نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره2، پاییز و زمستان 1399، صفحه 39-29

تأثیر متغیرهای فرایند جوش اصطکاکی چرخشی بر خواص مکانیکی و فیزیکی اتصال لوله آلومینیوم به مس

یاسر قربانی امیر[1]، اشکان ذوالریاستین[2*]، حسین ترابیان[3]

1- مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره)، تهران

2- مهندسی مواد، پژوهشگاه نیرو، تهران

3- مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، تهران

(دریافت مقاله: 1398/03/01 ؛ پذیرش مقاله: 1399/03/26)

چکیده

هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر متغیرهای فرایند جوش اصطکاکی چرخشی بر میکروساختار و خواص مکانیکی و فیزیکی لوله های دوفلزی مس- آلومینیوم است. به این منظور، با استفاده از یک دستگاه جوش اصطکاکی از نوع کلاچ ترمزی، یک لوله مس (خلوص تجاری 99/44%) به لوله آلومینیوم (خالص تجاری 1050) با قطر مشابه، در سه حالت با فشار اصطکاکی و فشار فورج مختلف جوش داده شد و سپس تحت آزمایش‌های متالوگرافی، سختی سنجی، بررسی های میکروساختاری و خواص الکتریکی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش فشار اصطکاک و فشار فورج به ترتیب از مقادیر 10 و 15 بار، در فصل مشترک نمونه‌ها فازی بین فلزی ترد ایجاد شده و سبب افت زیادی بر درصد تغییر شکل و استحکام کششی فصل مشترک نمونه می‌شود. همچنین، با کاهش فشار اصطکاک و حذف فشار فورج به 5 بار، باند مناسبی بین دو نمونه ایجاد نشد و در فصل مشترک تخلخل و ترک تشکیل شد. مناسب ترین نتیجه در بین نمونه‌ها از نظر خواص مکانیکی و فیزیکی و میکروساختار، در لوله‌ای با قطر خارجی 15 mm و قطر داخلی 10 mm برای نمونه‌ها با فشار اصطکاکی در حدود 10 bar و فشار فورج 15 bar است. حضور فازهای بین‌فلزی آلومینیوم-مس نظیر $CuAl_2$، به دلیل مقاومت الکتریکی بالاتر و ماهیت سرامیکی، سبب افزایش مقاومت الکتریکی فصل مشترک و از سوی دیگر حضور ترک و خلل و فرج سبب کاهش سطح عبور جریان و در نهایت افزایش مقاومت الکتریکی نمونه ها شد.

کلمات کلیدی: جوش اصطکاکی چرخشی، مقطع لوله ای، اتصال آلومینیوم- مس..

Effect of rotary friction welding variables on mechanical and physical properties of aluminum-copper tube joints

Y. Ghorbani Amir[1], A. Zolriasatein[2*], H. Torabian[3]

1-Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahr-e-Rey. Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2-Non-Metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran
3-Tehran Central Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

(Received 22 May 2019 ; Accepted 15 June 2020)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: azolriasatein@nri.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

Abstract

The aim of this study is to investigate the effect of rotary frictional welding process variables on microstructure, mechanical and physical properties of copper-aluminum dual-tube pipes. For this purpose, using a thermosetting friction welding machine, a copper pipe (99.44% purity) with a similar diameter aluminum tube (1050), was welded in three different conditions with different friction pressures and forging, and then by metallographic, hardening and microstructural testing it placed. The results of this study showed that with increasing friction pressure from 10 and 15 Bar respectively, in the interconnected phase, fuzzy interclass metal samples were created and caused a great loss in the deformation percentage and tensile strength of the interconnected sample. Also, with the reduction of frictional pressure and the removal of forging pressures down to 5 Bar, there is no proper bond between the two samples and formed in the interface between porosity and cracking. The most suitable result for the microstructure, mechanical and physical properties of the samples is in tubes with an outside diameter of 15 mm and an inner diameter of 10 mm, for samples having a friction pressure of about 10 Bar and a forge pressure of 15 Bar. The presence of intermetallic Al-Cu phases such as $CuAl_2$, due to higher electrical resistance and ceramic nature, increases the electrical resistance of the joint and, on the other hand, the presence of cracks and pores has reduced the flow rate and eventually increased electrical resistance of the samples.

Keywords: Rotary frictional welding, Tube sections, Aluminum-copper joints.

1- مقدمه

امروزه، فلزات مس و آلومینیوم، کاربرد گسترده ای در صنایع مختلف، به خصوص در صنعت برق، یافته است. همچنین با توجه به پیچیده تر شدن طراحی ها در راستای افزایش راندمان و عمر مفید قطعات، کاربرد دوفلزی مس- آلومینیوم نیز چشمگیر شده است. از جمله کاربردهای این دوفلزی ها، مواردی است که نیاز به برقراری اتصال الکتریکی بین مس و آلومینیوم باشد.

از دیدگاه فرایند اتصال، آلومینیوم و مس ناسازگار هستند، زیرا در دمای بالای 120 ° C تمایل بسیار زیادی به یکدیگر دارد و ترکیبات بین فلزی ترد، با استحکام پایین و مقاومت الکتریکی بالا (بدلیل پیوند کووالانسی غیرفلزی) در فصل مشترک آن‌ها تشکیل می شود. به همین دلیل، روش های معمول جوشکاری ذوبی برای اتصال این دو مناسب نیست و از روش های جوشکاری در حالت جامد مانند جوش اصطکاکی، انفجاری، جوش فلش، نفوذی و جوش با نورد سرد استفاده می شود [6-1].

با توجه به گسترش کاربرد دوفلزی مس- آلومینیوم در صنایع مختلف، تحقیقات زیادی در خصوص این فرایند انجام شده است و محدوده مجاز برای هریک از متغیرهای فرایندی استخراج شده است. اگرچه مکانیزم دقیقی برای فرایند جوش اصطکاکی بیان نشده است، اما نظریه هایی در خصوص آن وجود دارد که به نظر درست می رسد. سطوح در مقیاس میکروسکوپی دارای برآمدگی ها و فرورفتگی هایی هستند و علاوه بر آن لایه اکسیدی نازک و یا ناخالصی های دیگر بر روی سطح پوشیده شده است . هرگاه سطوح به طور کامل در کنار هم قرار نگیرند، نیروی چسبندگی بین مولکولی بین آن‌ها برقرار نمی‌شود و در نتیجه اتصال انجام نمی گیرد. هدف اصلی در جوشکاری اصطکاکی برطرف نمودن این ناهمواری ها و ناخالصی ها و اعمال فشار برای اتصال دو سطح است. هنگامی که دو سطح با فشار معین بر روی هم مالیده می‌شوند، نقاط بلند بهم برخورد می‌کند و از بین می روند. همزمان لایه اکسیدی برداشته می‌شود و دو سطح فلز در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند و بدین ترتیب یک باند یا چسبندگی موقت بوجود می‌آید با ادامه حرکت، این چسبندگی بریده می‌شود و یک باند تازه تر به وجود می آید بدین ترتیب انرژی مکانیکی به حرارتی تبدیل می‌شود و به تدریج درجه حرارت سطح افزایش می‌یابد. بنابراین استحکام فشاری کاهش می‌یابد و تغییر فرم پذیری راحت تر انجام می گیرد، نقاط برآمده به سرعت محو می‌شود و سطوح در حالت چسبندگی کامل قرار می گیرند با فرض این که نرخ حرارت تولیدی بیشتر از حرارت فروکشی باشد، درجه حرارت بالاتر می‌رود و حالت پلاستیکی نیز بیشتر می‌شود، تا

