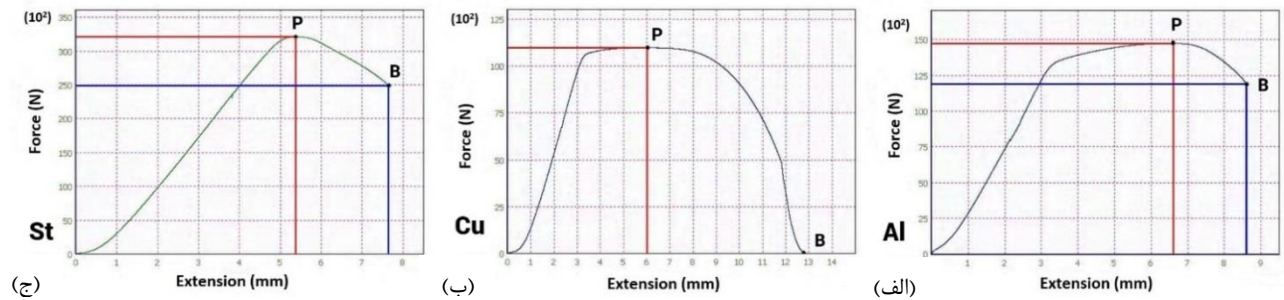


شکل ۹ مقطع شکست میلگردهای فلز پایه پس از آزمون کشش

در شکل ۱۰ نمودار نیرو و جابجایی حاصل از آزمون کشش برای سه میلگرد فولاد، آلومینیوم و مس نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود خواص مکانیکی فلزات پایه به کار رفته در پژوهش به اعداد ذکر شده در مراجع و استانداردها نزدیک است (جدول ۳).

<sup>1</sup> Toughness (Ductility)

<sup>2</sup> Necking



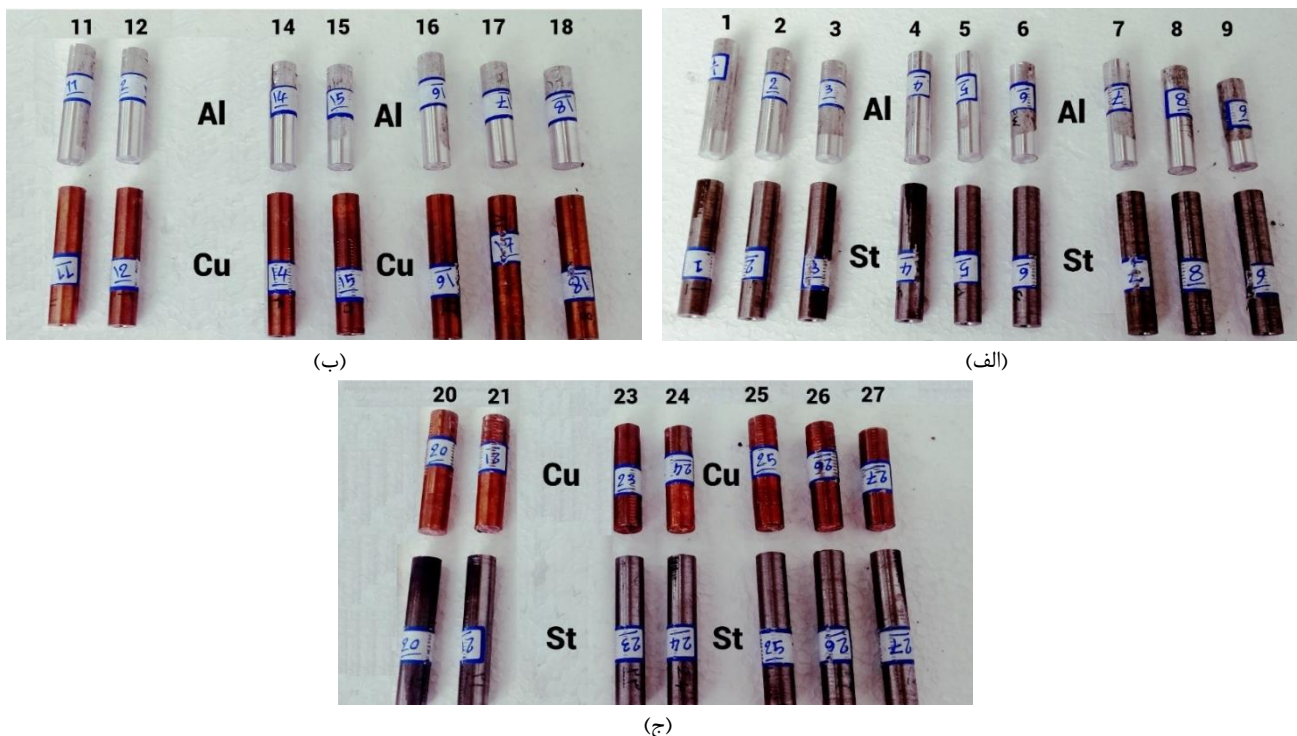
شکل ۱۰ نمودار نیرو جابجایی آزمون کشش میلگردهای فلز پایه، الف) میلگرد آلومینیوم، ب) میلگرد مس، ج) میلگرد فولاد

جدول ۳ نتایج آزمون کشش فلزات پایه به کار رفته در پژوهش [۲۷، ۲۵]

نتایج به دست آمده از آزمون کشش				مشخصات ذکر شده در منابع			
درصد ازدیاد	تنش گسیختگی	درصد ازدیاد	تنش نهایی	فلزات پایه در پژوهش	درصد ازدیاد	تنش نهایی	مواد اولیه در استاندارد
طول گسیختگی	(MPa)	طول نهایی	(MPa)		طول	(MPa)	
۱۳/۷۷	۶۴۶/۹۵	۹/۶۷	۸۳۴/۸۸	میلگرد فولاد ترانس	≥ ۱۴	۷۰۰ - ۸۵۰	فولاد CK۴۵
۱۵/۳۷	۳۱۴/۹۲	۱۱/۷۶	۳۹۱/۱۰	میلگرد آلومینیوم	۳/۴ - ۲۰	۱۳۰ - ۴۱۰	آلومینیوم AA۶۰۶۱
۲۳/۷۰	۰/۰۹	۱۱/۱۳	۲۸۵/۶۲	میلگرد مس	۱/۵ - ۵۰	۲۲۰ - ۴۱۰	مس CDA۱۰۱

### ۳-۲-۲- نتایج آزمون کشش نمونه‌های دوفلزی

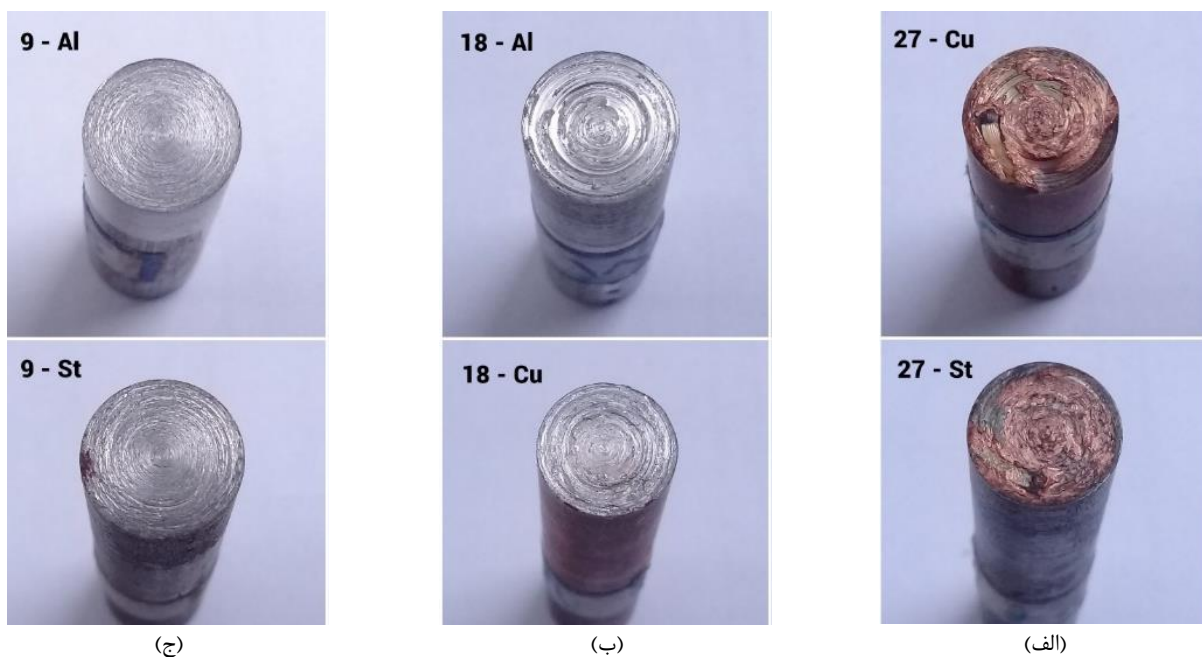
همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، کلیه‌ی نمونه‌های دوفلزی در آزمون کشش از مقطع اتصال دچار گسیختگی شده‌اند.



