

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

اتصال نانو کامپوزیت Al-Al₃V با استفاده از فرایند اتصال فاز مایع گذرا و ارزیابی خواص آن

مقاله پژوهشی

سیده زهرا انوری^{۱*}، مهدی رجبی^۲، صفورا عشاقی^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک و متالورژی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مواد (جوشکاری)، موسسه دانش پژوهان پیشرو، اصفهان، ایران

۳- عضو هیات علمی موسسه دانش پژوهان پیشرو، اصفهان، ایران

szanvari@pnu.ac.ir*

چکیده

در این تحقیق اتصال نانو کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات آلومیناید و انادیوم با استفاده از فرآیند اتصال فاز مایع گذرا و ارزیابی خواص آن، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. همچنین اثر تغییرات دما و زمان اتصال بر خواص اتصال بررسی شد. برای این منظور ابتدا نانو کامپوزیت Al-Al₃V جهت اتصال آماده سازی شد. از فلز مس به عنوان لایه واسطه، استفاده شد و اتصال این قطعات به روش فاز مایع گذرا، در دماهای ۵۶۰، ۵۸۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد و زمان های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. جهت ارزیابی ریزساختار درز اتصال و اطراف آن از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. همچنین بررسی استحکام برشی اتصال ها توسط دستگاه آزمون فشار انجام شد. نتایج نشان داد در دمای ۵۸۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد اتصال بهتری نسبت به بقیه نمونه ها ایجاد شده است. با افزایش دمای اتصال، حجم مذاب ایجاد شده در درز اتصال بیشتر شده و لذا سطح وسیع تری از درز اتصال توسط مذاب پر شد. با توجه به نمودارهای سختی سنجی به دست آمده بیشترین میزان سختی در درز اتصال و اطراف آن در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد در زمان ۲۰ دقیقه است که دلیل آن نفوذ مس و ذرات رسوبی Al₂Cu بیشتر در اطراف درز اتصال است. بیشترین استحکام برشی مقدار ۶۵ مگا پاسکال برای اتصال ایجاد شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد در زمان ۴۰ دقیقه به دست آمد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۴

کلید واژگان:

فرایند اتصال فاز مایع گذرا

نانو کامپوزیت

کامپوزیت های زمینه آلومینیومی

لایه واسطه

استحکام برشی.

TLP Bonding of Al-Al₃V Nano Composite and Evaluation of its Properties

S. Z. Anvari^{1*}, M. Rajabi², S. Oshaghi³

1- Department of Mechanical and Metallurgical Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran.

2 M. Sc Graduated, Daneshpajooohan Institute of Higher Education, Isfahan, Iran.

3 Daneshpajooohan Institute of Higher Education, Isfahan, Iran.

* szanvari@pnu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Dor:

20.1001.1.24233226.1401.16.4.3.6

Keywords:

Transient Liquid Phase Bonding

Nanocomposite

Aluminum Matrix Composites

Intermediate Layer

Shear Strength

Abstract

In this research, the bonding of aluminum matrix nanocomposites reinforced by Al₃V particles was investigated using a transient liquid phase of bonding process and evaluating its properties. The effect of temperature and time of bonding on the properties was also investigated. For this purpose, Al-Al₃V nanocomposite components were first prepared for bonding. The copper metal was used as the intermediate layer and bonding of these components was investigated by the transient liquid phase method at 560, 580 and 600°C, and 20, 40 and 60 min. Scanning electron microscopy was used to evaluate the microstructure of the joint. The shear strength of the joints was also evaluated by a pressure test device. The results indicated better bonding at 580 and 600 °C than other samples. With increasing bonding temperature, the melt volume increased at the bonding joint and thus a wider surface area is filled by melt. According to the microhardness results, the maximum hardness of the joint is at 600 °C for 20 min due to the diffusion of copper and formation of Al₂Cu precipitated particles around the joint seam. The maximum joint shear strength of 65 MPa was achieved at 600 °C for 40 min.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Seyedh Zahra Anvari, Mahdi Rajabi, Safora Oshaghi, TLP Bonding of Al-Al₃V Nano Composite and Evaluation of its Properties, New Process in Material Engineering, 2023, 16(4), 27-40.

۱- مقدمه

بر اساس پیشرفت‌های اخیر که در ساخت کامپوزیت‌های آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده غیر پیوسته انجام شده، امروزه این کامپوزیت‌ها به صورت تجاری درآمده و موجب کاهش در هزینه‌های تولید شده است. همچنین با گسترش مواد نانو ساختار و توسعه روش‌های ساخت نانو کامپوزیت‌ها و خواص فوق‌العاده نانو کامپوزیت‌ها، تمایل صنایع مختلف به استفاده از کامپوزیت‌های نانو ساختار بیشتر شده است. از آنجایی که بیشتر قطعات صنعتی به صورت سازه‌های ترکیبی با اتصالات مختلف هستند. به دست آوردن یک اتصال با خواص مکانیکی و فیزیکی مناسب بدون هیچ‌گونه عیبی، امری ضروری در صنعت است و نبود روش اتصال مناسب و اقتصادی و قابل اعتماد، کاربرد و قابلیت این مواد پیشرفته را محدود خواهد کرد. فرایندهای اتصال و جوشکاری متعددی وجود دارد که هر یک کاربرد خاص خود و مزایا و معایب مربوط به خود را دارا است؛ بنابراین به کارگیری بهترین روش اتصال یک موفقیت اساسی در تولید قطعات است. فرآیند اتصال ذوبی برای اتصال کامپوزیت‌ها ناکارآمد بوده زیرا حوضچه‌ی مذاب به وجود آمده سیالیت مناسب برای پر کردن درز اتصال را نداشته و لذا عیوبی مانند جوش نگرفتگی و تخلخل شدید در درز اتصال ایجاد خواهد کرد و از طرفی واکنش‌های ناخواسته و مضر در فصل مشترک زمینه و ذرات تقویت‌کننده کامپوزیت ممکن است ایجاد شود که استحکام اتصال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. فرایند اتصال با فاز مایع گذرا یکی از روش‌های اتصال با قابلیت‌های بالا و منحصربه‌فرد خود است که می‌تواند در مواردی که اتصال و جوشکاری با روش‌های دیگر امکان‌پذیر نبوده و یا مشکلات خاص خود را داراست به کار گرفته شود؛ بنابراین برای اتصال این گونه مواد، فرآیندهای اتصال حالت جامد توسعه یافته است، از میان این روش‌ها اتصال نفوذی با استفاده از فاز مایع گذرا جهت اتصال کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است [۱]. اتصال نفوذی^۱ یک روش اتصال برای تولید قطعات بسیار دقیق و ساختارهای پیچیده است زیرا اتصال تحت یک فرایند نفوذ صورت می‌گیرد.