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جایی که استحکام فشاری قادر به تحمل نیروی فشاری نیست و سطح زیر فشار گسترده تر شده و لبه ها در هم فرو می روند و حتی کمی به بیرون بر می گردند. به طور کلی متغیرهای فرایند جوش اصطکاکی به دو گروه تقسیم می شوند [7]. گروه اول، متغیرهای مربوط به دستگاه هست و گروه دوم، متغیرهای مستقل از دستگاه است. متغیرهای گروه اول عبارتند از سرعت چرخش، فشار اصطکاک، زمان اصطکاک، فشار فورج، زمان فورج و متغیرهای مستقل از دستگاه نیز می توان به جنس مواد مورد استفاده برای جوشکاری، ابعاد و اندازه و شکل هندسی اشاره نمود.

در ساخت ماشین آلات جوشکاری، در برخی موارد برای تنظیم دستگاه از تغییر طول محوری دستگاه برای تنظیم آن استفاده می‌شود که ترکیبی از متغیرهای فشار اصطکاک و زمان اصطکاک است. این روش سبب ساده تر شدن تنظیمات دستگاه می‌شود و کنترل فرایند را ساده تر می‌کند [8].

یکی از مهمترین مسائلی که در مورد دوفلزی ها مطرح است، خواص مکانیکی فصل مشترک دو فلزی ها است. خواص مکانیکی فصل مشترک تا حدود زیادی تحت تاثیر فازهای تشکیل شونده در این ناحیه است. خواص مکانیکی دو فلزی مس- آلومینیوم با کنترل ضخامت ترکیبات بین فلزی قابل کنترل است. فازهای سخت تشکیل شده در لایه نفوذی مس- آلومینیوم، بدلیل داکتیلیته و چقرمگی شکست پایین، استحکام اتصال را تخریب می‌کند. یک لایه ترکیب بین فلزی ضخیم، تردی فصل مشترک را افزایش می‌دهد، بطوری که جوانه زنی و رشد ترک راحت تر صورت می‌گیرد [9و10].

فرایند جوش اصطکاکی چرخشی در اتصال لوله ها نیز کاربرد دارد. کیمورا [11] و همکارانش از این روش برای اتصال لوله آلومینیوم 6063 به فولاد زنگ نزن آستنیتی استفاده کردند. لوله مورد استفاده در تحقیقات آنها دارای ضخامت 1/5 mm بوده و از دستگاهی با دور 27/5 rps و فشار اصطکاکی 30 MPa استفاده کردند. به منظور جلوگیری از تغییرشکل ناگهانی ناشی از مرحله ترمز کردن، پس از پایان زمان اصطکاک، سرعت بین دو قطعه به صورت تدریجی به صفر رسانده می‌شود. با این روش اتصالی مناسب بین دو جنس ایجاد و از طرفی تغییر شکل ناشی از مرحله ترمز کردن حذف می‌شود. در تحقیق دیگری که توسط آیسیک [12] و همکارش انجام شد، یک لوله فولاد کشش سرد شده به یک لوله از فورج شده میکروآلیاژی به روش جوش اصطکاکی متصل شد. سپس آزمون‌های استحکام کششی، میکروسختی، خستگی و استحکام پیچشی روی آن‌ها انجام شد. بر اساس نتایج، پایین ترین استحکام نمونه‌ها، حداکثر 13% کمتر از استحکام کششی فلزات زمینه بود. در این تحقیق از نیروی 15 MPa برای اصطکاک و 37 MPa برای مرحله فورج، با دستگاهی با دور 900 rpm نمونه ها تهیه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که منطقه HAZ در این قطعات تا عمق 2mm از فصل مشترک تشکیل می‌شود. در تحقیق دیگری که توسط مونیم [13] و همکارانش انجام شد، به بررسی مقدار تنش پسماند پس از فرایند جوش اصطکاکی لوله ها پرداخته شد. به منظور محاسبه مقدار تنش پسماند از روش حذف مکانیکی سطوح و اندازه گیری تغییرات طولی با کاربرد از معادله نیشیمورا استفاده شد. در این تحقیق، میزان تنش پسماند ناشی از جوشکاری لوله‌های برنج زرد و همچنین لوله‌های آلومینیومی سری 1000 استفاده شده است. براساس نتایج مشخص شد که در سطح لوله ها، تنشهای فشاری وجود دارد. همچنین، مقدار تنش باقیمانده در لوله‌های برنجی بیشتر از لوله‌های آلومینیومی است، زیرا میزان انرژی بیشتری در اتصال لوله‌های برنجی بکار می‌رود. علاوه بر این، میزان تنش‌های محوری در حدود 9 تا 11 برابر تنش‌های شعاعی است.

در این تحقیق، تأثیر متغیرهای فشار اصطکاک، فشار فورج و عمق نفوذ بر استحکام کششی و مقاومت الکتریکی اتصال لوله آلومینیوم به مس مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن ارائه شده است.

2- روش پژوهش

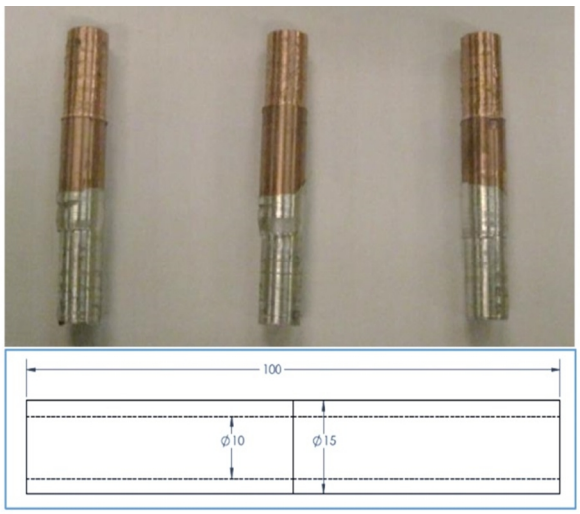
در این تحقیق، برای بررسی تأثیر متغیرهای فرایندی بر استحکام جوش و خواص متالورژیکی، از سه نوع نمونه با شرایط ساخت مختلف استفاده شد و سپس به بررسی خواص مکانیکی و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

میکروساختاری آن‌ها پرداخته شده است. در این تحقیق از نمونه لوله هایی با قطر خارجی 15 mm، قطر داخلی 10 mm و طول 10 cm استفاده شده است (شکل(1)). جهت اتصال نمونه‌ها، از سه شرایط مختلف مطابق جدول (1) استفاده شده است و برای هر شرایط 3 نمونه ساخته شد.

