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

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

Volume 10, Number 1, 2024



Evaluation of dissimilar bonding of alumina to copper with active filler metal Ag-Cu-Ti-Sn and Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr by induction brazing method

M. Taheri[1], Gh. Azimiroeen[2*], M. Shamanian[1], A. Bahrami[1]

1- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran.
2-Center of Engineering and Technical Skills Training, Isfahan University of Technology, , Isfahan 84156-83111, Iran.

Received 29 February 2024 ; Accepted 15 July 2024

Abstract

The dissimilar joint of alumina to copper with active filler metals Ag-Cu-Ti-Sn and Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr were done using the induction brazing process at temperatures of 840 and 860 ℃ for 15 minutes. The microstructures of joints were evaluated using optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). Vickers hardness test and shear tensile strength test were used to evaluate the mechanical properties. The results of the microstructural studies showed that the Al_2O_3/Cu joints using Ag-Cu-Ti-Sn and Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr fillers contain a reaction layer at the interface between alumina and the filler metal. At the area of the reaction layer with Ag-Cu-Ti-Sn filler metal, two TiO and Cu_3Ti_3O phases were observed, and also at the reaction layer with Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr filler metal, two TiO and ZrO_2 phases were observed. The results of the shear strength test showed that due to the greater thickness of the filler metal and the lower thickness of the reaction layer, the joint with the filler metal Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr (14 MPa) has a higher shear strength as compared with the joint with filler metal Ag-Cu-Ti- Sn (9 MPa).

Keywords:Induction Brazing, Active filler metal, Dissimilar joint, Alumina, Microstructure.

Corresponding Author: Gh. Azimiroeen, azimi_gh@iut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]

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

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره1، بهار و تابستان 1403

ارزیابی اتصال غیرهمجنس آلومینا به مس با فلزپرکننده فعال Ag-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr به روش لحیم‌کاری سخت القایی

مهدی طاهری[1]، قاسم عظیمی رویین[2*]، مرتضی شمعانیان[1]، عباس بهرامی[1]

1- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 83111-84156، ایران.

2- مرکز آموزش مهارت‌های فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 83111-84156، ایران.

دریافت مقاله: 1402/12/10 ؛ پذیرش مقاله: 1403/04/25

چکیده

اتصال غیرهمجنس آلومینا به مس با فلزات پرکننده فعال Ag-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr با استفاده از فرایند لحیم‌کاری سخت القایی به ترتیب در دماهای 840 و 860 درجه سانتی‌گراد به مدت 15 دقیقه انجام شدند. ریزساختار اتصالات با استفاده از میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت. برای ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون ریزسختی ویکرز و آزمون استحکام کششبرشی استفاده شد. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که اتصال Al_2O_3/Cu با استفاده از پرکننده‌های Ag-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr منجر به تشکیل یک لایه واکنشی در فصل مشترک آلومینا و فلزپرکننده می‌شود. در لایه واکنشی اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn، دو فاز TiO و Cu_3Ti_3O و در اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr دو فاز TiO و ZrO_2 مشاهده شد. نتایج آزمون استحکام برشی نشان داد که به دلیل ضخامت بیشتر فلزپرکننده و ضخامت کمتر لایه واکنشی، اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr استحکام برشی (14MPa) بالاتری نسبت به اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn (9MPa) دارد.

کلمات کلیدی: لحیم‌کاری سخت القایی، فلز پرکننده فعال، اتصال غیرهمجنس، آلومینا، ریزساختار.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: قاسم عظیمی رویین، azimi_gh@iut.ac.ir

1- مقدمه

آلومینا (Al_2O_3)، مهمترین سرامیک اکسیدی است. اکسید آلومینیوم دارای چند ویژگی مهم نظیر نقطه ذوب بالا، سختی و استحکام بالا، مقاوم در برابر سایش، مقاوم در برابر شوک حرارتی، پایداری شیمیایی عالی، مقاوم در برابر خوردگی خوب و عایق الکتریکی می‌باشد و به همین جهت پرمصرف‌ترین سرامیک اکسیدی به حساب می‌آید. برخی از صنایع مانند الکترونیک، هوافضا و خودروسازی از اتصالات کامپوزیتی سرامیک و فلز استفاده می‌کنند [1-4]. سرامیک‌ها و فلزات از نظر ماهیت پیوند و خواص شیمیایی و فیزیکی تفاوت‌های مشخصی دارند. فلزات دارای پیوند فلزی با الکترون‌های آزاد هستند. در مقابل سرامیک‌ها دارای پیوند کووالانسی یا یونی با الکترون‌های لایه بیرونی بسیار پایدار هستند و از این رو فلزمذاب سطح سرامیک را تر نمی‌کند. خواص فیزیکی متمایز بین سرامیک‌ها و فلزات، مانند مدول الاستیک، استحکام و عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی منجر به ایجاد تنش پسماند

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]

در طول سرد شدن می‌شود که بر استحکام اتصال تأثیر می‌گذارد [5-8]. فرایندهای مختلفی برای ایجاد اتصال آلومینا به فلزات، مانند لحیم کاری، اتصال نفوذی، جوشکاری حالت جامد و پیوند جزیی فاز مایع گذرا (PTLP) توسعه یافته است. لحیم‌کاری یک اتصال اقتصادی با استحکام و چقرمگی مناسب تشکیل می‌دهد اما به دلیل تفاوت در ضریب انبساط حرارتی مواد، تنش‌های پسماند و در کنار آن ترکیبات ترد بین فلزی در اتصال ایجاد می‌شوند. روش لحیم‌کاری فلز فعال، یک روش اتصال تک مرحله‌ای است که در سال‌های اخیر به دلیل ترشوندگی عالی به سرامیک و استحکام بالای اتصالات توجهات زیادی را برانگیخته است. فلزی کردن سطح آلومینا و افزودن عناصر فعال (مانند Ti، Zr، Cr) به آلیاژ لحیم‌کاری، که به ترتیب لحیم‌کاری غیرمستقیم و لحیم‌کاری مستقیم نامیده می‌شوند، دو روش به منظور بهبود قدرت ترشوندگی می‌باشند. در لحیم‌کاری مستقیم، عناصر فعال اضافه شده با آلومینا واکنش می‌دهند و یک لایه واکنش با ویژگی‌های فلزی در سطح مشترک ایجاد می‌شود که منجر به ترشوندگی خوب آلیاژ لحیم‌کاری روی سطح آلومینا می‌شود. در مورد لحیم‌کاری غیرمستقیم، سطح آلومینا با استفاده از یک یا چند لایه فلزی با روش‌های مختلف مانند PVD و CVD فلزی می‌شود [9-13].