اتصالات صورت گرفته استحکام مواد اولیه و پایداری ابعادی بالایی دارند. در کل، دماهای اتصال نفوذی در محدوده $T_m - 0.8 - 0.5 T_m$ هستند که T_m نقطه ذوب مطلق مواد اتصال یافته است [۲-۳]. اتصال اصلی از طریق متلاشی شدن اکسیدهای سطحی و سپس نفوذ اتمی، تبلور مجدد و یا رشد دانه با اعمال یک فشار مناسب صورت می‌گیرد. دما، فشار و زمان نگاه‌داری سه پارامتر اصلی هستند. در این روش، مواد که به صورت جفتی در تماس هستند تحت یک فشار خیلی کم‌تر از استحکام تسلیم مواد قرار گرفته و در دما و زمان مشخص اتصال اعمال می‌شود. ریزساختار ناحیه اتصال مشابه با نواحی دور از فصل مشترک اتصال است و خواص فلز اولیه را دارد [۴-۵]. در این فرایند اگر سطوح متصل شونده عاری از آلودگی باشند، نیروی محرکه‌ای که باعث ایجاد اتصال می‌شود، کاهش انرژی سطحی است. چون سطوح کاملاً صاف نیستند با اعمال یک نیروی فشاری، تماس ابتدایی بین برآمدگی‌های سطوح برقرار می‌شود. سپس با تغییر شکل پلاستیک و لغزش برآمدگی‌ها، سطح تماس دو قطعه افزایش می‌یابد. با افزایش درجه حرارت میزان این تغییر شکل بیشتر شده و در همین هنگام نیز پدیده نفوذ در بین سطوح عاری از آلودگی، باعث حذف مرزها در فصل مشترک می‌شود [۶].

در فرایند اتصال مایع گذرا، اتصالی متالورژیکی بین فلزات پایه ایجاد می‌شود، بدین صورت که در اثر نفوذ متقابل^۲ اتم‌های فلز پایه در ابتدا یک لایه‌ی مذاب در درز اتصال ایجاد شده و با گذشت زمان و نفوذ متقابل بیشتر اتم‌ها انجاماد هم‌دما^۳ رخ می‌دهد [۷-۸]. به‌طور کلی فرایند اتصال مایع گذرا شامل چهار مرحله انحلال لایه واسطه^۴، عریض شدن لایه مذاب ایجاد شده و همگن شدن ترکیب شیمیایی آن، انجاماد هم‌دما و همگن شدن ناحیه اتصال است. فاز مایع (مذاب)، در اتصال نفوذی TLP معمولاً با قرارگیری یک لایه‌ی واسطه شکل می‌گیرد، این گونه که با قرار گرفتن مجموعه‌ی اتصالی (شامل مواد پایه و لایه‌ی واسطه) در دمای اتصال (که قدری بالاتر از دمای یوتکتیک بین لایه‌ی واسطه و مواد پایه است)، نفوذ متقابل اولیه بین اتم‌های لایه واسطه و مواد پایه انجام شده و لایه‌ی نازک از مذابی با

منجر به ایجاد تبلور مجدد در منطقه اتصال و درشت شدن دانه گردید و ذوب جزئی در مناطقی از مرز دانه‌های فلز پایه مشاهده شد. علاوه بر این، افزایش زمان اتصال باعث تغییر شکل نمونه و در مواردی خمیری شدن موضعی فلز پایه شد. همچنین با افزایش فشار و تکرار آزمایش تحت فشارهای ۱، ۳، ۵ و ۸ تأثیر قابل توجهی مشاهده نشد.

در پژوهش قبلی [۱۸] کامپوزیت نانو ساختار حاوی ذرات تقویت کننده Al_3V توسط آلیاژسازی مکانیکی و اکستروژن داغ^۷ سنتز شده و خواص مکانیکی آن مورد ارزیابی قرار گرفت؛ بنابراین هدف از این پژوهش این است که با بهینه کردن دما و زمان اتصال و همچنین با به کارگیری لایه‌های واسطه به بالاترین استحکام بین اتصال نانو کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم دست یافت. از آنجایی که در خصوص اتصال کامپوزیت‌های با ساختار نانو، مطالعات و تحقیقات زیادی صورت نگرفته است، لذا در این تحقیق سعی بر آن است تا قابلیت اتصال نانو کامپوزیت زمینه آلومینیمی تقویت شده با ذرات آلومیناید و آنادیم بیان شود.

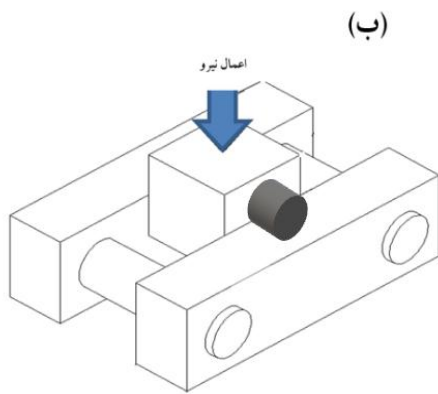
۲- مواد و روش انجام آزمایش

قطعات نانو کامپوزیت $Al - 10 \text{ wt. \% } Al_3V$ قبلاً با استفاده از فرایند آلیاژسازی مکانیکی و اکستروژن داغ تولید شده است [۱۸]. بعد از آماده‌سازی آن‌ها و برش توسط وایرکات ابتدا سطوح موردنظر با سنباده‌های شماره ۳۲۰ تا ۱۰۰۰ صیقل داده شدند. سپس به منظور چربی زدایی و رفع هرگونه آلودگی از سطوح صیقلی شده، از استون و الکل استفاده شد [۱۲]. از لایه واسطه مس به صورت ورقه نازک (فویل) با ضخامت ۲۰ میکرومتر استفاده شد. جهت انجام اتصال و حرارت دادن به نمونه‌های نانو کامپوزیت $Al-Al_3V$ از کوره خلأ با المنت‌های گرافیتی تحت خلأ حدود $10^{-5} \times 1/8$ میلی بار استفاده شد. جهت اتصال در کوره دماهای ۵۶۰، ۵۸۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه انتخاب شد. از میکروسکوپ نوری ساخت شرکت Nikon، مدل EPIPHOT۳۰۰ جهت بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌ها و درز اتصال آن‌ها استفاده شد. برای ارزیابی ریزساختار از دستگاه پرتوایکس Philips مدل X pert