نمونه ها با استفاده از یک دستگاه ایرانی با سرعت چرخش 1500 rpm تهیه شده است (شکل (2)). آلومینیوم مورد استفاده از آلیاژ 1050 و مس از نوع خالص تجاری با خلوص 99/44 استفاده شده است. به منظور بررسی استحکام و ازدیاد طول نمونه ها قبل و بعد از پیرسازی و همچنین بررسی مقطع شکست و محل تشکیل ترک‌ها، نمونه ها تحت آزمون کشش قرار گرفت. به این منظور، از نرخ 1 cm/min و دستگاهی با ظرفیت 10 kN استفاده شد. مطابق با بررسی های انجام شده، جهت میکروسختی از نیروی 0/4 N استفاده شد [15و14].

برای بررسی فصل مشترک نمونه ها، ابتدا نمونه ها از مقطع عرضی برش خورده، مانت شدند و سپس به ترتیب با سنباده‌های1000،800،600،240،80 و در نهایت 2000 آماده‌سازی اولیه انجام شد و در آخر با استفاده از پودر آلومینا و خمیر الماس، عملیات پولیش نهایی روی سطح انجام شد. در ادامه، فصل مشترک نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی FESEM، نمونه‌های آماده سازی شده مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، جهت تعیین ترکیب شیمیایی و نوع فازهای تشکیل شده در فصل مشترک، از آنالیزگر نصب‌شده روی میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. برای بررسی مقاومت الکتریکی از میکرواهم متر با جریان 50 A و با دقت 0/01 μΩ مارک CHAUVIN مدل C.A 6250 استفاده شد. جهت اندازه گیری، پروب های دستگاه با فاصله 70 mm از هم قرار داده شد.



شکل1- نمونه های تهیه شده به روش جوش اصطکاکی چرخشی



شکل2- دستگاه جوش اصطکاکی چرخشی

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی‌های میکروسکوپی

در شکل‌های (3) و (4)، ریزساختار میکروسکوپی نوری و الکترونی نمونه‌های گروه اول ارائه شده است. همانطور که در این تصاویر مشاهده می‌شود، در ریزساختار میکروسکوپی نوری، با بزرگنمایی‌های تهیه شده، اثری از فازهای بین فلزی در فصل مشترک مشاهده نمی‌شود. بعبارت دیگر، در فصل مشترک این نمونه‌ها، با بزرگنمایی‌های ارائه شده، حتی در تصویر میکروسکوپی الکترونی، تشخیص فازهای بین‌فلزی مقدور نیست؛ این فازها در صورت وجود، دارای ضخامت ناچیزی هستند. فصل مشترک این نمونه، نسبتاً صاف و یکنواخت و فاقد ترک و فازهای مضر بین فلزی است.

نتایج متالوگرافی و میکروسکوپی الکترونی نمونه های گروه دوم، شکل‌های (5) تا (8) نشان داد که فازهای بین فلزی در این نمونه‌ها تشکیل شده است. در این نمونه‌ها، ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک به صورت جزیره‌ای و پراکنده ایجاد شده است (فازهای خاکستری رنگ در فصل مشترک).

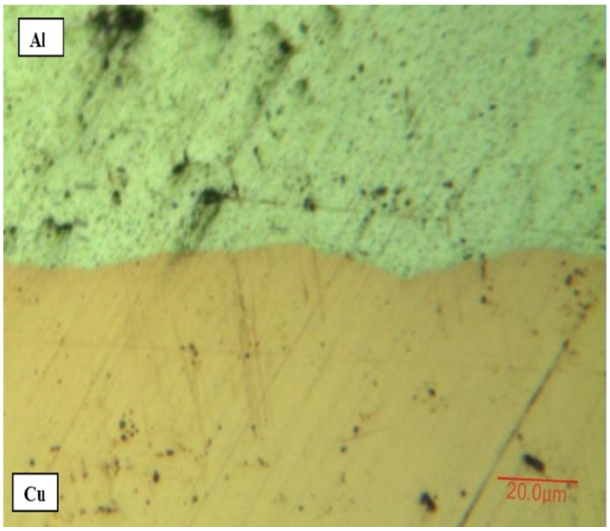
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول 1- متغیرهای فرایندی بکار رفته در جوش اصطکاکی چرخشی

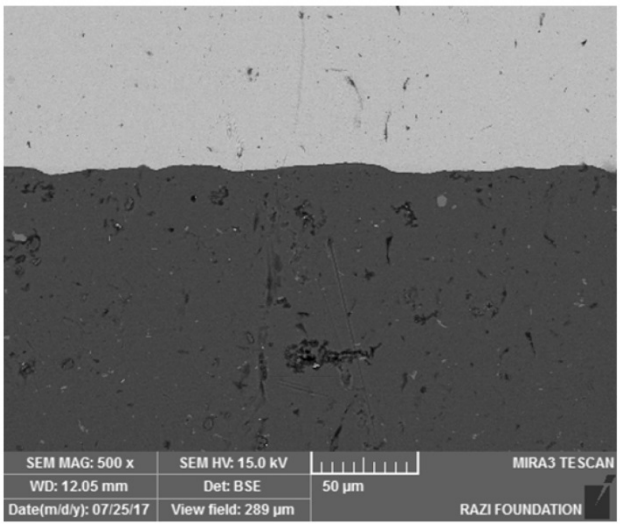
ردیف	فشار اصطکاک Bar	فشار فورج Bar	عمق نفوذ mm
۱	۱۰	۱۵	۵
۲	۱۵	۲۵	۹
۳	۵	۵	۳

جدول 2- آنالیز نقطه‌ای از سطح شکست نمونه گروه دوم

درصد اتمی مس	درصد اتمی آلومینیوم	نزدیکترین ترکیب بین‌فلزی
۳۳/۵۳	۶۶/۴۷	$CuAl_2$ (θ)
۳۶/۸۷	۶۳/۱۳	$CuAl_2$ (θ)
۲۹/۸۸	۷۰/۱۲	$CuAl_2$ (θ)
۳۱	۶۹	$CuAl_2$ (θ)