جین و همکاران [14]، اتصال آلومینا به مس با استفاده از پرکننده Ag-26.7Cu-4.5Ti را لحیم‌کاری کردند و افزایش استحکام اتصال در نتیجه تشکیل لایه واکنش Cu_3Ti_3O را گزارش دادند. وانگ و همکاران [15]، آلیاژ TiAl و سرامیک ZrB_2-SiC توسط پرکننده‌های آمورف CuTiZrNi با فرایند لحیم‌کاری اتصال دادند. استحکام برشی نسبتاً کم 45 مگاپاسکال در 1153 کلوین در مدت زمان 1200 ثانیه بدست آمد. عامل استحکام کم، عمدتاً ناشی از نفوذ اتمی ناکافی و واکنش بین موادپایه و فلزپرکننده است. در 1183 کلوین، استحکام به حداکثر مقدار 187 مگاپاسکال رسید. در 1213 کلوین، استحکام برشی 177 مگاپاسکال گزارش که کمی کمتر از حداکثر مقدار بود. استحکام برشی اتصال لحیم‌کاری در 1243 کلوین به 125 مگاپاسکال کاهش یافت. دمای لحیم‌کاری با تأثیر بر ضخامت لایه‌های واکنش و تردی ترکیبات بین فلزی در اتصالات، بر استحکام برشی اتصالات تأثیر می‌گذارد. سونگ و همکاران [16]، با روش لحیم‌کاری القایی، سرامیک آلومینا و 316L SS را با استفاده از آلیاژ پرکننده فعال Sn-Ti اتصال دادند. مشاهده شد که ریزساختار اتصالات 316L SS/Al_2O_3 به وضوح با طولانی شدن زمان نگهداری متفاوت است. با طولانی شدن زمان نگهداری، Ti_6Sn_5 توزیع شده در فاز $FeSn_2$ به تدریج کاهش یافت. لایه واکنش در نزدیکی 316L SS به تدریج ضخیم شد و $FeSn_2$ به تدریج در ناحیه درز لحیم‌کاری افزایش یافت. این بررسی نشان می‌دهد که Ti در ناحیه درز لحیم‌کاری وجود داشته و به طور کامل پخش شده است، به طوری که Ti فعال با Al_2O_3 واکنش داده و منجر به رشد لایه TiO می‌شود که باعث می‌شود پیوند بین Al_2O_3 و درز لحیم‌کاری محکم‌تر شود. با افزایش بیشتر زمان نگهداری، Ti_6Sn_5 تقریباً در ناحیه درز لحیم‌کاری ناپدید شد و لایه واکنشی در نزدیکی 316L SS نسبتاً ضخیم‌تر بود که نشان می‌دهد Ti به طور کامل در سمت 316L SS پخش و غنی شده است.

چائو و همکاران [17]، با بررسی سطوح شکست اتصال Al_2O_3/AgCuTi/Fe-Ni-Co دریافتند ترک‌ها به دلیل وجود تنش پسماند بین فاز Ti_3Al و فاز TiO و به دلیل تفاوت در پلاستیک-الاستیک ایجاد می‌شوند. ترک‌ها با بارگذاری تنشی‌های سیکلی رشد می‌کنند و سپس در مرزهای دانه Al_2O_3 گسترش می‌یابند.

ژائو و همکاران [18]، بابررسی‌سطوح شکست اتصال Al_2O_3/Nb با استفاده از فلزپرکننده Ag-Cu-Ti/Cu/Ag-Cu-Ti مشاهده کردند که تمام ترک‌ها بر روی سطح سرامیک Al_2O_3 در مجاورت لایه واکنش ایجاد شده‌اند. بنابراین ضعیف‌ترین ناحیه در اتصالات لحیم کاری شده سمت سرامیک Al_2O_3 است. رجندران‌و همکاران [19]، شکست‌نگاری در اتصال Al_2O_3/Cu با پرکننده Ag-18Cu-6Sn-3Zr مورد بررسی قرار دادند. ترک‌هایی در فصل مشترک لایه واکنش/ فلزپرکننده بر روی لایه ZrO_2 ایجاد شد، که نشان‌دهنده یک فصل مشترک ضعیف است. علاوه براین،ترک‌هایی نیز درسطح Al_2O_3 در مجاورت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]

لایه واکنش مشاهده شد.

ماندال و همکاران [20]، از فلزپرکننده Ag-%28Cu-%3Ti برای اتصال سرامیک Al_2O_3 استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند فاز TiO نمی‌تواند مشکل کرنش ناشی از تفاوت در ضریب انبساط حرارتی در حین اتصال را مرتفع کند. فاز Ti_3Cu_3O می‌تواند به دلیل تفاوت در ضریب انبساط حرارتی کرنش موضعی را بهبود بخشد. داندایات و همکاران [21]، دریافتند علاوه بر تاثیر دمای لحیم کاری، فشار و زمان نگهداری بر استحکام اتصال، ضخامت فلزات‌پرکننده نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. با افزایش ضخامت فلزپرکننده، تنش حرارتی بیشتری ایجاد می‌شود و در نتیجه ترک‌هایی در سطح مشترک بین منطقه لایه واکنشی و منطقه لحیم کاری ایجاد می‌شود. از طرف دیگر، اتصال در دمای بالاتر مقاومت بیشتری در برابر چرخه حرارتی نشان می‌دهد. با این حال، فلز پرکننده نازک‌تر همیشه اتصال را با استحکام بالاتر آماده نمی‌کند. قابلیت اطمینان اتصالات Al_2O_3/Cu بستگی به تنش‌های پسماند ناشی از عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی و عدم تطابق مدول الاستیک ایجاد شده در طول خنک‌سازی دارد. اتصال غیرهمجنس سرامیک آلومینا به فلز مس، به دلیل اهمیت بالایی که در صنایع نوین دارد تاکنون توسط پژوهشگران متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. به علت نقطه ذوب بالای سرامیک‌ها و همچنین در صورت ذوب شدن به علت عدم توانایی در کنترل مذاب آن‌ها، جوشکاری ذوبی سرامیک‌ها تقریبا امکانپذیر نمی‌باشد. از طرفی بعلت عدم تغییر فرم، جوشکاری فشاری آن‌ها نیز تقریبا غیر ممکن است. لذا با توجه به موارد فوق یکی از روش‌های کاربردی برای اتصال سرامیک به سرامیک یا سرامیک به فلز، لحیم‌کاری می‌باشد. اما قابل ذکر است که یکی از مشکلات اساسی در استفاده از لحیم‌کاری برای اتصال سرامیک‌ها، ترشوندگی پایین آن‌ها می‌باشد. جهت حل مشکل عدم‌ترشوندگی سطح‌سرامیک، در ترکیبات فلزات پرکننده از عناصر فعال تیتانیوم و زیرکونیوم استفاده شده است تا با اکسیژن موجود در سرامیک آلومینا واکنش داده و منجر به تشکیل لایه واکنشی شود. این پژوهش به منظور بررسی اثر هم افزایی عناصر نقره، مس، قلع، تیتانیوم و زیرکونیوم و همچنین اثر افزودن عنصر زیرکونیوم به فلزات پرکننده در اتصال آلومینا به فلز مس تحت فرایند لحیم‌کاری سخت القایی طراحی شده است. هدف از انجام پژوهش طراحی و ساخت فیدتروهای لامپ پرتو ایکس از طریق اتصال سرامیک آلومینا به فلز مس می‌باشد. در این پژوهش از فلزات پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr برای لحیم‌کاری سخت القایی سرامیک آلومینا و مس استفاده شد. در انتها نیز به بررسی و تحلیل ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات ناحیه لحیم‌کاری شده پرداخته شده است.

2- مواد و روش پژوهش

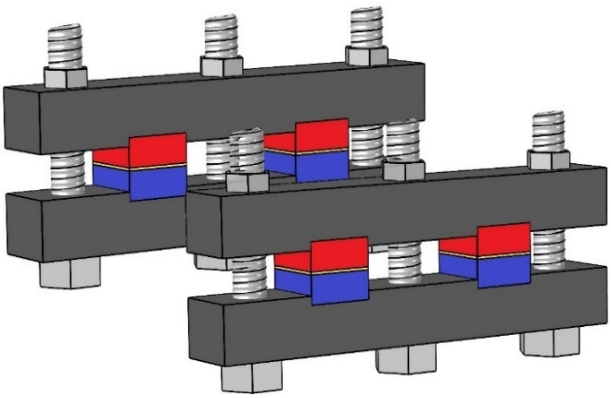
سرامیک آلومینا و مس بترتیب با استفاده از تیغه الماسه و ماشین‌کاری تخلیه‌ی الکتریکی سیمی به ابعاد 5×5×9 میلی‌مترمربع برش داده شدند. برای انجام فرایند لحیم‌کاری سخت به یک فلزپرکننده یا لایه میانی بین سرامیک آلومینا و مس نیاز است. در این پژوهش از دو لایه میانی با ترکیب شیمیایی متفاوت (Ag-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr) استفاده شد. برای تولید فلز پرکننده از سیستم ذوب مجدد قوس خلأ (VAR) استفاده شد. پس از انجام فرایند VAR، آلیاژهای ساخته‌شده، نورد شدند به‌طوری که پس‌ازعملیات‌نورد ضخامت فلزات‌پرکنندهAg-Cu-Ti-Snو Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr به ترتیب به 10±155 و 10±250 میکرون رسیدند.