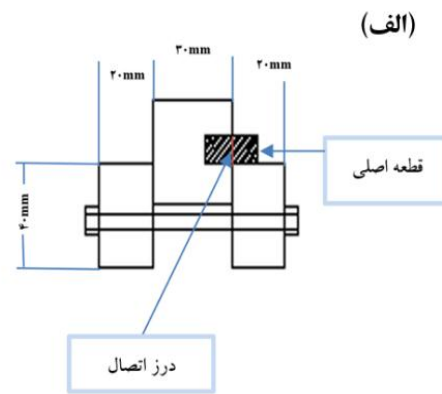
دمای ذوب پایین در فصل مشترک اتصال ایجاد می‌شود [۹-۱۱]. این روش برای اتصال آلیاژهای آلومینیم استفاده شده است که در این موارد لایه واسطه از جنس مس (Cu)، نقره (Ag) و یا روی (Zn) بوده است. البته لازم به ذکر است که فاز مایع (مذاب) در فصل مشترک اتصال را نیز می‌توان با قرار دادن یک لایه واسطه که دمای ذوب کمتری از دمای اتصال داشته باشد، ایجاد نمود؛ مثلاً می‌توان از لایه‌ای با ترکیب اولیه مناسب مثل ترکیب یوتکتیک استفاده نمود که با قرارگیری در دمای اتصال، خود به خود ذوب می‌شود [۱۲].

در زمینه اتصال کامپوزیت‌های آلومینیومی با استفاده از فرایند اتصال مایع گذرا تحقیقات محدودی صورت گرفته است [۱۳-۱۷]. سیدین و همکاران^۵ [۱۳] قابلیت اتصال نانو کامپوزیت زمینه آلومینیومی حاوی ۱۰ درصد وزنی آلومینای نانومتری، تولید شده به روش آسیاب کاری مکانیکی و پرس گرم به روش فاز مایع گذرا در دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان‌های متفاوت مورد بررسی قرار داده‌اند. سپس با بررسی ریزساختاری و اندازه‌گیری استحکام برشی اتصالات، مشاهده کردند که در زمان اتصال ۶۰ دقیقه انجماد هم‌دما کامل شده و استحکام اتصالات به بیشترین مقدار خود رسیده است. گرت و کوک [۱۶] اتصال نانو کامپوزیت $Al - 20.3 - Al$ تقویت شده با ذرات نانو آلومینا، با لایه واسطه مس را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق هم مس به عنوان لایه واسطه جهت اتصال استفاده شد. فرایند اتصال در دمای ۵۵۰ تا ۶۱۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه انجام شده است. در دمای اتصال ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش زمان اتصال، استحکام اتصال‌ها به دلیل کاهش ساختارهای ترد یوتکتیکی افزایش می‌یابد طوری که حداکثر استحکام برشی در همین دما و زمان اتصال ۶۰ دقیقه و در حدود ۸۵ درصد استحکام برشی فلز پایه به دست آمده است. عزیزی و همکاران [۱۷] اتصال فاز مایع گذرا را برای آلیاژ $Al - 5.83$ با استفاده از لایه واسطه مس به صورت پوشش با ضخامت حدود ۲۰ میکرومتر بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش دمای اتصال تا ۶۳۰ درجه سانتی‌گراد

آزمون فشار HOUNSFIELD، مدل H50KS جهت اندازه‌گیری استحکام برشی نمونه‌های اتصال استفاده شد. جهت قرار گرفتن نمونه‌ها در دستگاه آزمون فشار، ابتدا نگهدارنده مخصوصی از جنس فولاد ساختمانی ST37 که در شکل (۱) نشان داده شده است طراحی و ساخته شد که قطعه اتصال داده شده داخل آن قرار می‌گیرد و توسط دستگاه آزمون فشار تحت نیرو با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفت. این نیرو به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری و ثبت شد.



استفاده شد. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر ساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل QUANTA FEG 450 ساخت شرکت FEI استفاده شد. برای بررسی ترکیب شیمیایی و عناصر موجود در قسمت‌های مختلف اتصال از آنالیز طیف‌سنجی پراش پرتوی ایکس (EDS) استفاده شد. از دستگاه ریز سختی سنج ساخت شرکت BUEHLER جهت بررسی تغییرات سختی در اطراف درز اتصال استفاده شد. بار وارد شده توسط دستگاه ۵۰ گرم و مدت زمان اعمال نیرو بر قطعه ۱۰ ثانیه برای هر آزمون انجام شد. از دستگاه



شکل (۱): (الف) نگهدارنده مخصوص جهت اندازه‌گیری استحکام برشی قطعات اتصال، (ب) نمای دیگر از نگهدارنده.

اتصال، در محل تماس لایه واسطه و فلز پایه نفوذ اتم‌های مس به سمت فلز پایه و اتم‌های آلومینیم به سمت لایه واسطه صورت می‌گیرد. نفوذ بیشتر اتم‌های مس از لایه واسطه به داخل فلز پایه و اتم‌های آلومینیم از فلز پایه به داخل لایه واسطه باعث می‌شود که غلظت سطح تماس این دو ناحیه مطابق دیاگرام فاز آلومینیم-مس در شکل ۶ به منطقه دو فاز $\alpha+L$ و $L+\beta$ وارد شود و بنابراین مذابی بین لایه واسطه و فلز پایه ایجاد می‌شود. با تشکیل لایه مذاب بین لایه واسطه و فلز پایه، نفوذ متقابل اتم‌ها بهتر صورت می‌گیرد. در دمای زیر ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل ناکافی بودن حجم مذاب تشکیل شده در درز اتصال، استحکام اتصال کم است. حتی در دمای ۵۶۰ درجه سانتی‌گراد استحکام آن‌قدر پایین است که در هنگام خارج کردن قطعه از کوره، نمونه‌ها از همدیگر جدا شدند و با توجه به سطح اتصال آن‌ها دیده شد که تنها چند نقطه اتصال ضعیف ایجاد شده است. اگر زمان

۳- نتایج و بحث

بعد از انجام اتصال در دماها و زمان ذکر شده در بخش قبل، از ۹ اتصال انجام شده، ۴ اتصال قابل قبول است. در جدول (۱) شرایط دمایی و زمانی اتصال‌های قابل قبول نشان داده شده است.