شکل3- ریزساختار میکروسکوپی نوری از فصل مشترک نمونه گروه اول



شکل4- ریزساختار میکروسکوپی الکترونی از فصل مشترک نمونه

با توجه به آنکه فشار اصطکاکی در این نمونه ها نسبت به نمونه‌های گروه قبل بیشتر است، در نتیجه حرارت بیشتری در فصل مشترک نمونه ایجاد می‌شود که سبب تشکیل فازهای بین فلزی در فصل مشترک شده است. این مسئله توسط برخی محققین از جمله اوچی و همکارانش [16] گزارش شده است. همانطور که در تصاویر مشاهده می‌شود، در برخی نقاط، انباشتگی فازهای بین فلزی وجود دارد. از طرفی فصل مشترک صاف و یکنواخت نیست و دارای ناهمواری‌های فراوانی است که ناشی از متغیرهای فرایندی هست. یکی از مسائل مورد توجه، شناسایی فازهایی است که در حین ساخت یا پیرسازی ایجاد می‌شود. نتایج مطالعات برخی محققین نشان داد که در طی واکنش بین آلومینیوم و مس، فاز $CuAl_2$ (θ) در سمت آلومینیوم و فاز Al_4Cu_9 (γ1) در سمت مس، نخستین ترکیبات بین‌فلزی هستند که تشکیل می‌گردد [2و 5].

آنالیز فصل مشترک نمونه‌ی ارائه شده در شکل (5) و (6) نشان داد که در این نمونه، فازی محتوی 31/5% مس و 68/5% آلومینیوم ایجاد می‌شود که براساس نمودار فازی، این ترکیبات فاز $CuAl_2$ (θ) است.

طبق نظر ژو و همکارانش، بالاترین دمایی که در فرایند جوشکاری اصطکاکی اندازه‌گیری شده، $580^{O}C$ بوده است که مقداری بالاتر از دمای ذوب فاز یوتکتیک مس و آلومینیوم است [5].

ژو و همکارانش تشکیل فاز مایع در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی و انجماد آن به صورت دندریت های موضعی α-Al، $CuAl_2$، CuAl و فاز یوتکتیک α-Al + $CuAl_2$ در منطقه جوش را نشان دادند. طبق نظر این محققین، تشکیل فاز Al_4Cu_9 (γ1) بر اساس فرآیند جوانه زنی و رشد به سبب دو مکانیزم اختلاط مکانیکی و نفوذ بالای آلومینیوم و مس در دمای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول3- استحکام کششی(MPa) و درصد ازدیاد طول نمونه های مختلف

گروه نمونه	استحکام شکست (MPa) و درصد افزایش طول (٪)					
	نمونه اول		نمونه دوم		نمونه سوم	
1	42.6	10٪	43.1	11٪	40.2	11٪
	Al		Al		Al	
2	39.3	4٪	32.9	5٪	38.0	5٪
	J		J		J	
3	16.84	0.5٪	14.6	0.1٪	15.2	0.3٪
	J		J		J	

Al: محل تشکیل ترک و شکست قطعه در بخش آلومینیوم

J: محل تشکیل ترک و شکست قطعه در بخش اتصال

لوله با قطر خارجی 15 mm، قطر داخلی 10 mm و طول 100 mm

جدول4- مقاومت الکتریکی نمونه های مختلف در طول 7cm

نمونه (طول 7cm)	لوله Al	لوله Cu	گروه اول	گروه دوم	گروه سوم
مقاومت الکتریکی (μΩ)	22.6	13.2	19.8	20.4	21.1

جدول5- مقاومت الکتریکی فصل مشترک نمونه های مختلف

فصل مشترک نمونه	گروه اول	گروه دوم	گروه سوم
متوسط مقاومت الکتریکی (μΩ)	1.9	2.5	3.2

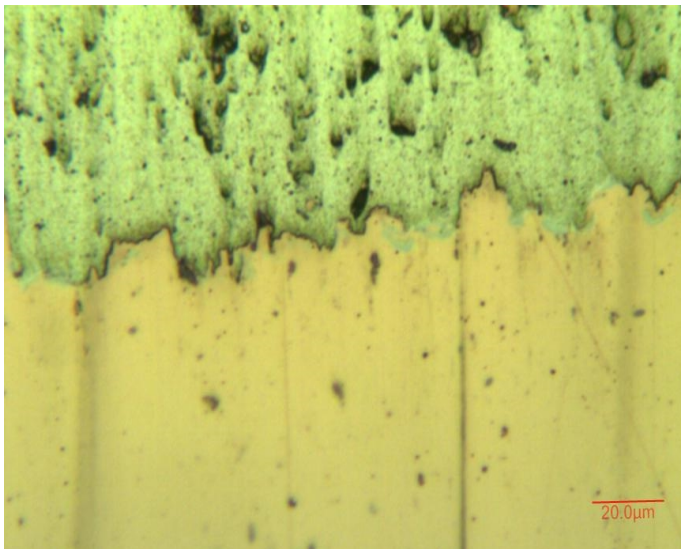
بالا است [5]. این مسئله در تحقیقات انجام شده توسط یانگ نیز نمایش داده شده است [17].

وجود فازهای‌اولیه ناشی از فرایند ساخت، مانند فاز $CuAl_2$ (θ)، سبب تسهیل جوانه‌زنی و رشد فازهای بین فلزی دیگر می‌شود، در نتیجه تشکیل فازهای بین فلزی در دماهای پایین‌تر پیرسازی مقدور می‌شود. در صورتی که در فصل مشترک، هیچ فاز بین فلزی وجود نداشته باشد، جوانه‌زنی و رشد در دماهای پایین‌تر از $200^{O}C$ انجام نخواهد شد. این مسئله در فرایندهایی مانند نورد سرد مشاهده شده است [1]. در شکل(9)، سطح شکست نمونه‌ی گروه دوم آمده است. این نمونه، در آزمون کشش دچار شکست شد. نتایج بررسی نقطه‌ای سطح شکست، از سمت بخش مسی قطعه، در جدول (2) آمده است.