سطح فلزات پایه با استفاده از سنباده از شماره 80 تا 1200 آماده‌سازی شدند. همچنین به منظور از بین بردن آلودگی سطحی، نمونه‌ها و لایه‌های واسط در استون تحت موج آلتراسونیک به مدت 30 دقیقه قرار داده شد. پس از آماده‌سازی سطوح اتصال، لایه واسط بین فلزات پایه قرارگرفته و کل مجموعه اتصال در یک نگهدارنده که در شکل (1) نشان داده شده، ثابت شد. در پایان، برای انجام فرایند اتصال، از کوره القایی شرکت بهیار صنعت استفاده شد. شکل (2) طرح‌واره‌ای از فرایند پیونددهی را نشان می‌دهد. پیونددهی در کوره القایی تحت اتمسفر خلأ با فلزات‌پرکننده فعال Ag-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr بترتیب در دماهای 840 و 860 درجه

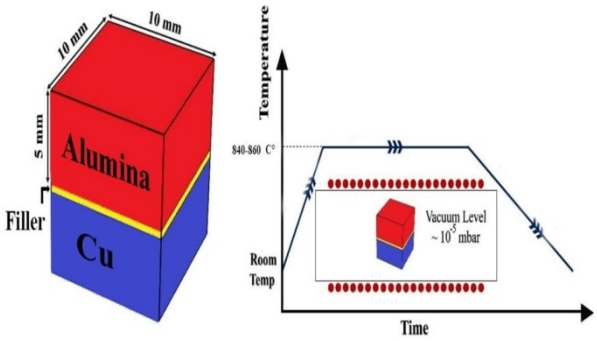
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]

سانتی‌گراد و در زمان ثابت 15 دقیقه صورت پذیرفت.



شکل 1- طرح‌واره نحوه استقرار نگه‌دارنده اجزای اتصال در کوره پیونددهی.



شکل 2- طرح‌واره مجموعه اتصال Alumina/filler/Cu با روش لحیم‌کاری سخت القایی.

جدول 1- نتایج آنالیز EDS و درصد عناصر موجود در فلزات پرکننده.

فلز پرکننده لحیم‌کاری	ترکیب شیمیایی بر حسب درصد وزنی		
	Ag + Cu + Ti	Sn	Zr
Ag-Cu-Ti-Sn	۹۴/۸	۵/۲	-
Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr	۹۰/۱	۶/۴	۳/۵

پس از برقراری اتصال، نمونه‌هایی به ابعاد 10×10×10 میلی‌متر مربع حاصل شد. با توجه به کوچک بودن ابعاد نمونه‌ها به‌منظور سهولت در فرایند سنباده‌زنی نمونه‌ها تحت بستر مانت سرد قرار گفتند. سطحی که تحت فرایند سنباده‌زنی قرار گفت سطح عرضی نمونه‌ها است. سنباده‌زنی نمونه‌ها با استفاده از کاغذهای سنباده از جنس SiC و به ترتیب با شماره‌های 80، 180، 400، 800، 1200 و 2400 انجام شد. به منظور انجام متالوگرافی نوری، سطح نمونه‌های آماده‌سازی شده در مرحله قبل، تحت عملیات حکاکی متالوگرافی قرار گرفتند. برای تشکیل محلول اچ، 5 گرم $FeCl_3$ با 15 میلی‌لیتر HCl و 75 میلی‌لیتر اتانول (C_2H_5OH) ترکیب شدند. محلول به مدت 15 دقیقه بر روی گرمکن با همزن مغناطیسی قرار گرفت. نمونه‌های لحیم‌کاری شده به مدت 30 ثانیه تحت حکاکی شیمیایی قرار گرفتند و پس از آن سطح نمونه با استفاده از الکل شستشو داده شد.

ریزساختارهای اتصالات با میکروسکوپ نوری (OM) بررسی شدند و آنالیز شیمیایی اتصالات مختلف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به سیستم طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS) انجام شد. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات، آزمون‌های ریزسختی و کشش برشی انجام گرفت. آزمون ریزسختی ویکرز نمونه‌های اتصال در امتداد جهت عمود برخط اتصال با بار 300 گرم و مدت‌زمان 10 ثانیه اندازه‌گیری شد. همچنین آزمون استحکام کشش برشی با استفاده از یک نگهدارنده مخصوص صورت گرفت. نمونه‌ها داخل محفظه تعبیه‌شده درون نگهدارنده قرارگرفته و دو قسمت نگهدارنده جهت کشش به فک‌های دستگاه کشش متصل شدند.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی فلزات پرکننده فرایند لحیم‌کاری

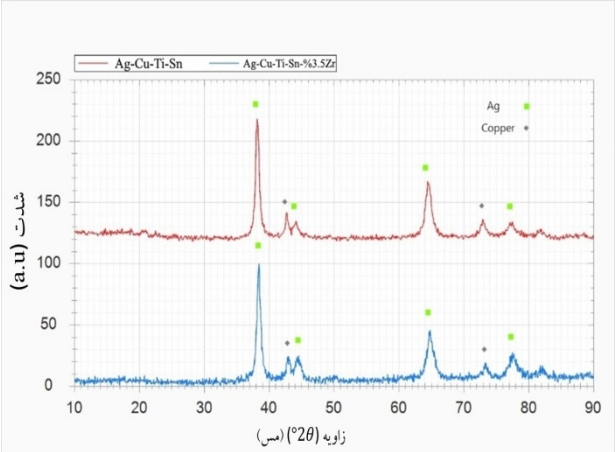
جهت تعیین درصد عناصر تشکیل دهنده فلزات پرکننده لحیم‌کاری از آنالیز EDS استفاده شد. این آنالیز نشان می‌دهد که هر دو فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr پایه نقره و مس می‌باشند و عناصر تیتانیوم، قلع و زیرکونیوم با مقادیر خیلی کم به صورت عناصر آلیاژی، فلزات پرکننده را تشکیل می‌دهند. این بررسی افزودن عنصر Zr به فلزکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr را تایید می‌کند. نتایج آنالیز EDS برای هر دو فلز پرکننده در جدول (1) نمایش داده شده است.

جهت بررسی کیفی فلزات پرکننده از آزمون پراش پرتو ایکس استفاده شد. شکل (3) الگو پراش پرتو ایکس هر دو فلزپرکنندهAg-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr را نشان می‌دهد. در این آزمون مشخص شد که هر دو فلزپرکننده پایه نقره و مس هستند و هر دو الگو پراش بسیار مشابه یکدیگرند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]

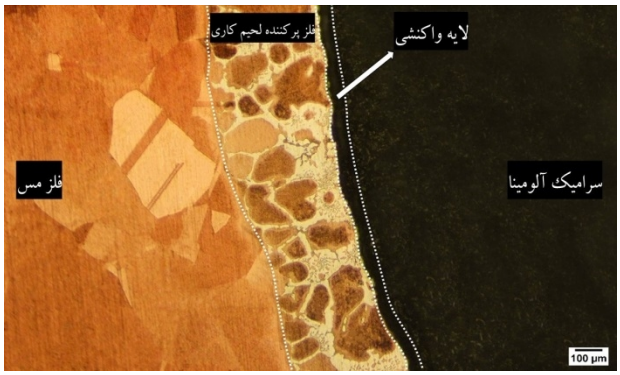
همچنین از این آزمون می‌توان برداشت کرد که هیچ‌گونه نشانه‌ای از حضور عنصر اکسیژن و ترکیبات اکسیدی در دو فلز پرکننده وجود ندارد. اتمسفر لحیم‌کاری تأثیر قابل توجهی بر ترشوندگی فلز پرکننده بر روی سطح سرامیکی دارد. پتانسیل بالای‌عناصر فعال (Tiو Zr) در واکنش‌با اکسیژن در فلزات‌پرکننده ممکن است منجر به از دست دادن قدرت ترشوندگی و کاهش استحکام اتصال گردد [19].