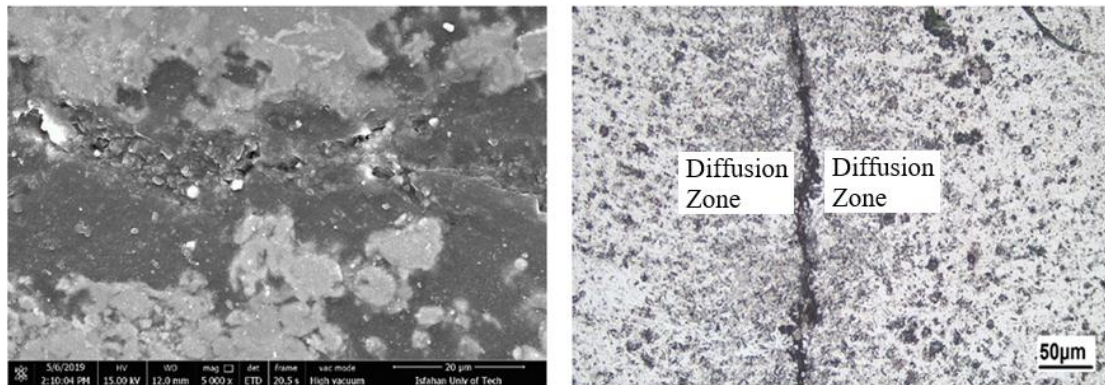
جدول (۱): شرایط دمایی و زمانی اتصال نمونه‌ها

شماره نمونه	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (دقیقه)	کد نمونه
۱	۵۸۰	۴۰	580T40M
۲	۵۸۰	۶۰	580T60M
۳	۶۰۰	۲۰	600T20M
۴	۶۰۰	۴۰	600T40M

در شکل‌های (۲) تا (۵) تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی مربوط به درز اتصال در دماها و زمان‌های مختلف نشان داده شده است. در اثر قرار گرفتن نمونه در دمای

شکل‌های (۴) و (۵) اتصال در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ دقیقه را نشان می‌دهد. با افزایش دمای اتصال، مذاب بهتر نفوذ کرده است و در ضمن پستی‌وبلندی‌های سطوح اتصال کمتر شده است و حفرات بیشتری از فلز پایه و درز اتصال از مذاب پر شده‌اند. در نتیجه اتصال بهتر انجام شده و استحکام اتصال بالاتر شد و همچنین در آزمون سختی سنجی نمونه اتصال یافته در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت‌زمان ۲۰ و ۴۰ دقیقه، سختی درز اتصال و اطراف درز اتصال به علت ایجاد ذرات رسوب مس بیشتر، بالاتر از نمونه‌های اتصال یافته در دماهای پایین‌تر است. شایان‌ذکر است که در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش زمان بیش از ۴۰ دقیقه، باعث خمیری شکل شدن قطعه و تغییر فرم نمونه‌های اتصال شد.

لازم جهت نفوذ کامل در اختیار باشد، به دلیل نفوذ خوب مذاب به فلز پایه، اتصال به‌خوبی انجام می‌شود و اگر زمان اتصال کوتاه‌تر از زمان موردنیاز باشد، مذاب ایجاد شده به‌خوبی در فلز پایه نفوذ نکرده و استحکام اتصال ضعیف می‌شود. با توجه به شکل (۲) که تصویر اتصال در دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۰ دقیقه را نشان می‌دهد، به دلیل زمان کم اتصال حجم مذاب ایجاد شده کم است و باعث می‌شود که مس کمتر بتواند در فلز پایه نفوذ کند و همچنین زمان لازم برای حذف پستی‌وبلندی‌های درز اتصال وجود ندارد و مذاب به‌خوبی نمی‌تواند آن‌ها را پر کند که باعث ایجاد حفره یا فضای خالی در درز اتصال می‌شود. به همین دلیل در این دما استحکام اتصال کمتر از اتصال در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. برای ایجاد اتصال بهتر و نفوذ بیشتر لایه واسطه نیاز به افزایش زمان با بالا بردن دما است.

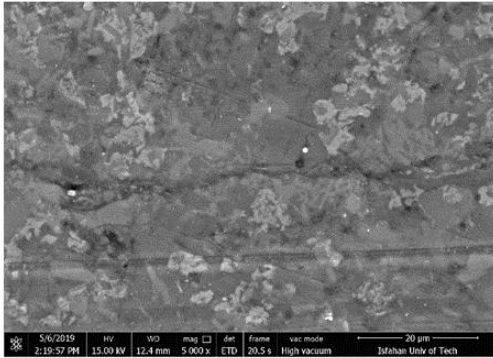


Isothermal Solidification Zone

(ب)

(الف)

شکل (۲): تصاویر الف) میکروسکوپ نوری وب) الکترونی روبشی درز اتصال نمونه 580T40M.

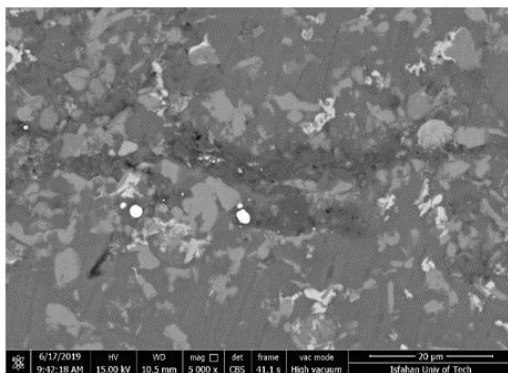


(ب)



(الف)

شکل (۳): تصاویر الف) میکروسکوپ نوری و ب) الکترونی روبشی درز اتصال نمونه 580T60M.

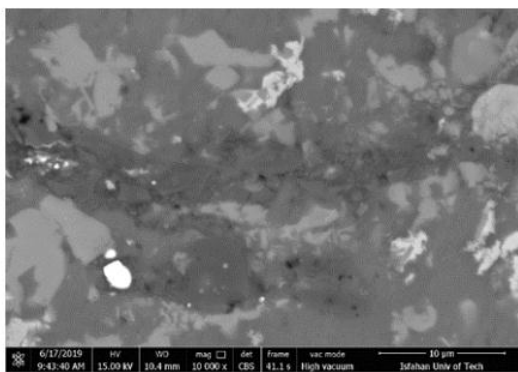


(ب)

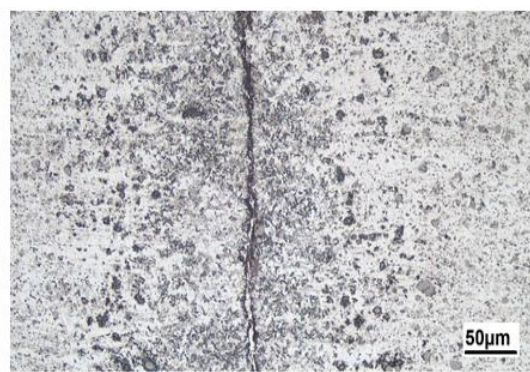


(الف)

شکل (۴): تصاویر الف) میکروسکوپ نوری و ب) الکترونی روبشی درز اتصال نمونه 600T20M.