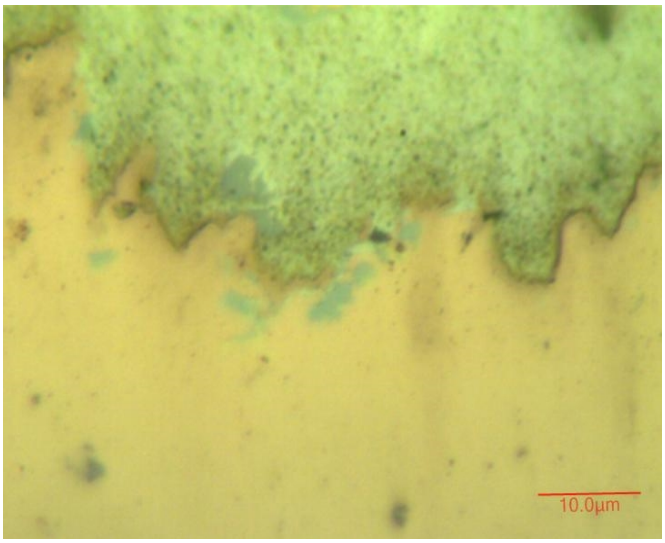
همانطور که از این نتایج مشخص است، سطح شکست به صورت کامل در مرز بین دانه‌های فازهای بین فلزی تشکیل شده در اثر پیرسازی، رشد کرده است.

بر اساس نتایج حاصل، ترک‌ها عمدتاً در فاز بین فلزی θ رشد کرده است که باند مجاور آلومینیوم هست. نتایج بررسی متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی نمونه گروه سوم در شکل‌های (10)، (11) و (12) ارائه شده است. همانطور که در این تصاویر مشاهده می‌شود، در فصل مشترک این نمونه‌ها، ترک وجود دارد (شکل (11)) و باند مناسبی ایجاد نشده است. از آنجایی که در این نمونه‌ها، فشار فورج پایین هست، در نتیجه فصل مشترک نمونه متخلخل است (شکل (12)) و این مسئله سبب افت استحکام شده است.

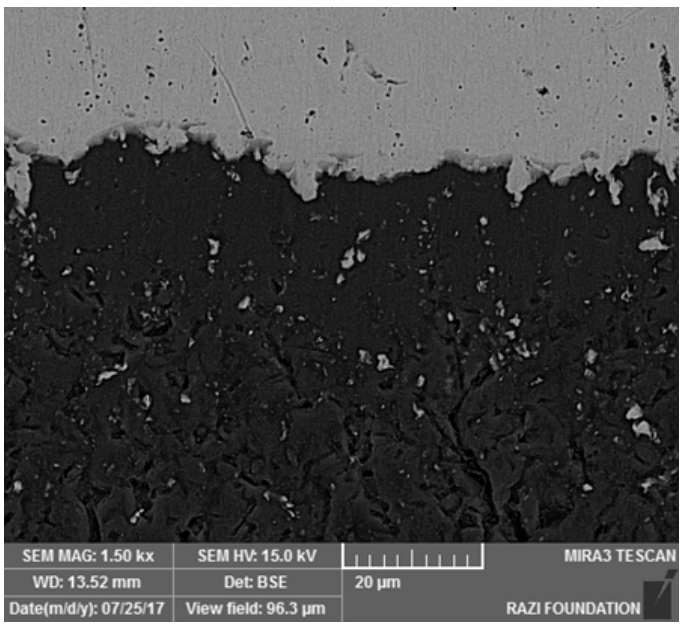
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



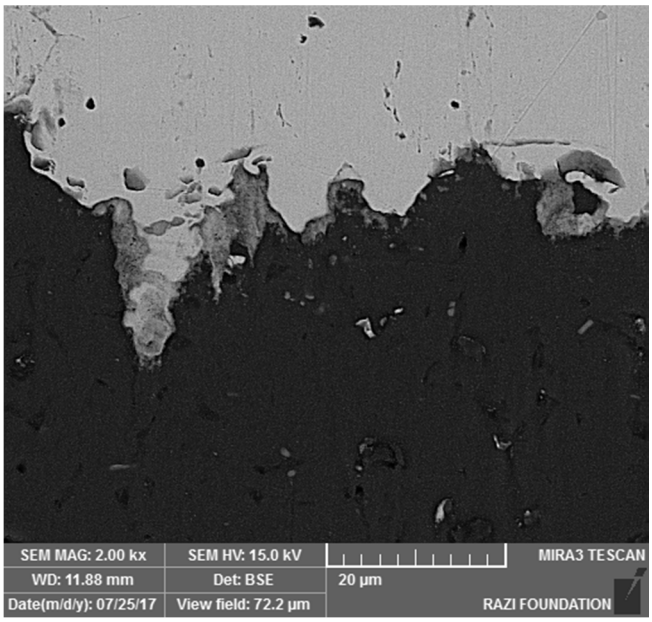
شکل 5- ریزساختار میکروسکوپی نوری از فصل مشترک نمونه گروه دوم



شکل 6- ریزساختار میکروسکوپی نوری از فصل مشترک نمونه گروه دوم در بزرگنمایی بالاتر



شکل 7- ریزساختار میکروسکوپی الکترونی از فصل مشترک نمونه گروه دوم

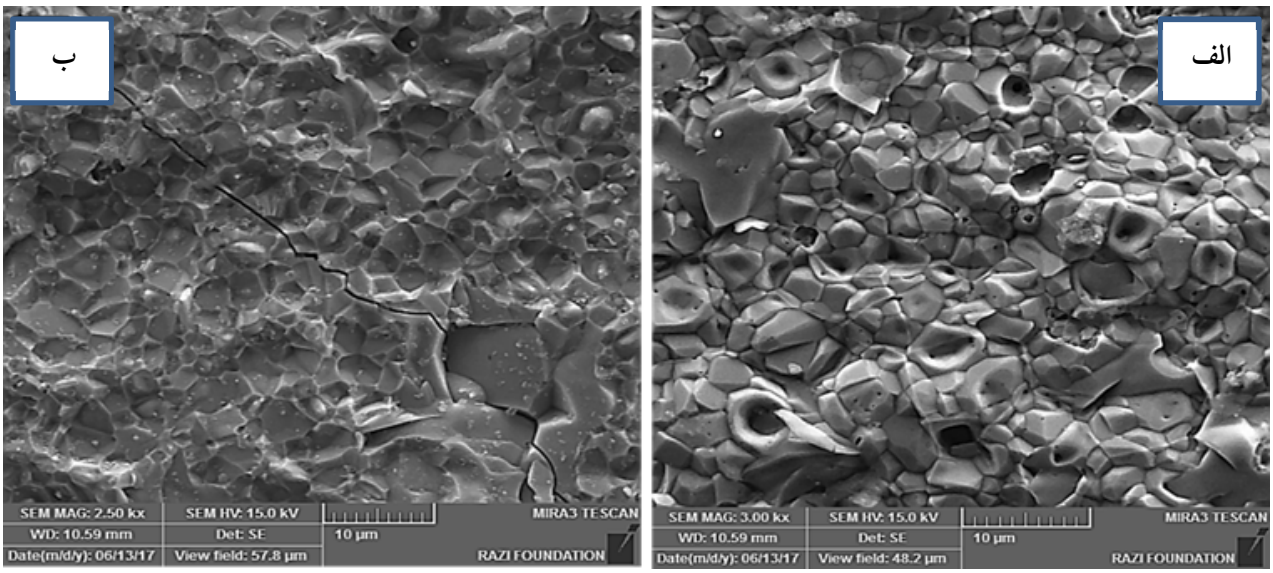


شکل 8- ریزساختار میکروسکوپی الکترونی از فصل مشترک نمونه گروه دوم در بزرگنمایی بالاتر.