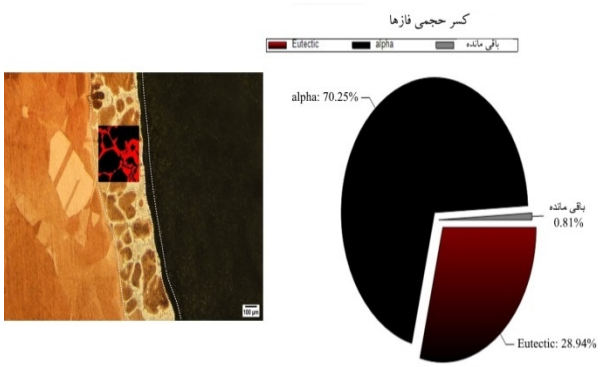
شکل 3- الگو پراش پرتو ایکس فلزات پرکننده لحیم‌کاری.

3-2- ارزیابی ریزساختاری اتصالات لحیم‌کاری

شکل (4)، تصویر میکروسکوپی نوری اتصال لحیم‌کاری آلومینا به مس با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn را نشان می‌دهد. این تصویر در ناحیه اتصال نشان می‌دهد که ریزساختار اتصال از نوع هیپویوتکتیک است. براساس دیاگرام دوتایی Ag-Cu، مذاب با کاهش دما به دو فاز مذاب (L) و فاز اولیه α تبدیل می‌شود. با سرد شدن و کاهش دما و با عبور از دما و خط یوتکتیک، مذاب طی واکنش یوتکتیک به فاز یوتکتیک تبدیل می‌شود. فاز یوتکتیک و فاز اولیه α غنی از نقره در تصویر (4) مشهود است. فاز یوتکتیک بیشتر شبیه یوتکتیک سوزنی و به اصطلاح مورفولوژی حروف چینی است. فصل مشترک بین سرامیک آلومینا و فلزپرکننده لحیم‌کاری به عنوان لایه واکنشی شناخته می‌شود و عناصر Ti موجود در فلزپرکننده با اکسیژن موجود در آلومینا واکنش داده و پیوند برقرار می‌کنند و در واقع مکانیسم برقراری اتصال بین سرامیک و فلزپرکننده در لحیم‌کاری ایجاد پیوند بین آن‌ها می‌باشد. شکل (5)، کسر حجمی دو فاز یوتکتیک و فاز اولیه α اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn با استفاده از نرم‌افزار Mip را نشان می‌دهد. کسر حجمی دو فاز یوتکتیک و فاز اولیه α بترتیب 29 و 71 درصد اندازه گیری شد.



شکل 4- تصویر میکروسکوپی نوری اتصال لحیم‌کاری آلومینا به مس با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn.

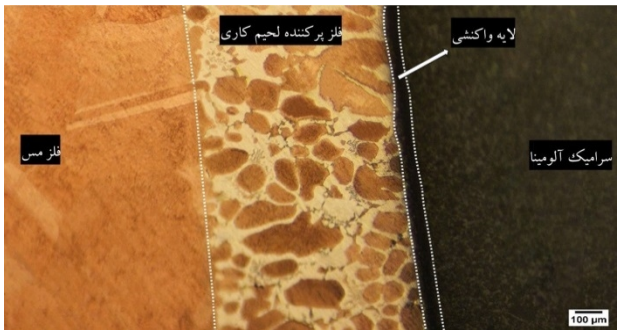


شکل 5- کسر حجمی فاز یوتکتیک و فاز اولیه α اتصال با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn با استفاده از نرم‌افزار Mip.

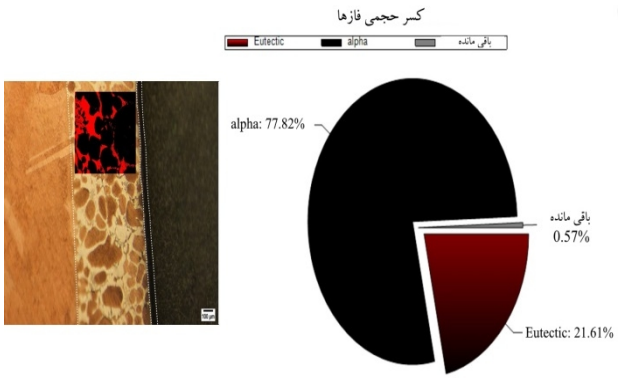
شکل (6)، تصویر میکروسکوپی نوری اتصال لحیم‌کاری آلومینا به مس با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr را نشان می‌دهد. در این تصویر در ناحیه اتصال لحیم نشان می‌دهد که ساختار اتصال از نوع هیپویوتکتیک است. فاز یوتکتیک و فاز اولیه α در شکل (6) مشهود است که فاز α غنی از نقره می‌باشد. عناصر Ti و Zr با اکسیژن موجود با آلومینا واکنش داده و لایه واکنشی را ایجاد می‌کنند. شکل (7)، کسر حجمی دو فاز یوتکتیک و فاز اولیه α اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr با استفاده از نرم افزار Mip را نشان می‌دهد. کسر حجمی دو فاز یوتکتیک و فاز اولیه α بترتیب 22 و 78 درصد اندازه‌گیری شد. در این اتصال کسر حجمی فاز یوتکتیک نسبت به اتصال با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]

فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn کمتر شده است.



شکل 6- تصویر میکروسکوپی نوری اتصال لحیم‌کاری آلومینا به مس با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr.



شکل 7- کسر حجمی فاز یوتکتیک و فاز اولیه α اتصال با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr با استفاده از نرم افزار Mip.

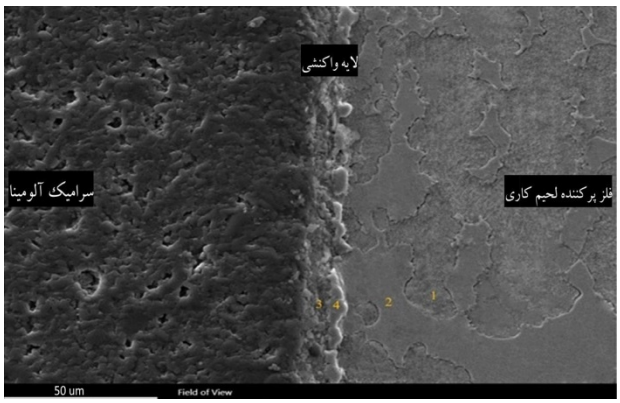
شکل (8)، تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی اتصال Al_2O_3/Cu با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn را نشان می‌دهد. واکنش‌های شیمیایی بین Al_2O_3 و فلزپرکننده منجر به تشکیل یک لایه واکنشی با ضخامت 14 میکرومتر در سطح مشترک Al_2O_3/Cu شده است. ضریب اکتیویته بالا، جرم و شعاع اتمی کم Ti، نفوذ سریع‌تر به سمت سطح Al_2O_3 را در مقایسه با سایر عناصر فلزپرکننده ممکن می‌سازد. جدایش Ti منجر به تشکیل فازهای Cu_3Ti_3O و TiO در مجاورت Al_2O_3 می‌شود. واکنش‌های تجزیه آلومینا و تشکیل TiO به شرح زیر است [22و23]:

$$Al_2O_3 \rightarrow 2Al^{-3} + 3O^{-2} \quad (1)$$

$$Ti + O \rightarrow TiO \quad (2)$$

$$Al_2O_3 + 3Ti \rightarrow 3TiO + 2Al \quad (3)$$

جدول (2)، نتایج آنالیز EDS در 4 نقطه از اتصال که در شکل(8) مشخص شده است را نشان می‌دهد. نقاط 1، 2، 3 و 4 بترتیب فاز غنی از مس، فاز غنی از نقره، فاز TiO و فاز Cu_3Ti_3O را مشخص می‌کنند. تجمع عناصر مس جلوی فصل مشترک سرامیک و فلزپرکننده، منجر به تشکیل فاز Cu_3Ti_3O می‌شود. همچنین یون‌های Al به سمت فلزپرکننده نفوذ می‌کنند و منجر به ایجاد ترکیبات Al_3Ti_3O در لایه واکنشی می‌شود.