(ب)



(الف)

شکل (۵): تصاویر الف) میکروسکوپ نوری و ب) الکترونی روبشی درز اتصال نمونه 600T40M.

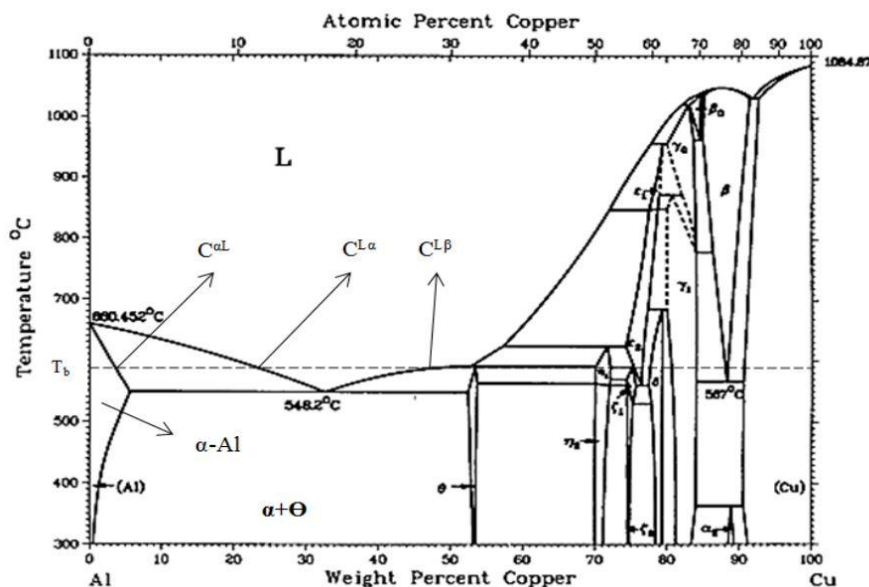
در مناطقی که تماس مستقیم بین فلز پایه و میان لایه وجود دارد رخ می‌دهد، با پیشرفت نفوذ در درز اتصال، ترکیب شیمیایی فلز پایه به C^{Al} در دیاگرام فاز Al-Cu نشان داده

هنگام اتصال فلزات بر پایه آلومینیوم توسط لایه میانی مس، اتم‌های مس از میان لایه به طرف فلز پایه و اتم‌های آلومینیوم از فلز پایه به سمت میان لایه مس نفوذ می‌کند. نفوذ اتم‌ها

دیاگرام فاز شکل (۶) استحاله یوتکتیک^۸ رخ داده و از آنجایی که ایجاد ساختار یوتکتیک باعث کاهش استحکام اتصال می‌شود، باید زمان اتصال به گونه‌ای انتخاب شود که انجماد به صورت هم‌دما صورت گیرد [۱۹].

در تصویر شکل (۷) نمونه اتصال داده شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۰ دقیقه مشاهده می‌شود. مناطقی که با رنگ تیره‌تر در درز اتصال و اطراف درز اتصال نسبت به فلز پایه دیده می‌شود، لایه مذابی است که در زمان اتصال و مرحله‌ی انجماد هم‌دمای مذاب، ایجاد شده است. مذاب ایجاد شده در درز اتصال به درون فلز پایه نفوذ کرده و با گذشت زمان به صورت هم‌دما منجمد شده است. این فاز جامد، آلیاژ آلومینیم همراه مقداری مس است که مقدار این مس بستگی به دما و زمان اتصال دارد. همچنین در این تصویر ناهماهنگی و تشکیل فازهای یوتکتیک دیده نمی‌شود، یعنی انجماد هم‌دما در این دما و زمان به طور کامل انجام شده است. این نتایج با تحقیقات انجام شده در مراجع [۲۰-۲۲] در تطابق است.

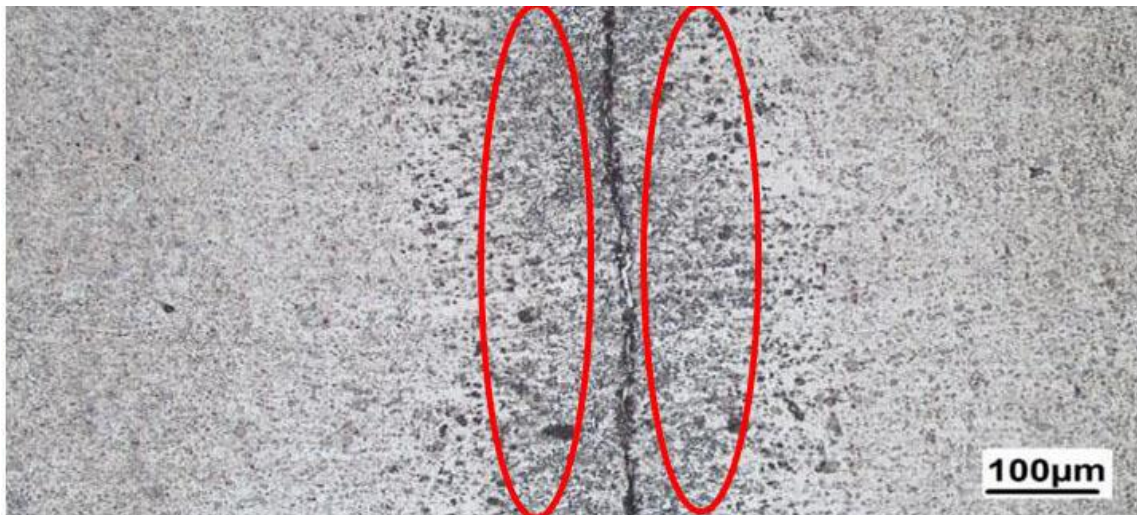
شده در شکل (۶) می‌رسد. با نفوذ بیشتر مس در فلز پایه ترکیب شیمیایی درز اتصال بیشتر از C^{Al} شده و در این مناطق ذوب رخ می‌دهد. در نتیجه لایه مذابی بین فلز پایه ایجاد می‌شود و این لایه مذاب به تدریج گسترش می‌یابد. پس از انحلال کامل میان لایه مس در درز اتصال، مذاب دارای ترکیب شیمیایی بین C^{La} و C^{Lβ} خواهد شد که این عامل باعث نفوذ اتم‌های مس از مذاب به فلز پایه می‌شود. از آنجایی که دمای اتصال ثابت است نفوذ اتم‌های مس در فلز پایه باعث ایجاد تحت انجماد می‌شود در نتیجه مذاب بر روی سطح فلز پایه شروع به جوانه‌زنی می‌کند. به دلیل اینکه مذاب بدون سرد شدن منجمد می‌شود به این انجماد، انجماد هم‌دما می‌گویند. از آنجایی که ادامه انجماد هم‌دما مستلزم نفوذ بیشتر اتم‌های مس است و با ایجاد فاز جامد نفوذ اتم‌ها به کندی صورت می‌گیرد، بنابراین مرحله انجماد هم‌دما زمان بر خواهد بود، در صورتی که زمان اتصال به اندازه کافی باشد مذاب کاملاً به صورت هم‌دما منجمد می‌شود و در غیر این صورت مذاب باقیمانده به صورت معمولی و در اثر سرد شدن منجمد می‌شود، با سرد شدن مذاب باقیمانده مطابق