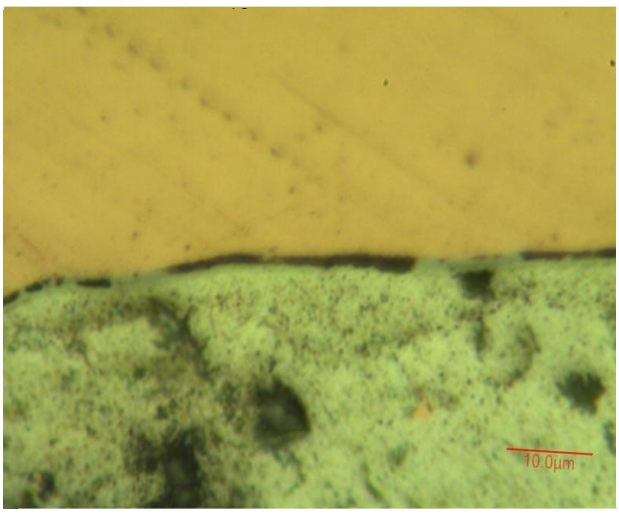
3-2- آزمایش کشش

نتایج آزمون کشش و محل شکست برای نمونه‌های هر گروه در جدول (3) و شکل (13) ذکر شده است. براساس نتایج ارائه شده در این جدول، در نمونه‌های گروه دوم در مقایسه با گروه اول، اولاً، استحکام کششی به مقدار کمی افت کرده است و ثانیاً، محل شکست از بخش آلومینیومی به محل اتصال منتقل می‌شود و همچنین درصد تغییرات طول نیز افت محسوسی کرده است. نمونه‌های گروه سوم در مقایسه با گروه اول، افت استحکام و درصد تغییر طول شدیدتری داشته‌اند. براساس جدول (3)، در نمونه‌های گروه دوم، اگرچه نمونه دارای استحکام کششی قابل قبولی است، اما شکست از محل فصل مشترک اتفاق افتاده است (شکل (15)). در حالیکه در نمونه‌های گروه اول، نمونه از محل آلومینیوم جدا شده است (شکل (14)). از آنجایی که در نمونه‌های گروه دوم، فازهای ایجاد شده در فصل مشترک دارای

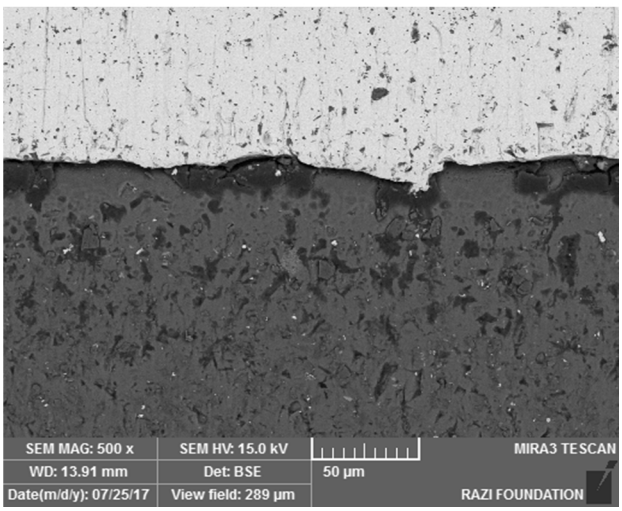
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 9. تصویر میکروسکوپی الکترونی از سطح شکست نمونه گروه دوم الف)در سمت مس، ب) در سمت آلومینیوم.



شکل 10. ریزساختار میکروسکوپی نوری از فصل مشترک نمونه گروه سوم



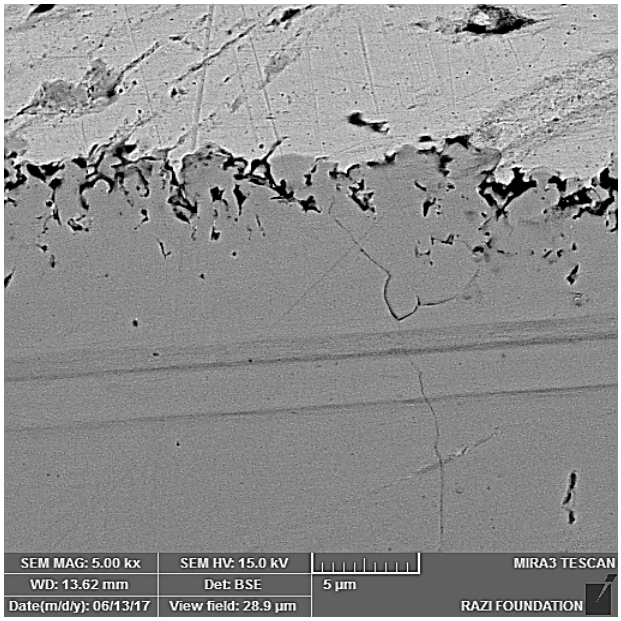
شکل 11. ریزساختار میکروسکوپی الکترونی از ترک‌های فصل مشترک نمونه گروه سوم

ماهیتی ترد است، درنتیجه مسیر مناسب برای رشد ترک وجود دارد. درصورت عدم حضور این فازها که در نمونه‌های گروه اول وجود دارد، رشد ترک از مکان‌های با استحکام کمتر که در داخل آلومینیوم است، انجام می‌شود. درصد تغییرشکل پایین نمونه‌های گروه دوم نشان می‌دهد که شکست در این نمونه‌ها از نوع ترد است، در حالی که در نمونه‌های گروه اول، شکست نرم اتفاق افتاده است. در نمونه‌های گروه سوم، عدم وجود پیوستگی و حضور ترک و تخلخل در فصل مشترک، نشان دهنده تشکیل موضعی اتصال است که سبب رشد ترک در محل اتصال می‌شود (شکل (16)). در نتیجه، افت شدید استحکام و درصد تغییر شکل حاصل می‌شود.