شکل 8- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از اتصال لحیم‌کاری Al_2O_3/Cu با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn.

جدول 2- نتایج آنالیز EDS نقاط در شکل8.

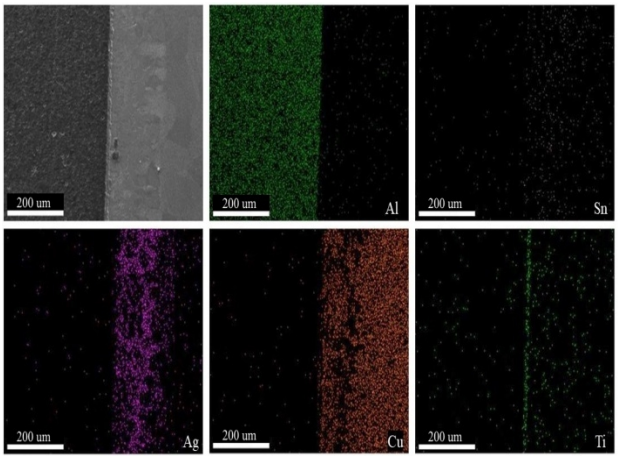
نقطه	ترکیب شیمیایی برحسب درصد اتمی							فاز احتمالی
	Ag	Cu	Ti	Sn	Zr	Al	O	
۱	۵/۸	۸۹/۹	۰/۹	۰/۶	–	۱/۹	۰/۹	فاز غنی از مس
۲	۷۰/۸	۲۳/۶	۷/۱	۲/۸	–	۰/۴	۰/۷	فاز غنی از نقره
۳	۱/۹	۴/۷	۳۲/۱	۰/۶	–	۱۷/۳	۴۳/۴	TiO
۴	۱/۸	۱۹/۸	۲۲/۳	۰/۷	–	۲۱/۱	۳۴/۳	$(Al,Cu)_3Ti_3O$

شکل‌های (9) و (10)، بترتیب آنالیز شیمیایی نقشه عنصری و خطی از تصویر ریزساختار اتصال Al_2O_3/Cu با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (9)، ملاحظه می‌شود لایه واکنشی غنی از عناصر Ti، Cu، Al و فقیر از عناصر Ag و Sn می‌باشد. همچنین ناحیه فلزپرکننده غنی از Ag، Cu و تا حدودی Sn است. تجمع عنصر آلیاژی Ti در جلوی فصل مشترک قابل مشاهده است. ترکیب TiO از طریق نفوذ عناصر Ti به داخل درز و حفرات موجود در سرامیک و ایجاد پیوند با اکسیژن تجزیه شده در آلومینا ایجاد می‌شود. از شکل (10) مشاهده می‌شود، عناصر Ti و Cu بیشتر در ناحیه

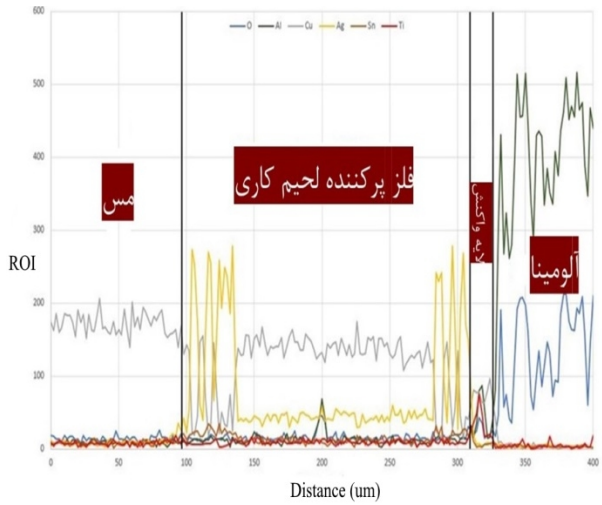
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]

لایه واکنشی توزیع شده‌اند و همچنین ناحیه فلزپرکننده غنی از Ag و Cu می‌باشد.

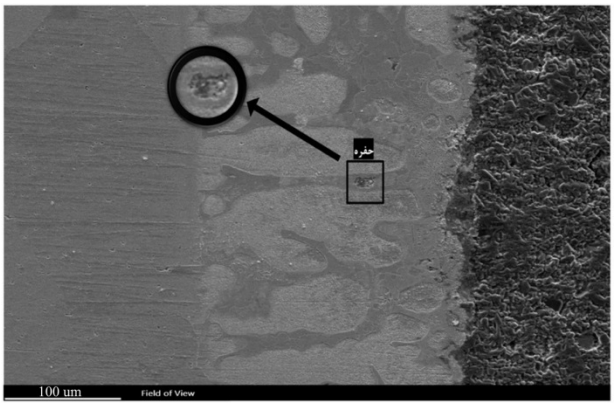


شکل 9- آنالیز نقشه‌ای عنصری از تصویر ریزساختار اتصال Al_2O_3/Cu با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn.



شکل 10- آنالیز خطی عنصری از تصویر ریزساختار اتصال Al_2O_3/Cu با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn.

شکل (11)، تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از اتصال Al_2O_3/Cu با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn را نشان می‌دهد. منطقه متاثر از نفوذ (DAZ) در نزدیکی فلز پایه مس قابل مشاهده است اما ضخامت پایینی دارد. از سوی دیگر بدلیل پایین بودن انتقال حرارت سرامیک آلومینا منطقه متاثر از حرارت (HAZ) نامشخص است. در بعضی از نواحی حفراتی در سطح اتصال وجود دارد که ممکن است حفرات انقباضی فلزات پرکننده باشند. ضخامت ناحیه فلزپرکننده لحیم کاری 188 میکرومتر اندازه گیری شد.



شکل 11- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از اتصال Al_2O_3/Cu با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn.