شکل ۱۱ نمونه‌های دوفلزی پس از گسیختگی در آزمون کشش، الف) آلومینیوم- فولاد (Al-St)، ب) آلومینیوم- مس (Al-Cu)، ج) فولاد- مس (St-Cu)

همچنین در شکل ۱۲ مقطع شکست سه نمونه دوفلزی از نزدیک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بخش‌هایی از فلز نرم‌تر بر روی فلز سخت‌تر باقی‌مانده است که حاکی از تغییر شکل پلاستیک و خمیری شدن فلز نرم‌تر تحت دما و فشار بالا در فرایند

جوشکاری اصطکاکی است که در زبری‌های فلز سخت‌تر آمیخته شده و بهم متصل شده‌اند. از مقایسه‌ی مقطع شکست نمونه‌ها با مقطع شکست فلزات پایه کاملاً مشخص است که شکست از نوع ترد بوده و شباهتی به مقطع شکست آن‌ها ندارد. معمولاً شکست ترد در مواد سخت و شکننده رخ می‌دهد. هرچند فلزات پایه به کار برده شده در پژوهش از نوع فلزات سخت و شکننده نیست اما عامل اصلی شکست ترد در مقطع اتصال، سختی به وجود آمده پس از جوشکاری می‌باشد. در بسیاری از فرایندهای جوشکاری ذوبی و غیرذوبی ایجاد سختی کم به دلیل تغییر خواص متالورژیکی و دانه بندی مجدد کریستال‌های فلزی<sup>۱</sup> پس از جوشکاری امری بدیهی و اجتناب ناپذیر است. از دلایل وقوع این سختی می‌توان به تشکیل مناطق متأثر از حرارت<sup>۲</sup> (HAZ) در اطراف جوش اشاره کرد که به دلیل دماهای بالا در حین جوشکاری ایجاد می‌شوند و می‌تواند باعث کاهش استحکام و چقرمگی و همچنین افزایش سختی و شکنندگی در فلز شود. علاوه بر این، سرعت خنک شدن فلز نیز می‌تواند بر مقدار سختی تأثیر بگذارد، به طوری که در فرایندهای اصطکاکی نیز به دلیل عدم وجود پودر و یا سرباره سرعت خنک شدن قطعه پس از جوشکاری بسیار بالاست و خنک شدن سریع می‌تواند منجر به تشکیل ریز ساختارهای شکننده شود که استحکام جوش را به خطر می‌اندازد.

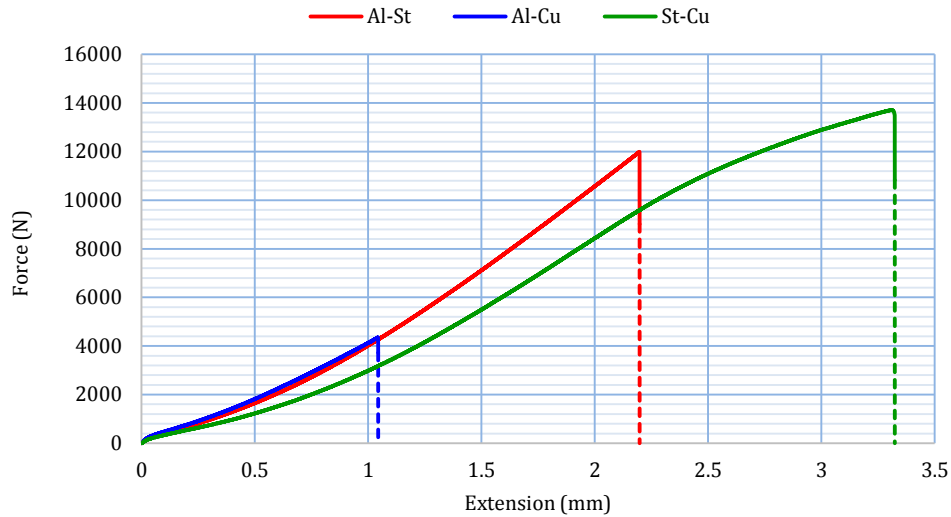


شکل ۱۲ مقطع شکست سه نمونه از دوفلزی‌ها پس از آزمون کشش، (شماره نمونه و جنس هر فلز در تصویر درج شده است)  
 (الف) فولاد- مس (St-Cu)، (ب) آلومینیوم- مس (Al-Cu)، (ج) آلومینیوم- فولاد (Al-St)

در ادامه نمودارهای نیرو جابجایی قطعات دوفلزی مورد بررسی قرار گرفته است که به عنوان نمونه در شکل ۱۳ از هر گروه دوفلزی قطعه‌ای که بیشترین تنش نهایی را به نام خود ثبت نموده جهت مقایسه و ارزیابی بهتر در یک تصویر آورده شده است. این نمودارها نتیجه‌ی قبلی درباره‌ی شکست ترد از ناحیه‌ی اتصال را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که قطعات پس از جوشکاری به دلیل سختی ایجاد شده در ناحیه فلز جوش<sup>۳</sup> (WZ) و ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)، نرمی و چقرمگی اولیه‌ی فلزات پایه<sup>۴</sup> (BM) را ندارند و در حین کشش رفتاری ترد گونه از خود بروز می‌دهند، به طوریکه تمام نمودارها حاکی از افزایش متناسب نیرو و جابجایی در حین کشش تا قبل از رسیدن به نقطه‌ی تنش نهایی است اما پس از رسیدن به نقطه‌ی تنش نهایی، نمونه از ناحیه فلز جوش که ساختاری متفاوت از فلز پایه دارد بدون ایجاد حالت گلوبی دچار گسیختگی و شکست ترد شده است. بنابراین روی نمودار دو نقطه‌ی تنش نهایی<sup>۵</sup> و تنش

<sup>1</sup> Recrystallization  
<sup>2</sup> Heat Affected Zone (HAZ)  
<sup>3</sup> Weld Zone (WZ)  
<sup>4</sup> Base Metal (BM)  
<sup>5</sup> Ultimate Stress

شکست<sup>۱</sup> (گسیختگی) نیز در فاصله‌ی بسیار کم و نامحسوسی از هم قرار دارند و به صورت یک نقطه دیده می‌شوند. این قضیه از جدول ۴ نیز مشخص است، به طوری که در اکثر نمونه‌ها اعداد ثبت شده برای تنش نهایی و تنش شکست با یکدیگر برابر هستند و یا اختلاف بسیار کمی باهم دارند. این موضوع با شکل نمودارها در لحظه‌ی شکست و کاهش سریع نیرو به سمت صفر نیز سنخیت دارد. این اختلاف کم بین تنش نهایی و تنش گسیختگی نشان دهنده‌ی رفتار ترد و شکننده‌ی ماده است. در ادامه با بررسی اطلاعات موجود در جداول می‌توان دریافت که رابطه‌ی مستقیمی بین افزایش دوران و زمان اصطکاک با افزایش استحکام کششی ماده وجود دارد. به طوری که هرچه به سرعت دوران افزوده شده و یا در یک دوران ثابت، زمان اصطکاک افزایش یافته، به اعداد ثبت شده برای تنش نهایی نیز افزوده شده است. همچنین به تبعیت از افزایش تنش نهایی درصد ازدیاد طول قطعات نیز بیشتر شده است [۱۱، ۱۲].



شکل ۱۳ نمودار نیروجابجایی نمونه‌های شماره ۹ (Al-St)، شماره ۱۸ (Al-Cu)، و شماره ۲۷ (St-Cu)

جدول ۴ نتایج آزمون کشش نمونه‌های دوفلزی غیرهمجنس به ترتیب شماره

نمونه‌های فولاد- مس (St-Cu)				نمونه‌های آلومینیوم- مس (Al-Cu)				نمونه‌های آلومینیوم- فولاد (Al-St)			
شماره نمونه	تنش (MPa)		ازدیاد طول (%)	شماره نمونه	تنش (MPa)		ازدیاد طول (%)	شماره نمونه	تنش (MPa)		ازدیاد طول (%)
	شکست نهایی	شکست نهایی			شکست نهایی	شکست نهایی			شکست نهایی	شکست نهایی	
۱۹	عدم جوشکاری			۱۰	عدم جوشکاری			۱	۴۷/۲۱	۴۷/۱۶	۲/۷۶
۲۰	۹۵/۲۷	۹۳/۲۵	۴/۴۲	۱۱	۱۷/۸۹	۱۳/۳۲	۱/۳۲	۲	۶۸/۶۶	۶۸/۶۶	۲/۸۶
۲۱	۱۶۰/۴۲	۱۵۸/۳۱	۹/۳۸	۱۲	۴۱/۵۴	۴۱/۵۴	۲/۳۹	۳	۹۶/۴۸	۹۶/۴۸	۴/۶۵
۲۲	عدم جوشکاری			۱۳	عدم جوشکاری			۴	۵۴/۱۹	۵۴/۱۴	۳/۱۰
۲۳	۱۱۵/۸۳	۱۰۵/۸۱	۵/۷۸	۱۴	۱۸/۴۵	۱۸/۳۱	۱/۶۸	۵	۷۵/۱۳	۷۵/۱۳	۴/۵۹
۲۴	۱۷۴/۲۴	۱۷۲/۱۳	۹/۱۵	۱۵	۵۵/۰۸	۵۵/۰۸	۳/۹۹	۶	۱۱۰/۴۰	۱۱۰/۳۵	۴/۰۴
۲۵	۴۴/۳۵	۴۲/۲۲	۲/۶۹	۱۶	۱۱/۱۹	۱۰/۸۲	۰/۹۴	۷	۷۰/۸۶	۷۰/۸۶	۴/۰۳
۲۶	۱۷۳/۴۹	۱۷۲/۴۱	۹/۸۴	۱۷	۲۵/۹۹	۲۵/۸۵	۲/۶۱	۸	۸۳/۰۹	۸۳/۰۴	۴/۸۶
۲۷	۱۷۴/۴۷	۱۷۲/۶۹	۸/۷۴	۱۸	۵۵/۴۵	۵۵/۴۱	۳/۰۶	۹	۱۵۲/۶۴	۱۵۲/۶۴	۷/۴۴