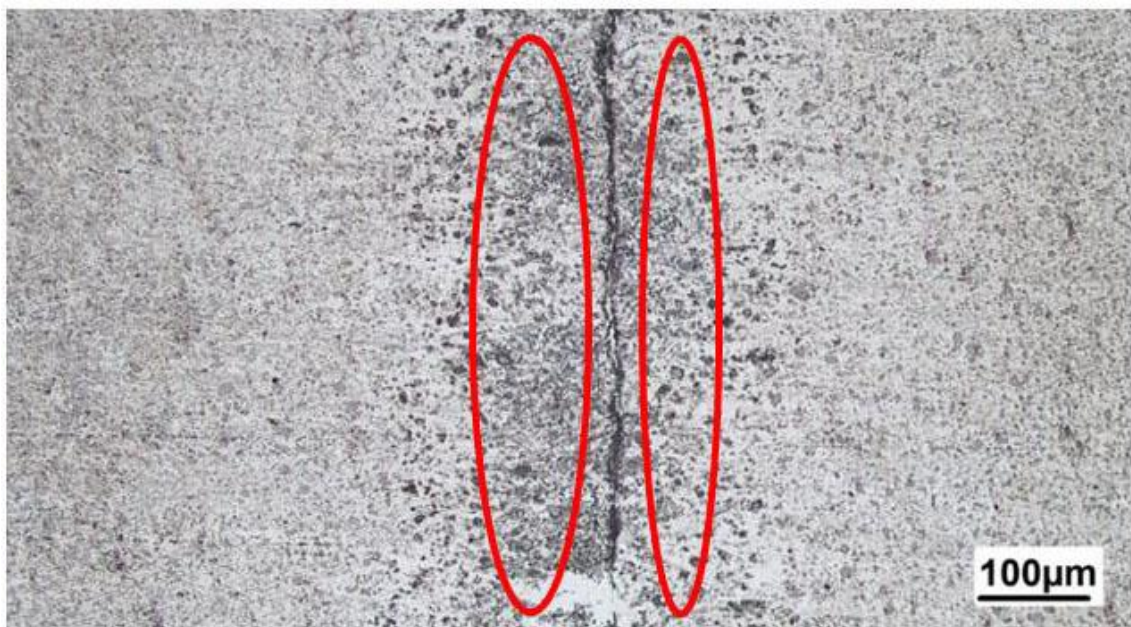
شکل (۶): دیاگرام فازی آلومینیم-مس [۱۹].

پایه کمتر از اتصال ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است که به دلیل دمای کم اتصال حجم مذاب ایجاد شده کم است و باعث می‌شود که مس کمتر بتواند در فلز پایه نفوذ کند.

در تصویر شکل (۸)، نمونه اتصال داده شده در دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه دیده می‌شود. نقاط نشان داده شده در این تصویر نشان می‌دهد که نفوذ مس در فلز



شکل (۷): تصویر میکروسکوپ نوری از درز اتصال و اطراف آن در نمونه 600T40M.



شکل (۸): تصویر میکروسکوپ نوری از درز اتصال و اطراف آن در نمونه 580T60M.

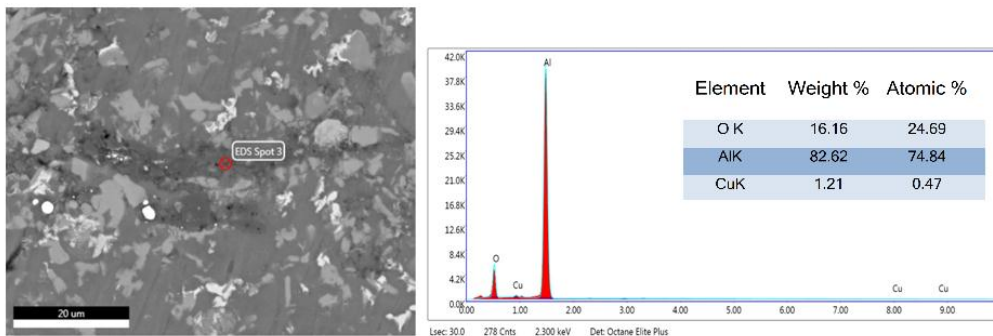
سانتی گراد، در هیچ کدام از زمان‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه، اتصال برقرار نشد و به محض خارج کردن نمونه از کوره اتصال جدا شد که احتمالاً به علت کم بودن حجم مذاب ایجاد شده در درز اتصال است. اگرچه با افزایش دمای اتصال به ۵۸۰ درجه سانتی گراد، حجم مذاب بیشتری در درز اتصال ایجاد می‌شود ولی همچنان مشاهده می‌شود که در زمان‌های اتصال ۲۰ و ۴۰ دقیقه، در این دما نیز اتصال‌های ضعیفی ایجاد شده است ولی باز هم به حد کافی نبوده است و در آزمون استحکام برشی، استحکام کمی دارند. با افزایش زمان اتصال به ۶۰ دقیقه در دمای اتصال ۵۸۰

در شکل‌های (۹) تا (۱۱) آنالیز یک نقطه روی درز اتصال و یک نقطه به فاصله ۵۰ میکرون از درز اتصال و یک نقطه به فاصله ۱۰۰ میکرون از درز اتصال در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد و زمان ۴۰ دقیقه مشاهده می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله از درز اتصال درصد وزنی مس افزایش یافته است. این مطلب نشان می‌دهد که لایه واسطه مس به فلز پایه نفوذ کرده است.