شکل (12)، تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از اتصال Al_2O_3/Cu با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr را نشان می‌دهد. واکنش شیمیایی بین Al_2O_3 و فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr منجر به تشکیل یک لایه واکنشی با ضخامت میانگین 9 میکرومتر در سطح مشترک Al_2O_3/Cu شده است. واکنش‌های تشکیل ZrO_2 به شرح زیر است [22]:

$$Al_2O_3 \rightarrow 2Al + 3O \quad (4)$$

$$Zr + 2O \rightarrow ZrO_2 \quad (5)$$

$$2Al_2O_3 + 3Zr \rightarrow 3ZrO_2 + 4Al \quad (6)$$

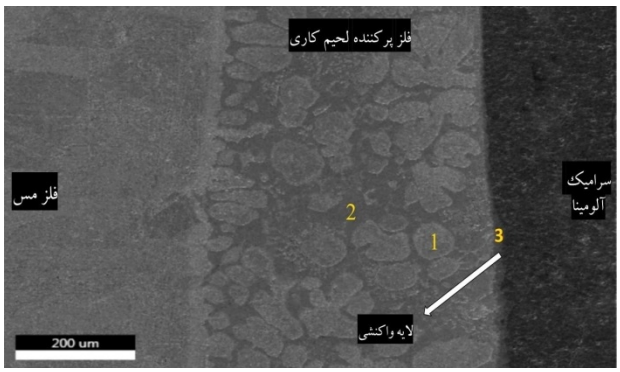
فاز ZrO_2 با نفوذ یون‌های اکسیژن به سمت فلزپرکننده و ترکیب با Zr تشکیل می‌شود و مس را در جلو فصل مشترک لایه واکنش باقی می‌گذارد تا رسوبات غنی از مس را تشکیل دهند. اگرچه Ti و Zr هر دو عنصر فعال هستند، جرم اتمی کم و شعاع اتمی کوچک Ti نسبت به Zr منجر به نفوذ سریع Ti از طریق آلیاژ Ag-Cu می‌شود. پس از ذوب شدن فلزپرکننده، مذاب غنی از Cu-Zr در امتداد مرزهای دانه Al_2O_3 نفوذ می‌کند و پتانسیل اکسیداسیون بالای Zr می‌تواند منجر به واکنش اکسایش و کاهش در Al_2O_3 شود [24].

جدول (3)، نتایج آنالیز EDS، 3 نقطه از اتصال که در شکل(12) مشخص شده است را نشان می‌دهد. نقاط 1، 2 و 3 بترتیب فاز غنی از مس، فاز غنی از نقره و ZrO_2 و TiO را مشخص می‌کنند. شکل‌های (13) و (14)، بترتیب آنالیز

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]

شیمیایی نقشه عنصری و خطی از تصویر ریزساختار اتصال Al_2O_3/Cu با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (13)، ملاحظه می‌شود منطقه لحیم‌کاری غنی از عناصر Ag، Cu و Sn و فقیر از عناصر Ti و Zr است. همچنین مشاهده می‌شود منطقه لایه واکنشی غنی از Cu، Ti و Zr می‌باشد. در شکل (14)، آنالیز خطی عنصری بدست آمده نشان می‌دهد بدلیل بالا بودن ضریب نفوذ Ti نسبت به Zr، لایه اکسیدی TiO نسبت به ZrO_2 سریع‌تر و نزدیک‌تر به سطح سرامیک تشکیل می‌شود.



شکل 12- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از اتصال Al_2O_3/Cu با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr.

جدول 3- نتایج آنالیز EDS نقاط در شکل (12)

نقطه	ترکیب شیمیایی نقاط برحسب درصد اتمی							فاز احتمالی
	Ag	Cu	Ti	Sn	Zr	Al	O	
۱	۱۱/۴	۷۶/۶	۲/۸	۱/۷	۲/۵	۲/۱	۲/۹	فاز غنی از مس
۲	۷۳/۱	۱۴/۶	۰/۹	۴/۵	۳	۱/۶	۲/۳	فاز غنی از نقره
۳	۲/۶	۱۳/۹	۳۴/۲	۲/۶	۱۱/۱	۰/۷	۳۴/۹	$TiO-ZrO_2$

شکل (15) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از اتصال Al_2O_3/Cu با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr را نشان می‌دهد. فاز یوتکتیک با مورفولوژی حروف چینی قابل مشاهده است. منطقه متاثر از نفوذ (DAZ) در نزدیکی فلزپایه مس مشخص شده است و ضخامت بالاتری نسبت به اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn دارد. ضخامت منطقه لحیم‌کاری 473 میکرومتر اندازه گیری شد.

3-3- ارزیابی خواص مکانیکی و شکست نگاری اتصالات

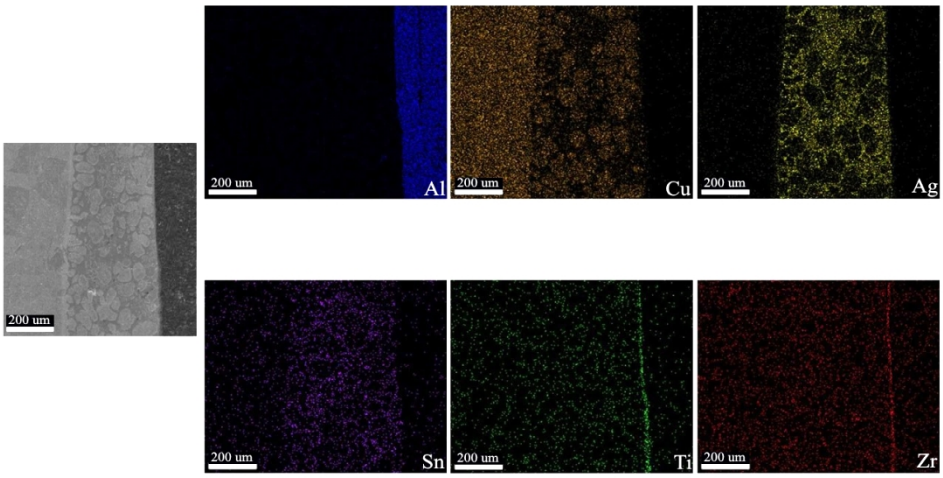
شکل (16) نتایج آزمون استحکام برشی اتصالات را نشان می‌دهد. آزمون استحکام برشی نشان داد اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr (14 مگاپاسکال) استحکام برشی بالاتری نسبت به اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn (9مگاپاسکال) دارد. ضخامت فلزپرکننده لحیم کاری بالاتر (250 میکرومتر) و ضخامت لایه واکنشی کمتر (9 میکرومتر) در اتصال لحیم کاری با فلزپرکننده حاوی 3/5 درصد وزنی زیرکونیوم نسبت به اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn باعث می‌شود اتصال با فلز پرکننده حاوی 3/5 درصد وزنی زیرکونیوم استحکام برشی بالاتری داشته باشد [20و21].

در طول خنک شدن فلزپرکننده لحیم‌کاری، تبدیل چندشکلی $t-ZrO_2$ (دارای ساختار بلوری تتراگونال) به $m-ZrO_2$ (دارای ساختار بلوری مونوکلینیک) با افزایش حجم تقریباً 3 تا 5 درصدی اتفاق می‌افتد. در نتیجه‌ی تغییر حجم، تنش پسماند ایجاد می‌شود و می‌تواند منجر به تشکیل ریز ترک‌ها در لایه واکنش $m-ZrO_2$ شود. بنابراین، چقرمگی شکست $m-ZrO_2$ کاهش یافته و به شدت مستعد ایجاد ترک است. همچنین افزیش ضخامت لایه واکنشی ZrO_2 در اتصالات منجر به کاهش استحکام اتصال می‌شود [19].

نمودار ریزسختی ویکرز بر حسب فاصله اتصال سرامیک آلومینا ومس‌بافلزات‌پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr به ترتیب در شکل‌های (17) و (18) نشان داده شده است. بالاترین سختی در هر دو اتصال مربوط به سرامیک آلومینا با 542 ویکرز می‌باشد که نشان از سختی بالای این ماده است. در منطقه فلز پرکننده لحیم‌کاری اتصالات با فلزات پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr، از نواحی فاز غنی از مس، فاز غنی از نقره و ناحیه نزدیک لایه واکنش آزمون ریزسختی انجام شد که نشان می‌دهد اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr در سه ناحیه ذکر شده بترتیب دارای سختی 144، 83و 181 ویکرز و در اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn دارای سختی 96، 75 و 101 ویکرز می‌باشد.