### ۳-۲-۱- ارزیابی نتایج آزمون کشش نمونه‌های دوفلزی آلومینیوم- فولاد (Al-St)

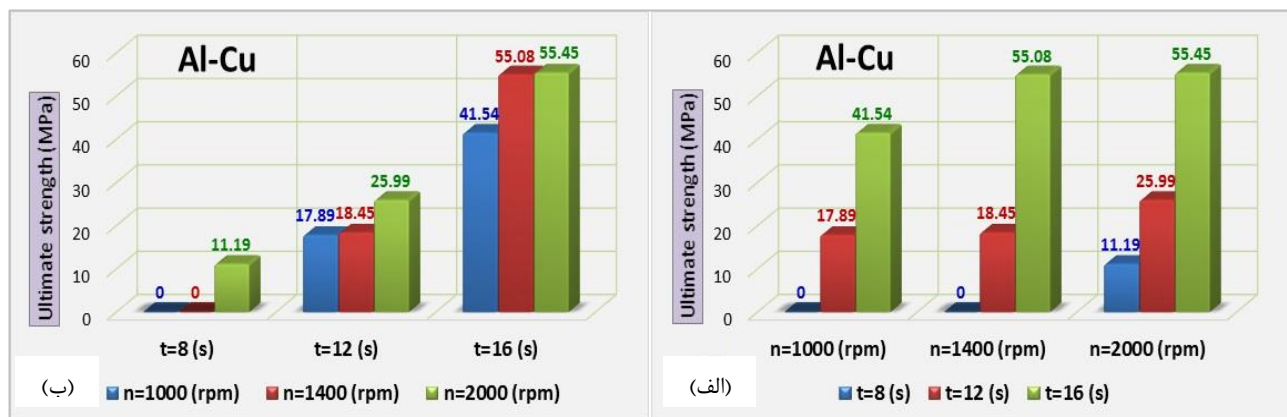
بر اساس اطلاعات ثبت شده در جدول ۴ در نمونه‌های دوفلزی آلومینیوم- فولاد بیشترین تنش نهایی با حدود ۱۵۲ مگاپاسکال برای نمونه‌ی شماره‌ی ۹ ثبت شده است که این نمونه در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و زمان اصطکاک ۱۶ ثانیه مورد جوشکاری قرار گرفته است. همچنین کمترین تنش نهایی نیز با حدود ۴۷ مگاپاسکال برای نمونه‌ی شماره‌ی ۱ ثبت شد که از لحاظ سرعت دوران با

<sup>1</sup> Fracture Stress



دور بردقیقه و زمان اصطکاکی ۱۶ ثانیه جوشکاری شده، با تنش نهایی ۵۵/۰۸ مگاپاسکال قرار دارد. همچنین نمونه‌ی شماره‌ی ۱۶ نیز که در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بردقیقه و زمان اصطکاکی ۸ ثانیه جوشکاری شده است با تنش نهایی حدود ۱۱ مگاپاسکال کمترین استحکام کششی را در بین نمونه‌ها داراست. قابل ذکر است که دو نمونه‌ی ۱۰ و ۱۳ که از نظر زمان اصطکاک متناظر با نمونه‌ی شماره‌ی ۱۶ است هیچکدام در دوره‌های ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ دور بردقیقه در طی زمان اصطکاکی ۸ ثانیه جوشکاری نشدند که دلیل آن پیش‌تر توضیح داده شد. لذا نتیجه می‌شود برای جوشکاری اصطکاکی غیرهمجنس آلومینیوم و مس که هردو فلز از رسانایی گرمایی و ضریب انتقال حرارت بالایی برخوردارند زمان اصطکاک ۸ ثانیه کافی و بهینه نیست. همچنین نتیجه می‌شود در حین جوشکاری به دلیل مذکور نسبت حرارت خروجی به حرارت ورودی بالاتر است بنابراین برای جبران این ضعف به افزایش سرعت و ایجاد حرارت قوی در جوشکاری نیاز است که با افزایش دوران نسبت حرارت خروجی به حرارت ورودی تعدیل شده و کاهش می‌یابد. لذا با افزایش سرعت دوران به ۲۰۰۰ دور بردقیقه، دو فلز در زمان کوتاه ۸ ثانیه جوشکاری شدند. بنابراین مشاهده می‌شود که افزایش سرعت دوران می‌تواند اثر هدایت حرارتی و رسانایی گرمایی دو فلز آلومینیوم و مس را خنثی نماید.

در نمودارهای شکل ۱۵ دو پارامتر سرعت دوران و زمان اصطکاک در جوشکاری فلزات آلومینیوم و مس مورد توجه قرار گرفته است. همان‌گونه که از اختلاف ارتفاع کم ستون‌ها و همچنین اختلاف کم اعداد تنش نهایی در نمودارهای شکل ۱۵-ب مشخص است، در جوشکاری غیرهمجنس فلزات آلومینیوم و مس تأثیر افزایش سرعت دورانی در یک زمان اصطکاک ثابت بسیار کمتر از تأثیر افزایش زمان اصطکاک در یک سرعت دورانی ثابت است. در توضیح بیشتر باید گفت از مشاهده‌ی نمودارهای شکل ۱۵-ب مشخص است که در زمان اصطکاک ۸ ثانیه افزایش سرعت دوران تأثیر چندانی بر بهبود وضعیت اتصال نداشته و در سرعت‌های ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ اتصال صورت نپذیرفته است. همچنین در زمان اصطکاکی ۱۲ و ۱۶ ثانیه نیز با افزایش عده‌ی دوران تنش نهایی نمونه‌ها با اختلاف بسیار کمی افزوده شده که باتوجه به خطاهای موجود در فرایند جوشکاری می‌توان این اختلاف کم را نادیده گرفت. لذا باتوجه به اختلاف ارتفاع بیشتر ستون‌ها و تفاوت محسوس اعداد تنش نهایی در نمودارهای شکل ۱۵-الف مشخص است افزایش زمان اصطکاک در یک سرعت دوران ثابت، تأثیر بسزایی در افزایش کیفیت فلز جوش و استحکام کششی اتصال داشته است.



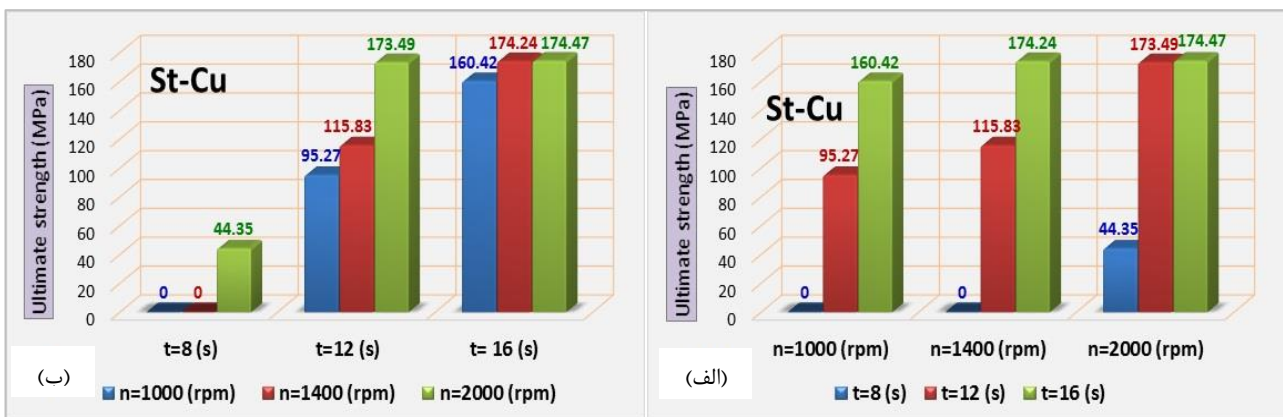
شکل ۱۵ الف) مقایسه اثر افزایش زمان اصطکاک در یک سرعت ثابت (Al-Cu)، ب) مقایسه اثر افزایش سرعت دوران در یک زمان ثابت (Al-Cu)

### ۳-۲-۲-۳- ارزیابی نتایج آزمون کشش نمونه‌های دوفلزی فولاد-مس (St-Cu)

باتوجه به اطلاعات درج شده برای قطعات دوفلزی فولاد-مس که در جدول ۴ ثبت شده است، نمونه‌ی شماره‌ی ۲۷ که در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بردقیقه و زمان اصطکاکی ۱۶ ثانیه جوشکاری شده با ۱۷۴/۴۷ مگاپاسکال بیشترین تنش نهایی را به خود اختصاص داده و پس از آن نمونه‌های شماره‌ی ۲۴ و ۲۶ با اختلاف بسیار کمی به ترتیب با ثبت اعداد ۱۷۴/۲۴ و ۱۷۳/۴۹ مگاپاسکال در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارند. همچنین نمونه‌ی شماره‌ی ۲۵ که در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بردقیقه و زمان اصطکاکی ۸ ثانیه جوشکاری شده با حدود ۴۴ مگاپاسکال کمترین تنش نهایی را به نام خود ثبت نموده است. البته نمونه‌های شماره‌ی ۱۹ و ۲۲ که متناظر با نمونه‌ی شماره‌ی ۲۵ در زمان اصطکاکی ۸ ثانیه جوشکاری شده‌اند هیچ‌کدام موفق به ایجاد اتصال نشدند. لذا همان‌طور که قبلاً گفته شد، در اثر ضریب هدایت حرارتی بالای فلز مس، این زمان برای رسیدن به درجه حرارت آهنگری (حدود ۹۰۰ درجه

سانتی‌گراد) کافی نیست. به همین دلیل، با افزایش سرعت دورانی از ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، علاوه بر افزایش سرعت جوشکاری، حجم حرارت ناشی از اصطکاک نیز افزایش می‌یابد، و در نتیجه، با افزایش حرارت ورودی نسبت به حرارت خروجی، فلز مس در آستانه‌ی دمای آهنگری قرار می‌گیرد و با فولاد جوشکاری می‌شود. بنابراین به این ترتیب در نمونه‌ی شماره‌ی ۲۵، در مدت زمان اصطکاکی ۸ ثانیه، اتصالی ضعیف‌تر شکل گرفت.