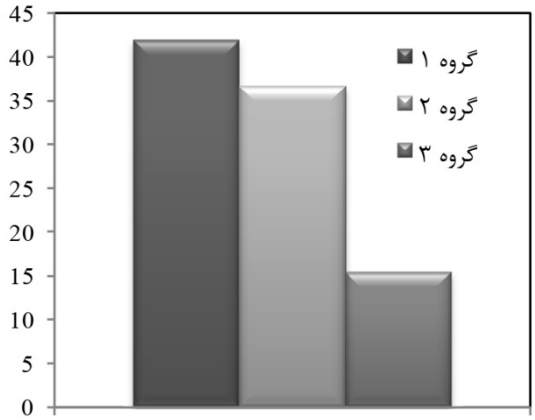
3-3- آزمایش میکروسختی

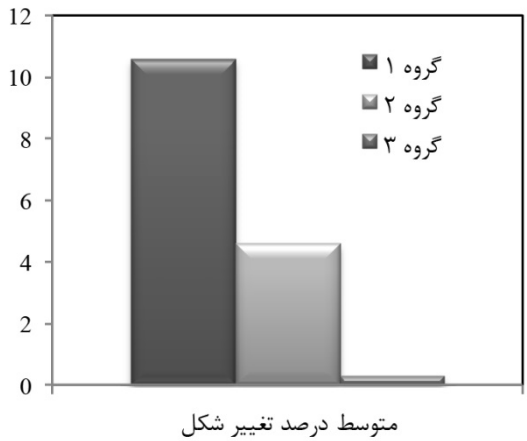
نتایج آزمون میکروسختی نمونه‌ها در شکل (17) آمده است. همانطور که مشاهده می شود، میکروسختی باند ایجاد شده برای گروه دوم، در محدوده‌ای بین آلومینیوم و مس است. فصل مشترک نمونه‌های گروه اول، فصل مشترک یکنواخت، بدون تخلخل و بدون باند بین فلزی است (شکل‌های (3) و (4).

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



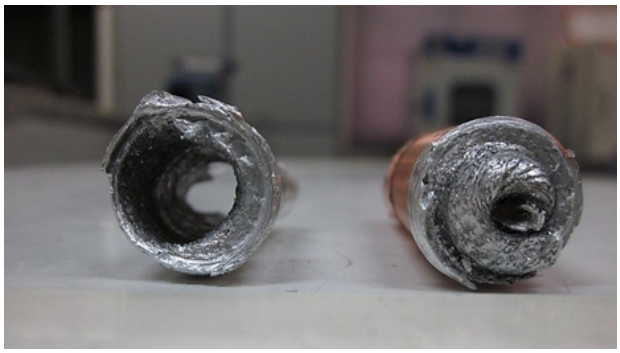
شکل 12- ریزساختار میکروسکوپی الکترونی از تخلخل‌های فصل مشترک نمونه گروه سوم



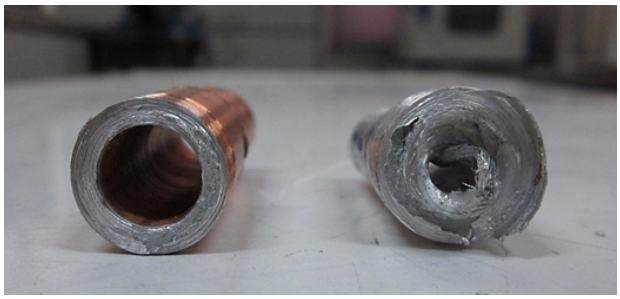


شکل 13- نمودار متوسط استحکام کششی و درصد تغییر شکل نمونه ها

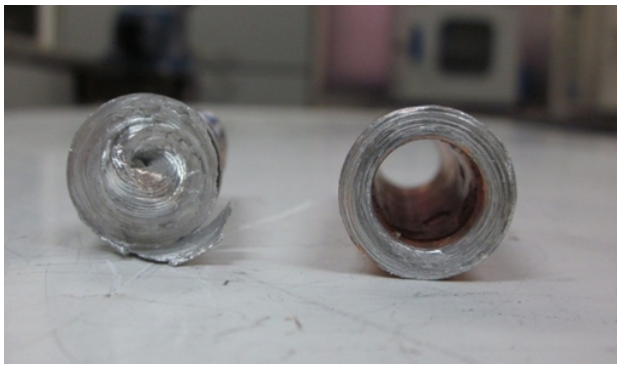
در حالی که در نمونه‌ی گروه دوم، میکروسختی فصل مشترک، از فلزات زمینه در حدود 50% بالاتر است، که علت آن حضور فازهای ترد و سخت بین فلزی است (شکل‌های (5) تا (8). با توجه به این مسئله، تشکیل و رشد ترک در این مناطق، محتمل‌تر از سایر نقاط است. این مسئله در جدول (3) نیز به خوبی مشخص است، که نشان می‌دهد ترک در فصل مشترک رشد می‌یابد.



شکل14- نحوه شکست نمونه‌های گروه اول



شکل15- نحوه شکست نمونه‌های گروه دوم

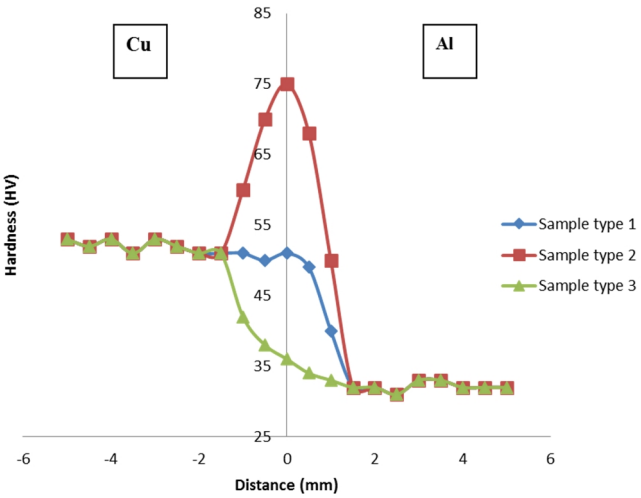


شکل 16- نحوه شکست نمونه‌های گروه سوم

در نمونه‌های گروه سوم، میکروسختی در محدوده‌ی نزدیک به زمینه آلومینیوم است. وجود ترک و تخلخل در فصل مشترک این نمونه‌ها و از طرفی عدم وجود اتصالی یکپارچه در فصل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

مشترک، سبب افت میکروسختی این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها شده است. تخلخل و ترک‌ها در شکل‌های (10)، (11) و (12) نمایش داده شده است.