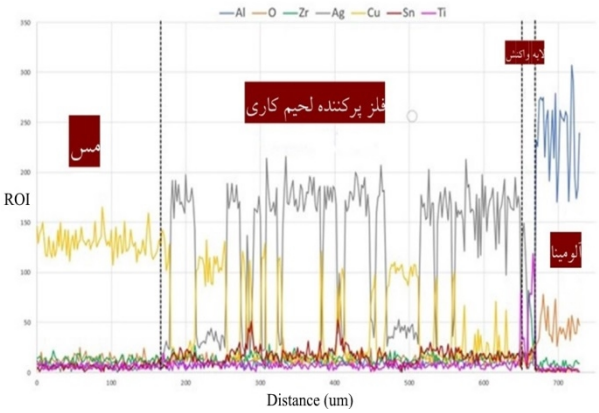
همچنین این بررسی افزایش سختی بر اثر افزودن Zr را نشان می‌دهد. آزمون ریزسختی نشان داد، ناحیه لایه واکنشی اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr دارای سختی 284 ویکرز می‌باشدکه نسبت به اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]



شکل 13- آنالیز نقشه عنصری از تصویر ریزساختار اتصال Al_2O_3/Cu با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr.

افزایش 70 درصدی پیدا کرده است. این افزایش را می‌توان به تجمع عناصر آلیاژی Ti و Zr در جلوی فصل مشترک نسبت داد. مکانیسم‌های شکست آلیاژهای مهندسی به طورکلی به دو صورت درون‌دانه‌ای و بین‌دانه‌ای (مرزدانه‌ای) اتفاق می‌افتد. به‌هرحال بدون توجه به مسیر شکست، به‌طورکلی هفت حالت اساسی شکست عبارتند از شکست دیمپلی، شکست صفحه‌ای یا کلیواژ، شکست شبه‌کلیواژ، شکست فلوت، شکست ناشی از پارگی و شکست ناشی از خستگی [25]. مکانیسم شکست در اتصالات با فلزات پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn (A) و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr (B) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. تصاویر SEM از سطوح شکست (A) و (B) در شکل(19) ارائه شده است. جدول (4) نتایج آنالیز EDS و فازهای احتمالی در شکل (19-الف) را نشان می‌دهد. طبق نتایج EDS ملاحظه می‌شود که نقاط 1 و 2 بترتیب نشان دهنده فاز α-Al_2O_3 و TiO می‌باشند. طبق نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که مسیر شکست ابتدا در لایه واکنشی و سپس سمت آلومینا بوده است. با توجه به تشکیل ترکیبات ترد و شکننده در ناحیه اتصال که سختی بالایی نیز دارند، شرایط را برای جوانه‌زنی و رشد ترک فراهم می‌کنند [17و18]. جدول (4) نتایج آنالیز EDS و فازهای احتمالی در شکل(19-ب) را نشان می‌دهد. طبق‌نتایج EDS ملاحظه می‌شود که نقاط 1 و 2 بترتیب نشان‌دهنده فاز α-Al_2O_3 و ZrO_2 می‌باشند. طبق نتایج می‌توان نتیجه گرفت که مسیر شکست مشابه اتصال با فلز پرکننده بدون زیرکونیوم می‌باشد و شکست در سمت سرامیک و لایه واکنش بدلیل پیوند ضعیف رخ داده است [19].



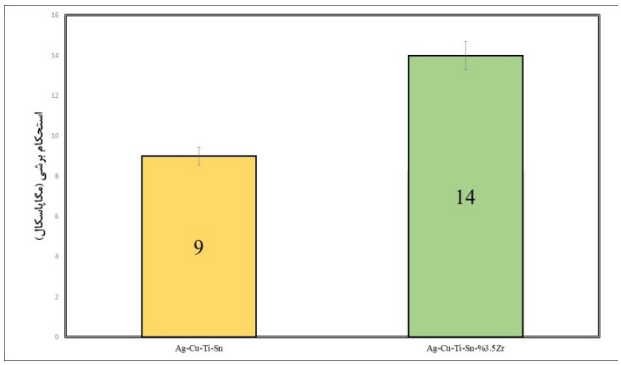
شکل 14- آنالیز خطی عنصری از تصویر ریزساختار اتصال Al_2O_3/Cu با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr.



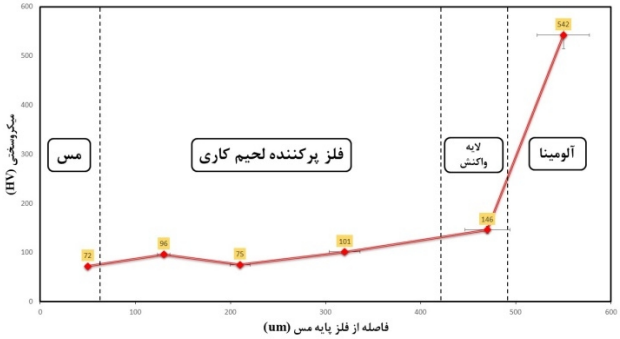
شکل 15- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از اتصال Al_2O_3/Cu با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

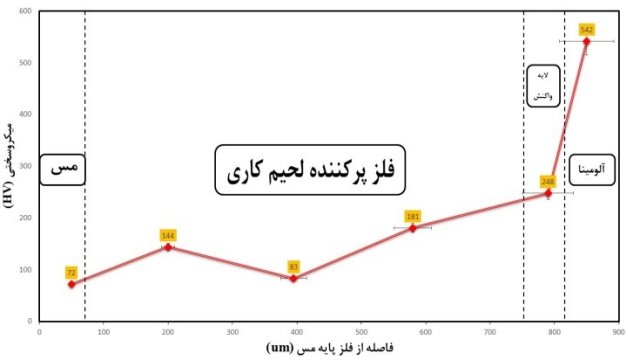
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]



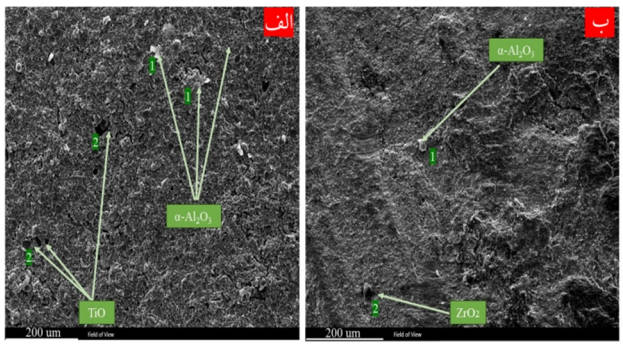
شکل 16- نتایج آزمون استحکام برشی اتصالات لحیم‌کاری.



شکل 17- نمودار ریزسختی ویکرز اتصال آلومینا به مس با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn برحسب فاصله.



شکل 18- نمودار ریزسختی ویکرز اتصال آلومینا به مس با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr برحسب فاصله.



شکل ۱۹- تصاویر SEM از سطوح شکست اتصالات لحیم‌کاری با فلزات پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn (الف) و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr (ب).

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اتصال Al_2O_3/Cu با استفاده از پرکننده‌های چند جزیی Ag-Cu-Ti-Sn و Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr بترتیب در دماهای 840 و 860 درجه سانتی‌گراد و زمان 15 دقیقه با روش لحیم کاری سخت القایی، با موفقیت انجام گرفت. نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- دراتصال Al_2O_3/Cu لحیم کاری شده با استفاده از پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn در منطقه لحیم‌کاری ترکیب یوتکتیک Ag-Cu با زمینه مس و در منطقه لایه واکنشی دو فاز TiO و Cu_3Ti_3O مشاهده شد. (Al_2O_3/TiO/Cu_3Ti_3O/eutectic Ag-Cu/Copper) ترتیب ساختار نواحی اتصال را نشان می‌دهد. در اتصال Al_2O_3/Cu لحیم کاری شده با استفاده از پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr، در منطقه لحیم‌کاری ساختار یوتکتیک Ag-Cu با زمینه مس و در منطقه لایه واکنشی دو فاز اکسیدی TiO و ZrO_2 مشاهده شد. ترتیب ساختار اتصال بصورت (Al_2O_3/TiO/ ZrO_2 /eutectic Ag-Cu/Copper) می‌باشد.