در نمودارهای ستونی شکل ۱۶ تأثیر پارامترهای سرعت دوران و زمان اصطکاک در نمونه‌های فولاد-مس باهم به صورت دقیق‌تر مورد ارزیابی قرار گرفته است. آن‌طور که از شکل ۱۶-الف مشخص است تأثیر تغییر زمان اصطکاک برای سرعت‌های ۱۰۰۰ و ۱۴۰۰ دور بر دقیقه کاملاً بارز و مشخص است و با افزایش زمان اصطکاک به مقدار تنش نهایی نمونه‌ها افزوده شده است. برای سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه نیز با افزایش زمان اصطکاک از ۸ به ۱۲ ثانیه تغییر تنش نهایی از حدود ۴۴ به ۱۷۳ مگاپاسکال محسوس است اما این تغییر با افزایش زمان از ۱۲ به ۱۶ ثانیه و تغییر تنش نهایی از حدود ۱۷۳ به ۱۷۴ مگاپاسکال چندانی محسوس نیست. اما در نمودارهای شکل ۱۶-ب تأثیر تغییر سرعت دوران فقط در زمان اصطکاک ۱۲ ثانیه برای نمونه‌ها محسوس است به طوری که با افزایش سرعت دوران از ۱۰۰۰ به ۱۴۰۰ و سپس ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب تنش نهایی نیز از حدود ۹۵ به ۱۱۵ مگاپاسکال و سپس به ۱۷۳ مگاپاسکال رسیده است. اما در زمان اصطکاک ۸ ثانیه به دلیل که قبلاً ذکر شد سرعت دوران‌های کمتر از ۲۰۰۰ دور بر دقیقه برای جوشکاری فلز مس بهینه نیست و در زمان اصطکاک ۱۶ ثانیه نیز آن‌طور که اختلاف ارتفاع نمودارها نشان می‌دهد، تغییر سرعت دوران تأثیر بسزایی در افزایش چشم‌گیر استحکام کششی نمونه‌ها نداشته و تنها مقدار کمی بر میزان تنش نهایی آن‌ها افزوده است، به طوری که با افزایش سرعت دوران از ۱۰۰۰ به ۱۴۰۰ دور بر دقیقه تنش نهایی نمونه از حدود ۱۶۰ به ۱۷۴/۲۴ مگاپاسکال رسیده و سپس با افزایش سرعت به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه صرفاً در حد چند صدم مگاپاسکال به تنش نهایی افزوده شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در جوشکاری اصطکاکی دورانی فولاد و مس، تأثیر افزایش زمان اصطکاک نسبت به افزایش سرعت دوران چشمگیرتر است.



شکل ۱۶ الف) مقایسه اثر افزایش زمان اصطکاک در یک سرعت ثابت (St-Cu)، ب) مقایسه اثر افزایش سرعت دوران در یک زمان ثابت (St-Cu)

### ۳-۲-۳- نتایج آزمون متالوگرافی نمونه‌های دوفلزی

هدف از انجام آزمون متالوگرافی بررسی و مقایسه‌ی تأثیر پارامتر سرعت دوران در یک زمان اصطکاکی ثابت روی ریز ساختار فلز پایه و همچنین نواحی مختلف فلز جوش از جمله مرز اتصال بین دو فلز و منطقه‌ی متأثر از حرارت آن‌ها می‌باشد. از هر گروه از دوفلزی‌ها سه نمونه که در زمان اصطکاک ۱۶ ثانیه در سرعت‌های ۱۰۰۰، ۱۴۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه مورد جوشکاری قرار گرفتند، برای انجام بررسی‌های متالوگرافی انتخاب شدند. از هر نمونه با میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تصاویری از نواحی مختلف فلز پایه، ناحیه‌ی متأثر از حرارت و مرز اتصال ثبت شده است که به ترتیب شماره و جنس به بررسی و ارزیابی آن‌ها پرداخته می‌شود. تصاویر میکروسکوپ نوری با استفاده از میکروسکوپ لوپ یا استریوسکوپ با قدرت بزرگنمایی حداقل ۸ و حداکثر ۵۰ برابر اندازه واقعی ایجاد شده است و تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی نیز دارای دقت ۵۰، ۵۰۰، ۲۰ و ۱۰ میکرومتر می‌باشد.

## ۳-۲-۱- بررسی نتایج آزمون متالوگرافی نمونه‌های آلومینیوم- فولاد (Al-St)

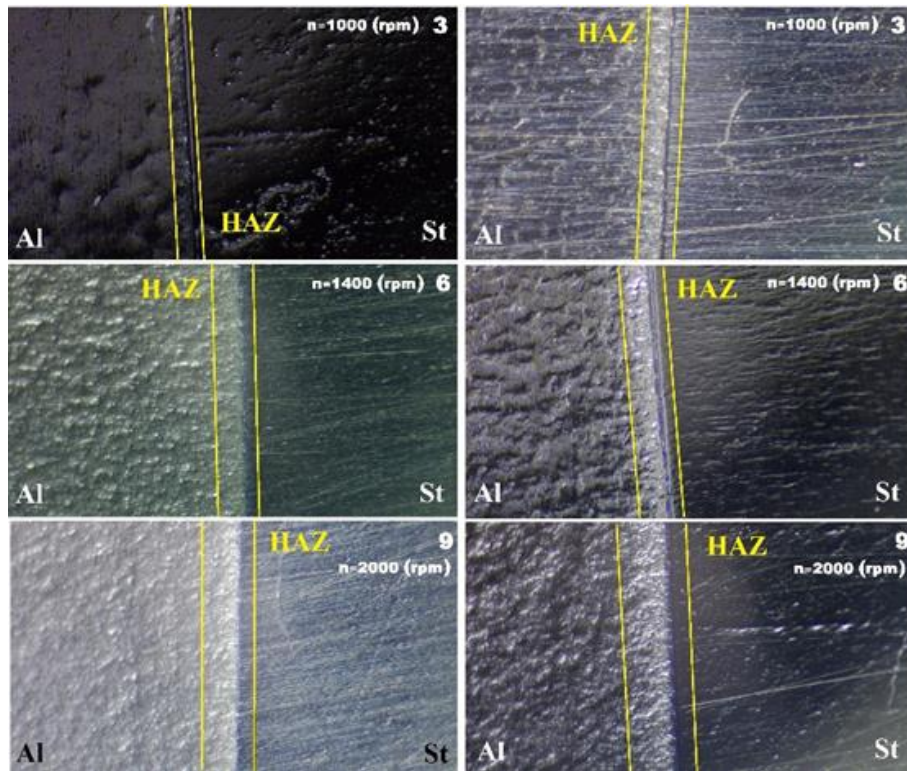
از تفسیر عکس‌های میکروسکوپ نوری که از سطح مقطع اتصال فولاد به آلومینیوم گرفته شده مشخص است (شکل ۱۷-الف) که سطح فلز پس از جوشکاری به سه قسمت فلز پایه، منطقه‌ی متأثر از حرارت و منطقه‌ی فلز جوش تقسیم شده است. باتوجه به قدرت بزرگنمایی کم میکروسکوپ نوری به وضوح نمی‌توان درباره‌ی اتفاقات درون فلز جوش صحبتی کرد ولی آنچه که مشخص است فلز جوش مانند مرز باریک سیاه رنگی در بین دو فلز قرار گرفته که از نظر ترکیب متالورژیکی متفاوت از فولاد و آلومینیوم است. آنچه که به صورت محسوس قابل مشاهده است تفاوت دانه بندی‌های ساختاری بین منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه است. به ویژه این تفاوت در سمت آلومینیوم (سمت چپ نمونه) به دلیل داشتن زمینه‌ی نقره‌ای رنگ واضح‌تر است. به طوری که هرچه از فلز پایه به سمت مرز اتصال نزدیک می‌شویم بافت اسفنجی فلز آلومینیوم ریزتر می‌شود. از مقایسه‌ی تصاویر سه نمونه باهم مشخص می‌شود که با افزایش سرعت دورانی جوشکاری باند منطقه‌ی متأثر از حرارت در دو طرف مرز اتصال بزرگتر شده است. این موضوع توسط شریفی و همکاران [۱۱] نیز گزارش شده است. البته این ناحیه در سمت فلز فولاد به دلیل داشتن دمای ذوب بالاتر و همچنین سرعت انتقال حرارت پایین‌تر کوچکتر است. همچنین در برخی تصاویر روی ناحیه‌ی فلز پایه خط و خش‌هایی مشاهده می‌شود که در حین پولیش‌کاری ایجاد شده و به دلیل دوفلزی بودن نمونه‌ها اجتناب ناپذیر است. زیرا تفاوت خواص شیمیایی و فیزیکی هر فلز باعث می‌شود گرد ذرات ساییده شده‌ی آن روی فلز مجاور اثراتی نظیر خط و خش و تخلخل‌های بسیار ریز و میکروسکوپی ایجاد نماید که این عوارض در حالت ماکروسکوپی دیده نمی‌شود.