شکل 17- میکروسختی فصل مشترک نمونه های مختلف دوفلزی آلومینیوم- مس (سمت راست آلومینیوم-سمت چپ مس)

3-4- آزمایش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها و همچنین مقاومت الکتریکی آلومینیوم و مس مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها در جدول (4) آمده است. با استفاده از این نتایج، مقاومت الکتریکی فصل مشترک هر یک از نمونه‌ها قابل محاسبه است (جدول (5)). همانطور که در نتایج جداول ارائه شده است، متوسط مقاومت الکتریکی نمونه‌های گروه اول در مقایسه با دو گروه دیگر پایین‌تر است. مقاومت الکتریکی گروه دوم در مقایسه با گروه اول یک افزایش حدود 30% داشته است و گروه سوم در حدود 70% افزایش یافته است. در گروه دوم، حضور فازهای بین‌فلزی، به دلیل مقاومت الکتریکی بالاتر و ماهیت سرامیکی، سبب افزایش مقاومت الکتریکی فصل مشترک نمونه شده است. در نمونه‌های گروه سوم، حضور ترک و خلل و فرج سبب کاهش سطح عبور جریان و در نهایت افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها شده است.

4- نتیجه‌گیری

- با افزایش فشار اصطکاک و فشار فورج به ترتیب از مقادیر 10 و 15 بار، در فصل مشترک نمونه‌ها فازی بین فلزی ترد آلومینیوم-مس نظیر $CuAl_2$ ، ایجاد می‌شود. این فازها سبب افت اندکی در استحکام کششی نمونه‌ها می‌شود، اما تأثیر زیادی بر درصد تغییر شکل و استحکام کششی فصل مشترک نمونه می‌شود.

- با کاهش فشار اصطکاک و حذف فشار فورج به 5 بار، باند مناسبی بین دو نمونه ایجاد نشده و در فصل مشترک تخلخل و ترک تشکیل می‌شود. این مسئله سبب افت استحکام کششی اتصال لوله می‌گردد.

- مناسب ترین نتیجه در بین نمونه‌ها از نظر خواص مکانیکی و میکروساختار، در لوله‌ای با قطر خارجی 15 mm و قطر داخلی 10 mm، برای گروه اول نمونه‌ها با فشار اصطکاکی در حدود 10و فشار فورج15 بار و عمق نفوذ 5 mm است.

- نتایج بررسی مقاومت الکتریکی نمونه ها نشان از افزایش به ترتیب 30% مقاومت الکتریکی گروه دوم (فشار اصطکاک 15 bar، فشار فورج 25 bar، عمق نفوذ 9 mm) و افزایش 70% گروه سوم (فشار اصطکاک 5 bar، فشار فورج 5 bar، عمق نفوذ 3 mm) در مقایسه با گروه اول (فشار اصطکاک 10 bar، فشار فورج 15 bar، عمق نفوذ 5 mm) است. در گروه دوم، حضور فازهای بین‌فلزی، به دلیل مقاومت الکتریکی بالاتر و ماهیت سرامیکی، سبب افزایش مقاومت الکتریکی فصل مشترک نمونه شده است. در نمونه‌های گروه سوم، حضور ترک و خلل و فرج سبب کاهش سطح عبور جریان و در نهایت افزایش مقاومت الکتریکی نمونه ها شده است.

مراجع

[1] M. Abbasi, A.K. Taheri, M.T. Salehi, Growth rate of intermetallic compound in Al/Cu bimetal product by cold roll welding process, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 319, No. 1-2, pp. 233-241,2001.
[2] S. Berski, Z. Stradomski, H. Dyja, Quality of bimetal Al-Cu joint after explosive cladding, *Achievements in Materials*, Vol. 22 , No. 1, pp.73-76, 2007.
[3] W.B. Lee, K.S. Bang, S.B. Jung, Effects of intermetallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 390 , No. 1-2, pp.212-219, 2005
[4] M. Coberna, J. Fiala, Intermetallic phases in cold-

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

and AISI 304 austenitic stainless steel, *International Journal of Advanced Manufacturing*, Vol. 82, No 1–4, pp 489–499, 2016.

[12] E.Isik, C.Ozes, Determination of the Mechanical Properties ofFriction Welded Tube Yoke and Tube Joint,*Advances in materials science and engineering*, p.8, 2016.

[13] M.Es. Moneim, A.A.Nasser, S.M.Serag, Assessment of residual stresses of nonferrous tubes joint by friction weldin, *Experimental mechnics*, No. 1, 1986.

[14] M. Braunovic, N. Aleksandrov, *Intermetallic Compounds at Aluminum-to-Copper and Copper-to-Tin Electrical Interfaces*, IEEE, 1992.

[15] M. Braunovic, N. Alexandrov, *Intermetallic Compounds at Aluminum-to-Copper Electrical Interfaces: Effect of Temperature and Electric Current*, IEEE, *pp.78-78 1994*.

[16] J.W.Yoon, S.W. Kim and S. B. Jung, "Interfacial reaction and mechanical properties of eutectic Sn–0.7Cu/Ni BGA solder joints during isothermal long-term aging", Journal of Alloys and Compounds 391, 2005, pp. 82–89.

[17] J. Ouyang, E. Yarrapareddy, R. Kovacevic, "Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper",journal of Materials Processing Technology 172, 110-122, 2006.

welded Al-Cu joints, Materials Science and Engineering A, Vol. 159, No. 2, pp. 231-236, 1992.

[5] P. Xue, B.L. Xiao, D.R. Ni, Y.Z. Ma, Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al/Cu joint by intermetallic compounds, *Materials Science and Engineering A*, vol.527, No. 21-22, pp.5723-5727, 2010.

[6] Ch.Xiaole, G.Yimin, F.Hanguange, X. Jiandong, B. Bingzhe, Microstructural characterization and properties of Al/Cu/Steel diffusion bonded joints, *Met.Mater. Int*., Vol. 16, No. 4, pp. 649-655, 2010.

[7] C. Xia, Y. Lia, U.A. Puchkov, S.A. Gerasimov, J. Wanga, Microstructure and phase constitution near the interface of Cu/Al vacuum brazing using Al-Si filler metal,*Vacuum*, 82, No. 8,pp. 799-804, 2008.

[8] D. M. Herlach, *Phase Transformations in Multicomponent Melts*, John Wiley, 2009.

[9] "*Electronic materials and processes Handbook*", Third Edition, McGraw-hill, 2004.

[10] Ch.Xiaole, G.Yimin, F.Hanguange, X. Jiandong, B. Bingzhe, Microstructural characterization and properties of Al/Cu/Steel diffusion bonded joints, *Met.Mater.* Int., Vol.16, No. 4, pp. 649-655, 2010.

[11] M. Kimura, M. Kusaka, K. Kaizu, Friction welding technique and joint properties of thin-walled pipe friction-welded joint between type 6063 aluminum alloy

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]