- آزمون استحکام برشی نشان داد، اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr (14مگاپاسکال) استحکام‌برشی بالاتری نسبت به اتصال با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn (9 مگاپاسکال) دارد. ضخامت فلز پرکننده لحیم کاری بالاتر (250 میکرومتر) و ضخامت لایه واکنشی کمتر (9 میکرومتر) در اتصال لحیم کاری با فلز پرکننده حاوی 3/5 درصد وزنی زیرکونیوم نسبت به اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn باعث میشود اتصال با فلزپرکننده حاوی 3/5 درصد وزنی زیرکونیوم استحکام برشی بالاتری داشته باشد.

- آزمون ریزسختی نشان داد، ناحیه لایه واکنشی اتصال با فلزپرکننده Ag-Cu-Ti-Sn-%3.5Zr دارای سختی 284 ویکرز می‌باشد که نسبت به اتصال با فلز پرکننده Ag-Cu-Ti-Sn افزایش 70 درصدی پیدا کرده است. این افزایش را می‌توان به تجمع عناصر آلیاژی Ti و Zr در جلوی فصل مشترک سرامیک آلومینا و لایه واکنشی نسبت داد. بررسی سطوح شکست اتصالات نشان داد شکست در مسیر لایه واکنشی و در ادامه در سمت سرامیک رخ داده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]

منابع

1. Stosz, M., S. Narayanasamy, J. Bell, T. Graule, D. Kata and G. Blugan. 2023. Joining of alumina ceramics with Ti and Zr interlayers by spark plasma sintering. Materials Design.227:111724. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111724
2. Suprapedi, S., M. Muljadi and P. Sardjono. 2018. The characterization of ceramic alumina prepared by using additive glass beads. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.299:012043. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/299/1/012043
3. Vakilnejad, M. 2021. Oxide engineering ceramics. Arastoo Pub.
4. Zhang, P., R. Fu, Y. Tang, B. Cao, M. Fei and Y. Yang. 2015. Morphology of thick film metallization on aluminum nitride ceramics and composition of interface layer. Ceramics International.41(10, Part A):13381-13388. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.125
5. Rajkovic, V., D. Bozic, and M. T. Jovanovic. 2010. Effects of copper and Al2O3 particles on characteristics of Cu–Al2O3 composites. Materials & Design.31(4): 1962 1970. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.037
6. Yushan, Z., and A. Hu. 2010. From Microjoining to Nanojoining. The Open Surface Science Journal.3. http://dx.doi.org/10.2174/1876531901103010032
7. Kokabi, A. H. 2008. Welding Ceramic-Metal, Sharif uni Pub.
8. Niu, G. B., D. P. Wang, Z.W. Yang and Y. Wang. 2017. Microstructure and mechanical properties of Al2O3/TiAl joints brazed with B powders reinforced Ag-Cu-Ti based composite fillers. Ceramics International. 43(1, Part A):439-450. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.178
9. Mansouri, E., and H. Khorsand. 2024. Similar jointing of Inconel 600 super alloy using nano stracture powder filler with high entropy design. JWSTI.9(2):77-92. http://dx.doi.org/10.47176/JWSTI.2024.07
10. Ardalani, A., and H. Naffakh-Moosavy. 2024. Brazing of 17-4 PH stainless steel to Ti-6Al-4V alloy using BNi-2 filler metal. JWSTI.9(2):103-113. http://dx.doi.org/10.47176/JWSTI.2024.09
11. Yang, X., X. Xiong, W. Jin, Y. Peng, R. Liu and Z. Peng. 2020. Research Progress of Ceramic Metallization Technology. Research and Application of Materials Science.2. http://dx.doi.org/10.33142/msra.v2i1.1973
12. Wang, N., D. P. Wang, Z. W. Yang and Y. Wang. 2016. Interfacial microstructure and mechanical properties of zirconia ceramic and niobium joints vacuum brazed with two Ag-based active filler metals. Ceramics International.42(11):12815-12824. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.045
13. Lei, M., J. C. Feng, X. Y. Tian, J. M. Shi. and L. X. Zhang. 2017. Reactive wetting of TiC-Ni cermet by Ag-Cu-Zn alloy during evaporation. Vacuum.138:22-29. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.01.014
14. Jin, B., X. Huang, M. Zou, Y. Zhao and Y. Mao. 2021. Joining of Al2O3 ceramic to Cu using refractory metal foil. Ceramics International.48. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.123
15. Wang, G., Y. Yang, P. Wu, D. Shu, D. Zhu and C. Tan. 2019. Effect of brazing temperature on microstructure and mechanical properties of TiAl/ZrB2 joint brazed with CuTiZrNi filler. Journal of Manufacturing Processes.46:170-176. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.09.001
16. Song, Y., T. Zhu, H. Bian, Y. Lei, D. Liu and X. Song. 2023. Induction brazing of Al2O3 ceramic and 316L stainless steel with Sn–Ti filler alloy. Ceramics International.49(17, Part A):27904-27911. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.06.015
17. Cao, Y., J. Yan, N. Li, Y. Zheng and C. Xin. 2015. Effects of brazing temperature on microstructure and mechanical performance of Al2O3/AgCuTi/Fe–Ni–Co brazed joints. Journal of Alloys and Compounds.650:30-36. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.237
18. Zhao, Y., Y. Wang, Z. Yang and D. Wang. 2019. Relief of residual stress in Al2O3/Nb joints brazed with Ag-Cu-Ti/Cu/Ag-Cu-Ti composite interlayer. Archives of Civil and Mechanical Engineering.19(1):1-10. https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.08.001
19. Rajendran, S. H., S. J. Hwang and J. P. Jung. 2021. Active Brazing of Alumina and Copper with Multicomponent Ag-Cu-Sn-Zr-Ti Filler. Metals.11(3). http://dx.doi.org/10.3390/met11030509
20. Mandal, S., V. Rao and A. Ray. 2004. Characterization of the brazed joint interface between Al2O3 and (Ag-Cu-Ti). Journal of Materials Science.39:5587-5590. http://dx.doi.org/10.1023/B:JMSC.0000039295.03229.25
21. Dandapat, N., S. Ghosh, B. Guha, S. Datta and V. Balla. 2016. Effect of Processing Parameters on Thermal Cycling Behavior of Al2O3-Al2O3 Brazed Joints. Metallurgical and Materials Transactions B.47. http://dx.doi.org/10.1007/s11663-016-0731-9
22. Lin, K. L., M. Singh and R. Asthana. 2014. Interfacial characterization of alumina-to-alumina joints fabricated using silver–copper–titanium interlayers. Materials Characterization. 90:40-51. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.01.009
23. Kassam, T. A., N. Hari Babu, N. Ludford, S. Yan and A. Howkins. 2018. Secondary Phase Interaction at Interfaces of High-Strength Brazed Joints made using Liquid Phase Sintered Alumina Ceramics and Ag-Cu-Ti Braze Alloys. Scientific Reports.8(1):3352. https://doi.org/10.1038/s41598-018-20674-w
24. Loehman, R. E., and A. P. Tomsia. 1992. Reactions of Ti and Zr with AlN and Al2O3. Acta Metallurgica et Materialia.40:S75-S83. (https://doi.org/10.1016/0956-7151(92)90266-H)
25. Laurila, T., A. Paul, V. Vuorinen and S. Divinski. 2014. Thermodynamics, Diffusion And The Kirkendall Effect In Solids. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-07461-0

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-27]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.22]