میکروسکوپ الکترونی تصاویر دقیق‌تری از مرز اتصال نمونه‌های فولاد و آلومینیوم ارائه داده است (شکل ۱۷-ب) به طوری که در مرز جوش هر سه نمونه آثاری از خوردگی فلز آلومینیوم به وضوح دیده می‌شود. حرارت ناشی از جوشکاری باعث کاهش مقاومت به خوردگی آلومینیوم و منطقه‌ی مجاور خط جوش شده است. همچنین در جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن به فولادها همواره بحث انحلال آهن در آلومینیوم نیز وجود دارد که باعث تشکیل فازهای سخت و خشک (نظیر  $FeAl_3$  و  $Fe_2Al_5$ ) در مرز جوش می‌شود که اتصال را بسیار ترد و شکننده می‌کند [۱]. بنابراین تغییرات دما سبب بروز تغییر در اندازه‌ی دانه‌ها شده و احتمال رسوب بعضی ترکیبات و فازهای بین فلزی<sup>۱</sup> (IMC) و ناخالصی‌ها را در مرز دانه‌های ناحیه‌ی اتصال تقویت کرده است که همگی باعث کاهش مقاومت به خوردگی آلومینیوم در دمای بالا می‌شود [۱، ۳، ۴]. ضمن اینکه آلومینیوم به سرعت با اکسیژن هوا ترکیب شده و همواره یک لایه اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) نازک به ضخامت ۰/۰۲۵ میکرون تشکیل می‌دهد که با افزایش دما ضخامت آن بیشتر می‌شود. این لایه بسیار محکم و مقاوم است و به سطح آلیاژ می‌چسبد به طوری که اگر با روش‌های مکانیکی یا شیمیایی رفع شود دوباره در زمان کوتاهی تشکیل خواهد شد. نقطه ذوب این قشر اکسیدی حدود ۱۹۵۰ تا ۲۰۵۰ درجه سانتی‌گراد است و در آلومینیوم جامد یا مذاب حل نمی‌شود [۱، ۴]. باتوجه به این تفسیر بعید نیست در فرایند جوشکاری اصطکاکی به دلیل عدم حفاظت از ناحیه جوش و تماس مستقیم با هوا چنین واکنشی به وجود بیاید و مانع از پیوند متالورژیکی کامل بین دو فلز شود. همچنین در آلومینیوم حرارت ناشی از جوشکاری باعث ایجاد پیرسخت<sup>۲</sup> شدن فلز جوش و ناحیه‌ی متأثر از حرارت شده است. ناحیه‌ی متأثر از حرارت قسمتی از فلز است که در مجاورت جوش آنیل محلولی<sup>۳</sup> گردیده و به صورت موضعی پیرسخت می‌شود. بنابراین دمای جوشکاری باعث ضعف و تردی منطقه‌ی متأثر از حرارت فلز شده و استحکام و انعطاف پذیری آن از فلز پایه کمتر است [۱، ۴]. موضوع کاهش استحکام در نمونه‌های شماره‌ی ۳ و ۶ نسبت به نمونه‌ی شماره‌ی ۹ همواره به سرعت جوشکاری بستگی دارد. همان‌گونه که از آزمون‌های کشش هم مشخص است با افزایش سرعت جوشکاری کاهش استحکام قطعات کمتر شده است، زیرا فلز با دمای بالاتر و در مدت زمان سریع‌تر جوشکاری شده است. همان‌گونه که از تصاویر مشخص است در نمونه‌ی شماره‌ی ۳ و ۶ که با سرعت‌های کمتر جوشکاری شده مشکلات گفته شده در مرز جوش شدیدتر است و در نمونه‌ی شماره‌ی ۹ که با سرعت بالا جوشکاری شده است، این مشکلات کاهش یافته است. لذا نتیجه می‌شود در جوشکاری اصطکاکی آلومینیوم استفاده از حرارت ورودی زیاد همراه با سرعت بالا یک اصل مهم و بهینه کننده در اتصال است. نکته‌ی دیگری که از تصاویر میکروسکوپ الکترونی می‌توان دریافت این است که ناحیه‌ی جوش به نسبت منطقه‌ی متأثر از حرارت از ساختار ریزتری برخوردار است.

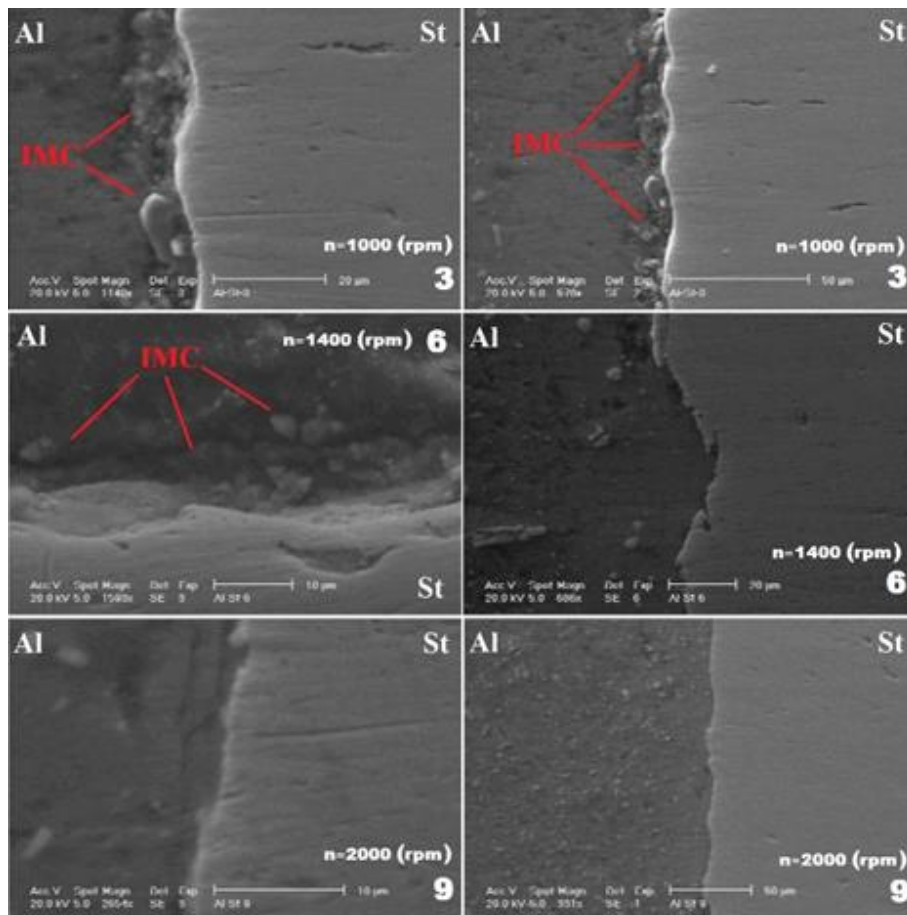
<sup>1</sup> Intermetallic Compound (IMC)

<sup>2</sup> Age Hardening

<sup>3</sup> Solution Annealing



(الف)



(ب)

شکل ۱۷ تصاویر نمونه‌های آلومینیوم- فولاد: (الف) میکروسکوپ نوری، (ب) میکروسکوپ الکترونی (شماره نمونه، سرعت دوران جوشکاری و میزان بزرگنمایی روی تصاویر درج شده است)

## ۳-۲-۲-۳- بررسی نتایج آزمون متالوگرافی نمونه‌های آلومینیوم-مس (Al-Cu)

از مزیت‌های جوشکاری اصطکاکی برای فلز مس ایجاد منطقه‌ی متأثر از حرارت بسیار باریک است [۳، ۴]. لذا در تصاویر میکروسکوپ نوری برای نمونه‌ی شماره‌ی ۱۲ آلومینیوم-مس اثر چندانی از منطقه‌ی متأثر از حرارت در کنار خط اتصال دو فلز دیده نمی‌شود (شکل ۱۸-الف). البته این موضوع می‌تواند به خاصیت هدایت حرارتی بالای هر دو فلز نیز مرتبط باشد که حرارت را در یک نقطه متمرکز نگه نمی‌دارند و بلافاصله آن را به نقاط دیگر منتقل می‌کنند. اما در نمونه‌های شماره‌ی ۱۵ و ۱۸ با افزایش سرعت دوران که در نتیجه حرارت ورودی نیز به دو قطعه افزایش می‌یابد، در مجاورت مرز جوش به ویژه در سمت آلومینیوم آثاری از ریز شدن دانه‌ها و منطقه‌ی متأثر از حرارت دیده می‌شود. با توجه به مقدار بزرگنمایی کم میکروسکوپ نوری درباره‌ی ماهیت خود مرز جوش نظر چندانی نمی‌توان داد اما در هر سه نمونه حفره<sup>۱</sup>، ترک‌های<sup>۲</sup> طولی و فضاهای خالی<sup>۳</sup> سیاه رنگی در مرز جوش و در مرکز دو قطعه و همچنین در اندازه‌های بزرگتری در گوشه‌های اتصال دیده می‌شود که این عارضه در نمونه‌ی شماره‌ی ۱۲ مشهود تر است و رفته رفته با افزایش سرعت دوران از مقدار آن در نمونه‌ی شماره‌ی ۱۵ و ۱۸ کاسته شده است. به طوری که در گوشه‌های اتصال نمونه‌ی شماره‌ی ۱۸ هیچ حفره، ترک و فضای خالی دیده نمی‌شود. عوامل مهمی باعث به وجود آمدن حفره، فضای خالی و ترک در جوشکاری فلز مس می‌شود. از جمله ناخالصی‌هایی نظیر روی، کادمیم و فسفر که نقطه‌ی ذوب پایینی دارند و در حین جوشکاری بخار شده و تولید حفره، فضای خالی و خلل و فرج<sup>۴</sup> می‌نماید. برای پیشگیری از بروز چنین مشکلاتی باید تا حد امکان فلز مس و آلیاژهای آن را با سرعت بالا و حرارت قوی جوشکاری نمود تا فرصت پدید آمدن این عیوب در فلز جوش کاسته شود [۱]. از طرفی همان‌طور که پیش‌تر گفته شد اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ ) یک لایه مقاوم و پایدار است که در دمای بالا باقی می‌ماند و مانع از پیوند کامل متالورژیکی بین فلزات می‌شود [۱، ۴]. لذا ایجاد حفره و خدایش (فضای خالی) در مرز اتصال به این دلیل نیز بعید نیست. همچنین در فصل مشترک دو فلز به دلیل سرد شدن غیریکنواخت و اختلاف زیاد در رسانایی و انبساط حرارتی، تنش‌های پسماند<sup>۵</sup> به وجود می‌آید که در حین سرد شدن ترک و خلل و فرج در اتصال تشدید می‌شود. در پژوهش صورت گرفته توسط قربانی و همکاران [۱۶] به نقل از ژو و همکاران آمده است که در جوشکاری اصطکاکی مس و آلومینیوم دمای فرایند ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است که این دما اندکی بالاتر از دمای ذوب فاز یونکتیک مس و آلومینیوم است. بنابراین در حین فرایند جوشکاری اصطکاکی امکان تشکیل فاز مایع و انجماد آن به صورت دندریت‌های<sup>۶</sup> موضعی وجود دارد. از طرفی وسعت محدوده‌ی خمیری فلز مس در استحاله‌ی مایع به جامد زیاد است و این موضوع مس را در هنگام انجماد به ایجاد ترک‌های گرم<sup>۷</sup> مستعد می‌کند زیرا در هنگام انجماد مقدار مذاب بین دندریتی سبب می‌شود تا فضاهای خالی مستعدی برای ایجاد ترک در بین دندریت‌ها پدید آید. ضمناً در حین انجماد نیز تنش‌های انقباضی<sup>۸</sup> فضاهای خالی بین دندریتی را تشدید می‌کند [۱]. هرچند وجود چنین ترک‌هایی در جوشکاری ذوبی فلز مس شایع‌تر است اما در فرایند جوشکاری اصطکاکی نیز به دلیل فشار و حرارت زیادی که در فصل مشترک قطعات به وجود می‌آید پدید آمدن چنین عوارضی دور از انتظار نیست. واژه دندریت در علم مواد به ساختارهای بلوری شاخه‌ای درخت مانند اشاره دارد که در طی فرایند انجماد یک فلز یا آلیاژ تشکیل می‌شود. نکته‌ی دیگر که در بعضی تصاویر میکروسکوپ نوری دیده می‌شود وجود برخی خط و خش‌ها در زمینه‌ی فلزات پایه‌ی است که دلیل آن در توضیحات تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آلومینیوم و فولاد مورد اشاره قرار گرفت.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی اطلاعات بهتری از پدیده‌های درون مرز باریک فلز جوش آلومینیوم و مس به ما می‌دهد (شکل ۱۸-ب). با دقت در تصاویر نمونه‌ی ۱۲ می‌توان گفت اثری از فازهای بین فلزی دیده نمی‌شود که این موضوع به دلیل حرارت ورودی کمتر در سرعت‌های پایین جوشکاری و هدایت حرارتی بالای آلومینیوم و مس است. اما با دقت در تصاویر نمونه‌ی ۱۵ می‌توان پدیده‌ای شبیه به تشکیل فازهای سخت، ترد و شکننده‌ی بین فلزی را مشاهده نمود. برای جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن با مس در منابع متالورژی جوشکاری ترکیبات سخت و شکننده‌ی بین فلزی را از نوع  $CuAl$ ،  $CuAl_2$  و  $Cu_3Al_2$  ذکر کرده‌اند [۱، ۳]. افزایش حرارت باعث تشکیل این فازها در فصل مشترک دوفلز می‌شود. این موضوع در پژوهش صورت گرفته توسط قربانی و همکاران [۱۶] نیز