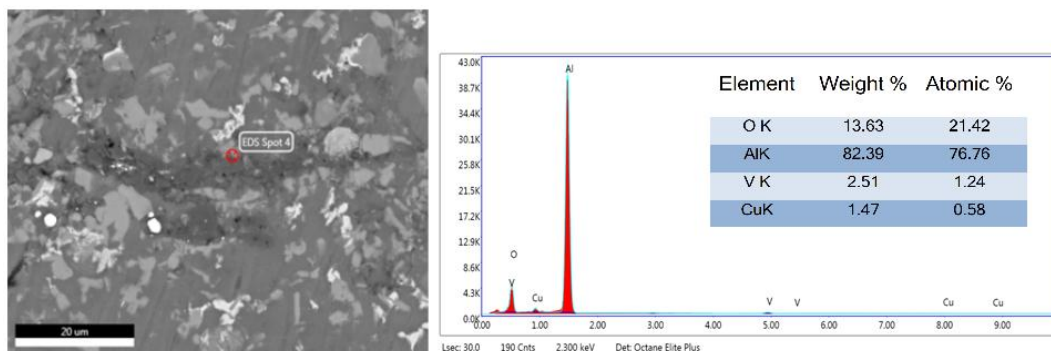
شکل (۱۲) استحکام برشی اتصال‌ها در دماهای ۵۸۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که در دمای اتصال ۵۶۰ درجه‌ی

درز اتصال که در شکل (۳)، ارائه شده به وضوح مشخص است. در نتیجه در دمای اتصال ۶۰۰ درجه سانتی گراد، استحکام اتصال‌ها از اتصال‌های انجام شده در دمای ۵۶۰ و ۵۸۰، بالاتر بود و با افزایش زمان اتصال، استحکام اتصال‌ها زیادت‌ر شده است. در اتصال‌های انجام شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد، در زمان ۴۰ دقیقه استحکام برشی بالایی به دست آمد.

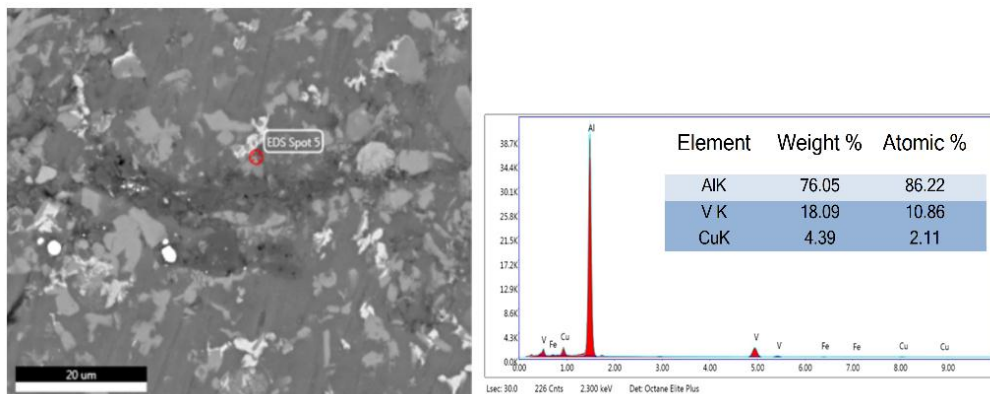
درجه‌ی سانتی گراد، استحکام اتصال‌ها قدری بالاتر می‌رود که احتمالاً به دلیل افزایش مذاب ایجاد شده در درز اتصال است. در دمای اتصال ۶۰۰ درجه سانتی گراد، دیده می‌شود که با افزایش زمان اتصال از ۲۰ به ۴۰ دقیقه، افزایش خوبی در استحکام اتصال‌ها نمودار می‌شود؛ زیرا با افزایش دمای اتصال از ۵۸۰ به ۶۰۰ درجه سانتی گراد، حجم مذاب ایجاد شده به قدر کافی بوده است که کلیه‌ی سطوح اتصال را به خوبی پر کند، این موضوع از تصاویر مربوط به



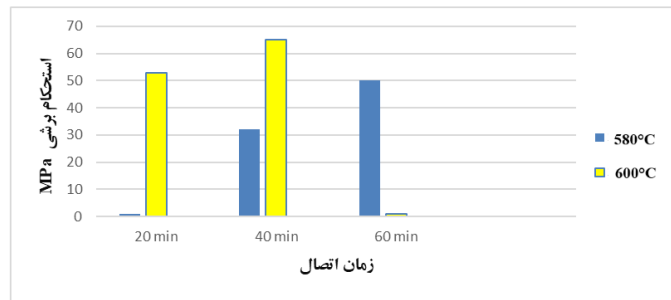
شکل (۹): آنالیز عنصری در منطقه درز اتصال نمونه 600T40M.



شکل (۱۰): آنالیز عنصری مس، آلومینیم و اکسیژن در فاصله ۵۰ میکرون بالای درز اتصال نمونه 600T40M.



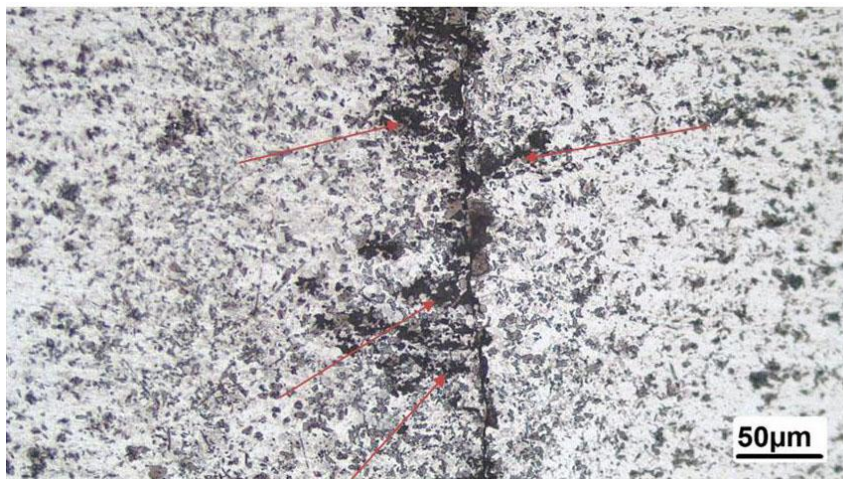
شکل (۱۱): آنالیز عنصری مس، آلومینیم و اکسیژن در فاصله ۱۰۰ میکرون بالای درز اتصال نمونه 600T40M.



شکل (۱۲): نمودار استحکام برشی اتصالات در شرایط مختلف اتصال.