1 Hole

2 Crack

3 Void

4 Porosity

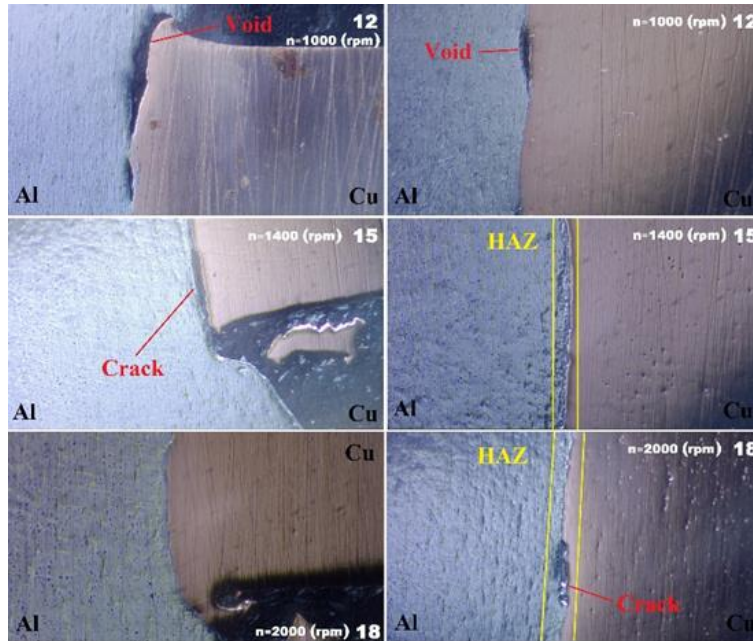
5 Residual Stress

6 Dendrite

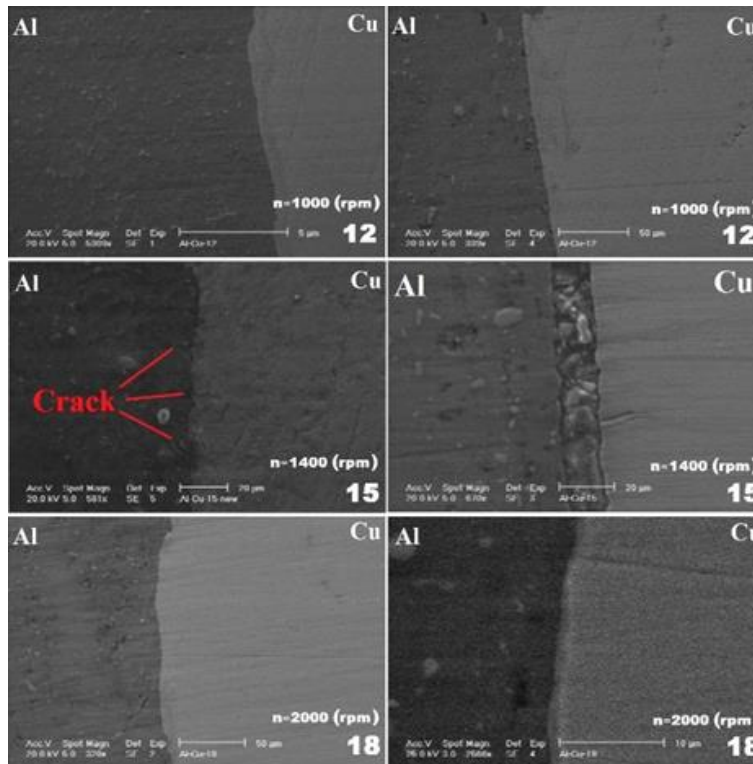
7 Hot Crack

8 Shrinkage Stress

گزارش شده است. این ترکیبات شکننده هستند و استحکام و انعطاف پذیری اتصال را کاهش می دهند و می توانند منجر به ترک خوردگی و جدایش در مرز اتصال شوند. همچنین پدیده مذکور می تواند به خمیری نشدن کافی مواد و نیز عدم پیوند کامل مواد در دو جبهه اتصال مرتبط باشد. این موضوع در تصاویر نمونه‌ی شماره‌ی ۱۸ به دلیل افزایش سرعت جوشکاری از بین رفته است. همچنین در نمونه‌ی شماره‌ی ۱۵ ترک‌هایی در فصل مشترک فلز آلومینیوم و مس مشهود است که در نمونه‌ی شماره‌ی ۱۸ با افزایش سرعت دوران کاسته شده است. بنابراین افزایش سرعت جوشکاری در فلزاتی نظیر مس و آلومینیوم که دارای خواص متالورژیکی ناسازگار با حرارت زیاد هستند فرصت تشکیل فازهای بین فلزی ترد و تشکیل ترک و فضاها ی خالی را به آنها نمی دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۸ تصاویر نمونه‌های آلومینیوم-مس: (الف) میکروسکوپ نوری، (ب) میکروسکوپ الکترونی (شماره نمونه، سرعت دوران جوشکاری و میزان بزرگنمایی روی تصاویر درج شده است)

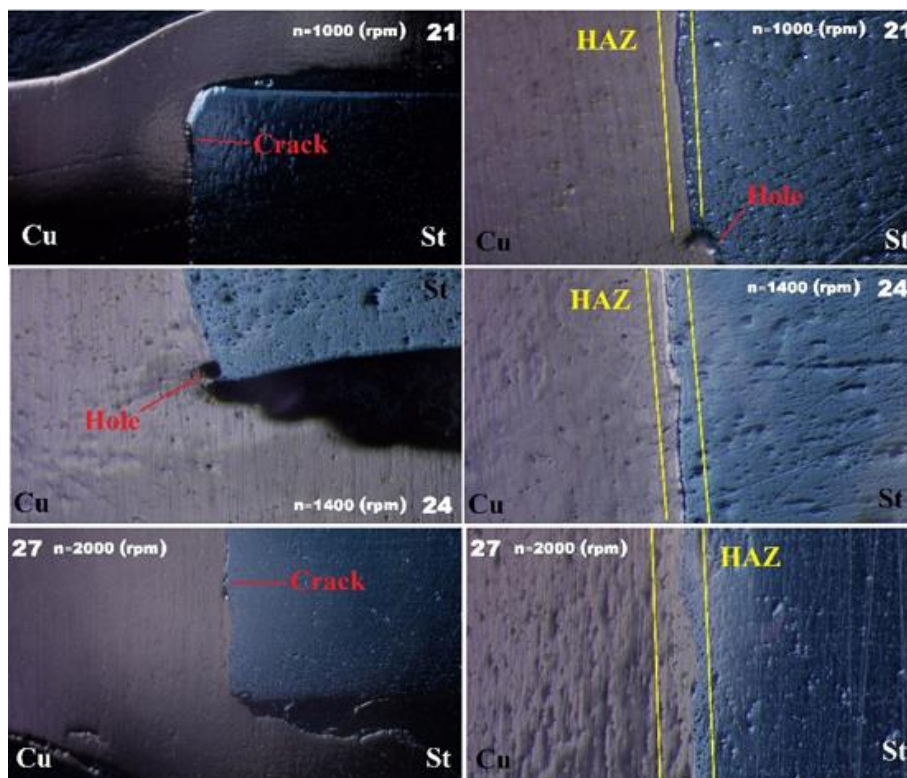
**۳-۲-۳-۳- بررسی نتایج آزمون متالوگرافی نمونه‌های فولاد-مس (St-Cu)**

از بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری برای نمونه‌های فولاد-مس دریافت می‌شود (شکل ۱۹-الف) که منطقه‌ی متأثر از حرارت به صورت بسیار باریکی در دو سمت مرز جوش وجود دارد به گونه‌ای که بی‌نظمی و بهم فشردگی خاصی در بافت فلز پایه‌ی مس و فولاد در نزدیکی مرز اتصال دیده می‌شود. این ساختار فشرده به دلیل ریز شدن دانه بندی فلزات پایه در ناحیه‌ی متأثر از حرارت می‌باشد. گفتنی است که پهنای باند ناحیه متأثر از حرارت با افزایش سرعت دوران و ورود حرارت بیشتر در نمونه‌های شماره‌ی ۲۴ و ۲۷ بیشتر شده است. مرز اتصال در تصاویر میکروسکوپ نوری دیده می‌شود اما به دلیل بزرگنمایی کم نمی‌توان به وضوح درباره‌ی ماهیت فلز جوش اظهار نظری کرد. همچنین مرز اتصال در نمونه‌ی شماره‌ی ۲۷ نسبت به دو نمونه‌ی دیگر یکپارچه و بهم آمیخته‌تر دیده می‌شود که حاصل افزایش سرعت دوران و در نتیجه افزایش سرعت جوشکاری است. از دیگر نکات قابل توجه نیز وجود ترک‌های طولی، حفره و فضاهای خالی در گوشه‌های اتصال نمونه‌های ۲۱ و ۲۴ است که این موضوع در نمونه‌ی شماره‌ی ۲۷ کاهش یافته است. با توجه به وجود مس در یک سمت نمونه این ترک‌ها می‌تواند از نوع ترک گرم باشد که درباره‌ی آن در بخش تفسیر عکس‌های نمونه‌های آلومینیوم و مس توضیح داده شد. همچنین در طول فرایند جوشکاری اصطکاکی، تغییر شکل پلاستیکی فلز مس به دلیل نرم‌تر بودن بیشتر از فولاد است؛ این تفاوت می‌تواند باعث ناهماهنگی در انتقال مواد و تشکیل حفره و فضاهای خالی کوچک در مرز و گوشه‌های اتصال شود.

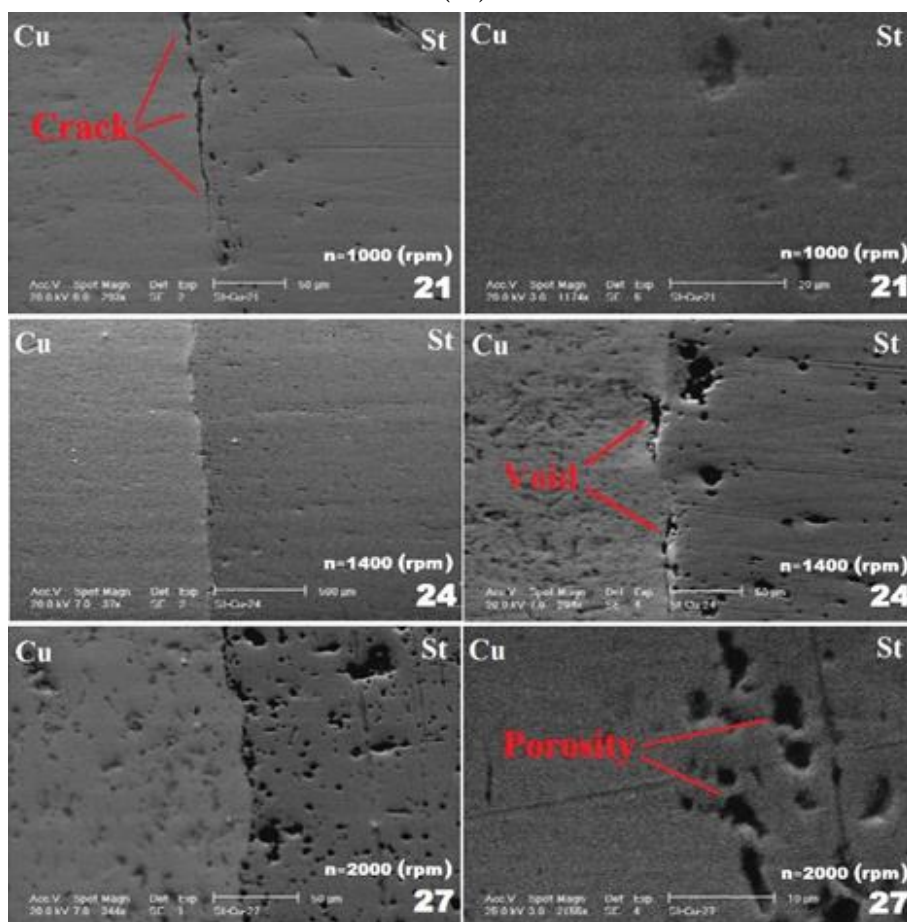
در تصاویر میکروسکوپ الکترونی ناحیه‌ی مرز اتصال نمونه‌های فولاد-مس با وضوح بهتری مشاهده می‌شود، (شکل ۱۹-ب) همان گونه که از تصاویر مشخص است اثری از ترکیبات بین فلزی و رسوب ناخالصی در بین مرز اتصال مس و فولاد دیده نمی‌شود؛ اما ترک‌های طولی با وضوح بیشتر در مرز اتصال نمونه‌های شماره‌ی ۲۱ و ۲۴ رویت می‌شود. همان گونه که از تصویر نمونه‌ی شماره‌ی ۲۷ مشخص است با افزایش سرعت دوران به ۲۰۰۰ دور بر دقیقه از مقدار این عیوب در ناحیه اتصال کم شده است. در سطرهای قبلی به چگونگی بروز ترک‌های گرم در حین جوشکاری فلز مس اشاره شد. لذا در ادامه به چند مورد احتمالی دیگر که می‌تواند باعث ایجاد ترک و فضاهای خالی در جوشکاری مس به فولاد شود اشاره خواهد شد. مورد اول اینکه فلز مس از هدایت حرارتی بالایی برخوردار است و گرمای ورودی را سریع‌تر از منطقه جوش دفع می‌کند که این امر می‌تواند نرخ سرد شدن اتصال را افزایش دهد. از طرفی، به دلیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین مس و فولاد، در حین جوشکاری، مس سریع‌تر و بیشتر از فولاد منبسط می‌شود و در هنگام سرد شدن نیز بیشتر از فولاد منقبض می‌شود. این تفاوت در انبساط و انقباض می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در مس و تنش‌های کششی در فولاد شود. در نتیجه، این تنش‌ها ممکن است در مرز اتصال تجمع یابند و منجر به کاهش استحکام و ایجاد ترک‌های ریز داخلی یا جدایش جزئی شوند. نکته‌ی دیگری که در جوشکاری غیرهمجنس مس و فولاد باعث بروز مشکلات متالورژیکی می‌شود، پدیده‌ی نفوذ مس در فولاد است؛ البته این موضوع بیشتر در فرایندهای جوشکاری ذوبی رخ می‌دهد. به گفته‌ی برخی منابع، مس مذاب در جریان جوشکاری به فولاد می‌تواند به درون مرزدانه‌های ساختار فولاد، به‌ویژه در منطقه‌ی متأثر از حرارت نفوذ کند. نقطه‌ی ذوب مس و آلیاژهای آن چند صد درجه کمتر از فولاد است و استحکام کششی آن‌ها نیز نزدیک به نصف فولاد می‌باشد. بنابراین، نفوذ مس با سرعت زیادی انجام شده و عمق آن گاهی تا ۱ میلی‌متر نیز می‌رسد [۱]. با این حال، در فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی، فلزات معمولاً به نقطه‌ی ذوب نمی‌رسند و در محدوده‌ی دمای آهنگری (خمیری) به یکدیگر متصل می‌شوند. اما به دلیل اعمال فشار و دمای بالا در ناحیه‌ی تماس، مقداری نفوذ مکانیکی و در برخی شرایط، انتشار محدود عناصر در سطح تماس و مرزدانه‌ها ممکن است رخ دهد. از آنجا که مس دارای نقطه‌ی ذوب پایین‌تر و نرم‌تر از فولاد است، تحت تغییر شکل پلاستیک بیشتری قرار گرفته و به درون زبری‌های سطح فولاد نفوذ می‌کند. این مسئله می‌تواند باعث ایجاد ناپیوستگی‌های میکروسکوپی در مرز اتصال شده و در نتیجه، چقرمگی اتصال و استحکام مکانیکی منطقه‌ی جوش را کاهش دهد. همچنین در تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی، تخلخل‌هایی در سطح فلز فولاد مشاهده می‌شود که در حالت ماکروسکوپی چندان قابل توجه نیست. این عوارض ممکن است ناشی از خوردگی گالوانیکی دوفلزی<sup>۱</sup> باشد که با عنوان خوردگی فلزات نامتشابه<sup>۲</sup> نیز شناخته می‌شود. احتمالاً این نوع خوردگی به دلیل دوفلزی بودن ماده و تفاوت ترکیبات شیمیایی مس و فولاد و همچنین استفاده از مواد ساینده (آلومینیوم اکسید و خمیر جلاسنج) در محیط مرطوب حین پولیش‌کاری روی فلز پایه فولاد ایجاد شده است.

<sup>1</sup> Bimetallic Corrosion

<sup>2</sup> Dissimilar Metal Corrosion



(الف)



(ب)

شکل ۱۹ تصاویر نمونه‌های فولاد-مس: (الف) میکروسکوپ نوری، (ب) میکروسکوپ الکترونی (شماره نمونه، سرعت دوران جوشکاری و میزان بزرگنمایی روی تصاویر درج شده است)

## ۴- نتیجه گیری

از ۲۷ نمونه غیرهمجنس ۲۴ نمونه جوشکاری اصطکاکی موفقیت آمیزی داشتند. سرعت دوران و زمان اصطکاک با اندازه و فرم گرده جوش و همچنین طول کوتاه‌شدگی نمونه‌ها پس از جوشکاری رابطه‌ی مستقیم دارد. به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالای فلز مس در سرعت‌های دورانی کمتر از ۲۰۰۰ دور بردقیقه زمان اصطکاک ۸ ثانیه برای جوشکاری قطعات دوفلزی آلومینیوم- مس و فولاد- مس مناسب نبود. در آزمون کشش همه‌ی نمونه‌های دوفلزی به دلیل سخت و ترد شدگی فلز جوش و همچنین تغییر ساختار کریستالی منطقه‌ی متأثر از حرارت از مرز اتصال گسیخته شدند، به طوری که استحکام کششی همه‌ی نمونه‌های دوفلزی از استحکام فلزات پایه کمتر گزارش شد. بدین منظور در نمونه‌های فولاد- آلومینیوم (Al-St) بیشترین و کمترین تنش نهایی به ترتیب در حدود ۱۵۲ و ۴۷ مگاپاسکال، در نمونه‌های آلومینیوم- مس (Al-Cu) در حدود ۵۵ و ۱۱ مگاپاسکال و در نمونه‌های فولاد- مس (St-Cu) نیز در حدود ۱۷۴ و ۴۴ مگاپاسکال ثبت گردید. بنابراین از مقایسه اعداد ثبت شده در آزمون کشش این نتیجه حاصل شد که نمونه‌های فولاد- مس (St-Cu) به نسبت دیگر نمونه‌های دوفلزی از استحکام کششی بالاتری برخوردار بودند، که می‌تواند به جهت نزدیکی دمای آهنگری فولاد و مس باشد. همچنین نمونه‌های آلومینیوم- مس (Al-Cu) به دلیل بالا بودن رسانایی گرمایی، ضریب هدایت حرارتی و نیز ضریب انبساط حرارتی از استحکام کششی کمتری برخوردار بودند. همچنین نتیجه شد در همه‌ی نمونه‌های دوفلزی با افزایش سرعت دوران (n) و زمان اصطکاک (t) به تنش نهایی نمونه‌ها افزوده شده است. لذا مؤلفه‌های سرعت دوران و زمان اصطکاک با کیفیت و کمیت استحکام کششی اتصال رابطه‌ی مستقیم دارد. به طوری که بالاترین استحکام کششی در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بردقیقه و زمان اصطکاک ۱۶ ثانیه به دست آمد. همچنین نتیجه شد که در یک سرعت دوران ثابت افزایش زمان اصطکاک در بهبود استحکام کششی قطعات مؤثرتر است از حالتی که زمان اصطکاک ثابت است و سرعت دوران افزوده می‌شود. همچنین این نتیجه حاصل شد که افزایش سرعت دوران و زمان اصطکاک دارای یک حد بهینه است و افزایش بیش از حد آن بی تأثیر بوده و یا سبب کاهش استحکام می‌شود.

بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد که ریز ساختار همه‌ی نمونه‌ها پس از جوشکاری به سه ناحیه‌ی فلز پایه، منطقه‌ی متأثر از حرارت و فلز جوش تقسیم شده‌اند. در همه‌ی نمونه‌ها هرچه از سمت فلز پایه به سمت ناحیه‌ی متأثر از حرارت و مرز جوش حرکت می‌کنیم ساختار دانه‌بندی فلز ریزتر می‌شود. به طوری که با افزایش سرعت دوران و ایجاد حرارت بیشتر پهنای باند منطقه‌ی متأثر از حرارت در طرفین مرز جوش بزرگتر شده است، این پهنای در سمتی از نمونه که فلز پایه دارای ذوب بالاتری بوده کوچکتر است. در حدود ۳۰ درصد از نمونه‌های متالوگرافی وجود فازهای بین فلزی ترد و شکننده محتمل است. این پدیده در نمونه‌هایی که دارای آلومینیوم است بیشتر مشاهده می‌شود. همچنین آزمون متالوگرافی نشان داد که جوشکاری با سرعت‌های بالا (۲۰۰۰ دور بردقیقه) باعث کاهش مشکلات ساختاری و عیوب در مرز اتصال می‌شود که این موضوع با نتایج به دست آمده از آزمون کشش نیز تطبیق دارد که نشان داد جوشکاری با سرعت‌های بالاتر منجر به ایجاد استحکام کششی بیشتر در نمونه‌ها می‌شود. با افزایش سرعت جوشکاری مقدار تشکیل حفره، ترک و فضاهای خالی به حداقل رسیده و دانه‌بندی در ناحیه اتصال کوچکتر شده است که نمونه با دانه بندی‌های ریزتر دارای سختی و استحکام کششی بالاتری هستند. در نهایت باتوجه به مشکلاتی که از نظر متالورژیکی برای فلزات رنگین مانند آلومینیوم و مس در دماهای بالا (به ویژه دمای مذاب) به وجود می‌آید لذا استفاده از فرایند جوشکاری اصطکاکی به عنوان یک روش غیر ذوبی (حالت جامد) برای جوشکاری این دسته از فلزات مناسب ارزیابی می‌شود.

## References

- [1] Moineian M. Welding key. 2nd ed. Vol. 1. Tehran: Azadeh Publications; 2004. [In Persian]
- [2] Kokabi AH, Mahmoudi Ghaznavi M. Welding technology: processes. Vol. 1. Tehran: Scientific Publishing Institute of Sharif University of Technology; 2011. [In Persian]
- [3] Kokabi AH, Bidokhti B, Jamshidi Aval H. Welding technology: metallurgy. Vol. 2. Tehran: Scientific Publishing Institute of Sharif University of Technology; 2009. [In Persian]
- [4] Sabet H. Welding of non-ferrous metals. Tehran: Jahan Jam Jam Publishing Institute, in collaboration with the Iranian Welding and Non-Destructive Testing Society; 2014. [In Persian]
- [5] Wang KK, Lin W. Flywheel friction welding research. Welding Journal. 1974 Jun;53(6):233s-41s.
- [6] Uzkut M, Ünlü BS, Yılmaz SS, Akdağ M. Friction welding and its applications in today's world. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Sustainable Development 2010 Jun 8 (pp. 8-9).
- [7] Mucic K, Enzinger N, Fuchs F. Linear friction welding of high strength chains. In: Proceedings of the 9th International Conference on Trends in Welding Research; 2012 Jun 4-8; Chicago, USA.

- [8] Bevington JH. Spinning tube. U.S. Patent No. US444721A. United States: U.S. Patent and Trademark Office; 1891 Jan 13.
- [9] Manufacturing Technology Inc (MTI). Friction welding. USA: MTI; 2024.
- [10] KUKA Industry. Technology-rotary friction welding. Germany: KUKA Industry; 2019.
- [11] Sharifi H, Azizieh M, Moeinifar S. Investigation of microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy joint welded by rotary friction welding. In: Proceedings of the 3rd National Conference on Mechanical Systems and Industrial Innovations; 2015 Feb 18-19; Ahvaz, Iran. [In Persian]
- [12] Ehavandi A, Aziziyeh M, Ashrafi A, Noshad S. Investigation of the properties of X52 steel pipe joints welded by rotary friction welding. In: Proceedings of the National Conference on Applied Research in Engineering and Basic Sciences; 2015 Mar 10; Tehran, Iran. [In Persian]
- [13] Zohoor M, Seyed Amirkhani SM. Investigation of cross sectional geometry on temperature and properties of welded area in the rotational friction welding process for AL-7075-T6. Modares Mechanical Engineering. 2016 Oct 10;16(8):13-20. [In Persian]
- [14] Hashemi Khosroshahi J, Sadeghi MH, Rasti A, Sabbaghi Farshi S. Finite element modeling of rotary friction welding of dissimilar pipes. Modares Mechanical Engineering. 2018 Mar-Apr;18(1):423-32. [In Persian]
- [15] Ashkani O, Abbasi A. Mechanical properties and microstructure of dissimilar CK22-CK35 steel joints produced by rotary friction welding. In: Proceedings of the 8th International Conference on Materials and Metallurgical Engineering; 2019 Oct 7-8; Tehran, Iran. [In Persian]
- [16] Ghorbani Amir Y, Zolriasatein A, Torabian H. Effect of rotary friction welding variables on mechanical and physical properties of aluminum-copper tube joints. Journal of Welding Science and Technology of Iran. 2020 Dec 10;6(2):29-39. [In Persian]
- [17] Ghasemi Tamami P, Javadi Manesh A, Barkhordari S. Investigation of mechanical and metallurgical properties in rotary friction welding process of 304 steel to copper. In: Proceedings of the 7th International Conference on Mechanical Engineering, Materials and Metallurgy; 2021; Tbilisi, Georgia. [In Persian]
- [18] Alves EP, An CY, Neto FP, dos Santos EF. Experimental determination of temperature during rotary friction welding of dissimilar materials. Frontiers in Aerospace Engineering. 2012 Nov 1;1(1):20-6.
- [19] Cheepu M, Ashfaq M, Muthupandi V. A new approach for using interlayer and analysis of the friction welding of titanium to stainless steel. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2017 Dec;70(10):2591-600. doi: [10.1007/s12666-017-1114-x](https://doi.org/10.1007/s12666-017-1114-x)
- [20] Khalfallah F, Boumerzoug Z, Rajakumar S, Raouache E. Optimization by RSM on rotary friction welding of AA1100 aluminum alloy and mild steel. International Review of Applied Sciences and Engineering. 2020 Apr 18. doi: [10.1556/1848.2020.00005](https://doi.org/10.1556/1848.2020.00005)
- [21] Marimuthu S, Balasubramanian KR, Kannan TT. Mechanical and surface morphology study of Monel-Copper joint by rotary friction welding. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;37:419-24. doi: [10.1016/j.matpr.2020.05.401](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.401)
- [22] Murugan SS, Sathiya P, Haq AN. Rotary friction welding and dissimilar metal joining of aluminium and stainless steel alloys. Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII, Welding Equipment and Technology. 2021 Dec 31;32:85-92. doi: [10.35219/awet.2021.11](https://doi.org/10.35219/awet.2021.11)
- [23] Rehman AU, Kishore Babu N, Talari MK, Anwar S, Usmani Y, Al-Samhan AM. Dissimilar rotary friction welding of inconel 718 to F22 using inconel 625 interlayer. Applied Sciences. 2021 Nov 12;11(22):10684. doi: [10.3390/app112210684](https://doi.org/10.3390/app112210684)
- [24] Banerjee A, Ntovas M, Da Silva L, Rahimi S. Microstructure and mechanical properties of dissimilar inertia friction welded 316L stainless steel to A516 ferritic steel for potential applications in nuclear reactors. Manufacturing Letters. 2022 Aug 1;33:33-7. doi: [10.1016/j.mfglet.2022.07.002](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.07.002)
- [25] MakeItFrom. Material properties database [Internet].
- [26] Toysserkani H. Principles of materials science: structure, properties, and materials engineering. 3rd ed. Isfahan: Isfahan University of Technology Publications; 2010. [In Persian]
- [27] MatWeb. Material property data [Internet].