زیادتری (با فلش نشان داده شده است) نسبت به اتصالات انجام شده در زمان‌های ۲۰ و ۴۰ دقیقه وجود دارد که دلیل پایین تر شدن استحکام درز اتصال شده است. تشکیل میکرو ترک‌ها می‌تواند به دلیل تشکیل و توزیع غیر همگن ترکیبات بین فلزی در درز اتصال باشد [۲۱].

هنگامی که زمان اتصال از ۴۰ دقیقه به ۶۰ دقیقه افزایش یافت، مشاهده شد که قطعه حالت خمیری پیدا کرد و قطعه دچار تغییر شکل شد. با توجه به شکل (۱۳) در اتصال انجام شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه مشاهده می‌شود که درز اتصال، میکرو ترک‌های

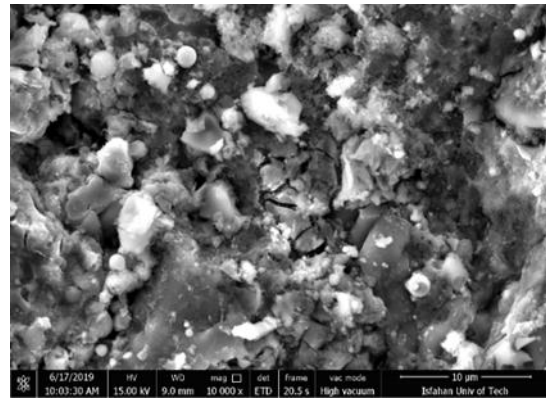


شکل (۱۳): نمایی از میکرو ترک‌های درز اتصال در نمونه 600T60M.

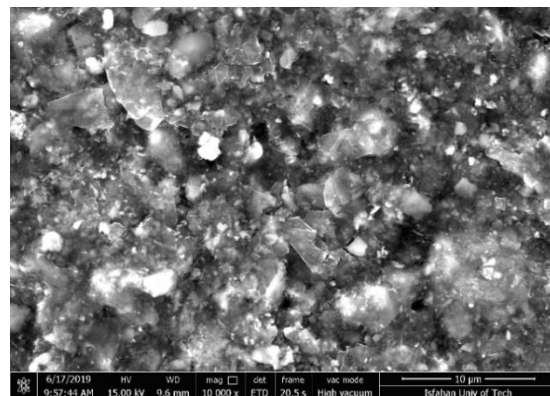
از مقدار به دست آمده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد. تصویر (۱۴) قسمت (ب) سطح شکست اتصال انجام شده در منطقه درز اتصال در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه را نشان می‌دهد. با توجه به این تصویر مشاهده می‌شود که پستی و بلندی‌های ناشی از حفراتی که در شکست اتصال در دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شود کمتر است. به دلیل اینکه در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حجم مذاب ایجاد شده به اندازه کافی بوده و بهتر می‌تواند در درز اتصال نفوذ کند حفرات بین درز اتصال کمتر شده و استحکام برشی آن نیز بیشتر می‌شود.

بعد از آزمون استحکام برشی نمونه‌ها، تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست منطقه درز اتصال جهت بررسی، تهیه شد. تصویر (۱۴) قسمت (الف) سطح شکست اتصال انجام شده در منطقه درز اتصال در دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه را نشان می‌دهد. با توجه به پستی و بلندی‌های موجود در سطح شکست، احتمال می‌رود که در دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد، دما به اندازه کافی جهت ایجاد حجم مذاب وجود ندارد و حجم کم مذاب به خوبی نمی‌تواند تمام پستی و بلندی‌های سطح را پر کند. کم بودن مذاب به دلیل پایین بودن دمای اتصال، موجب شده که اتصال به خوبی برقرار نشود و از استحکام برشی نمونه کمتر

جهت بررسی سختی درز اتصال و اطراف آن ۱۱ نقطه توسط دستگاه ریز سختی سنج با فاصله ۲۰۰ میکرومتر انجام شد. با توجه به اعداد به دست آمده نمودار سختی هر اتصال بر حسب دما و زمان اتصال به دست آمد. نمودارهای به دست آمده در شکل (۱۵) نشان داده شده است. با توجه به نمودارها، مشاهده می شود که تغییرات سختی در اطراف درز اتصال سختی نسبت به فلز پایه بیشتر شده است. به دلیل اینکه مذاب به درون فلز پایه نفوذ کرده است و پس از انجماد مذاب باعث بالا رفتن سختی اطراف درز اتصال می شود. در بررسی سختی فلز پایه چند نقطه متفاوت از فلز پایه ریز سختی شد و اعداد به دست آمده بین ۵۴ تا ۹۸ ویکرز را نشان می داد که به صورت پراکنده بودند و دلیل این امر حضور دانه های ریز و پراکنده شدن ذرات آلومیناید و انادیوم در فلز پایه است که در پراکنده گی اعداد سختی مؤثر است.

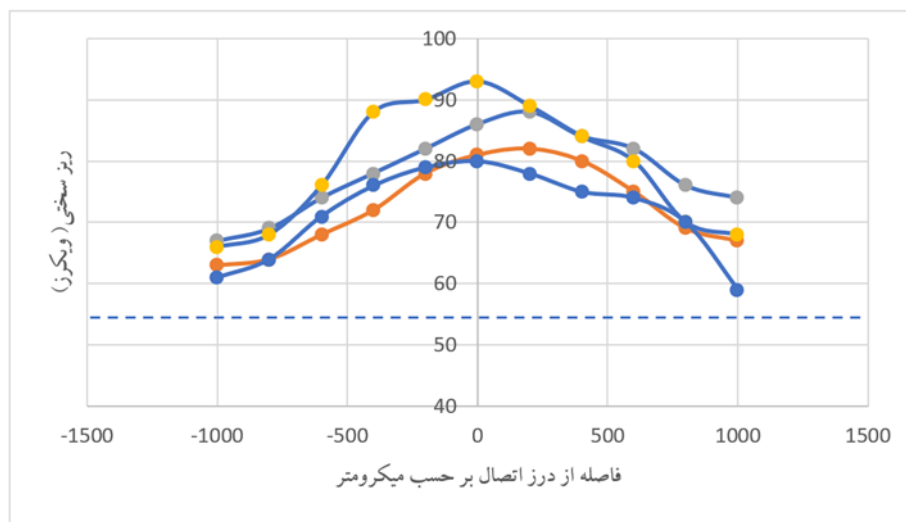


الف



ب

شکل (۱۴): سطوح شکست اتصال های انجام شده: الف) نمونه 580T60M و ب) نمونه 600T40M.



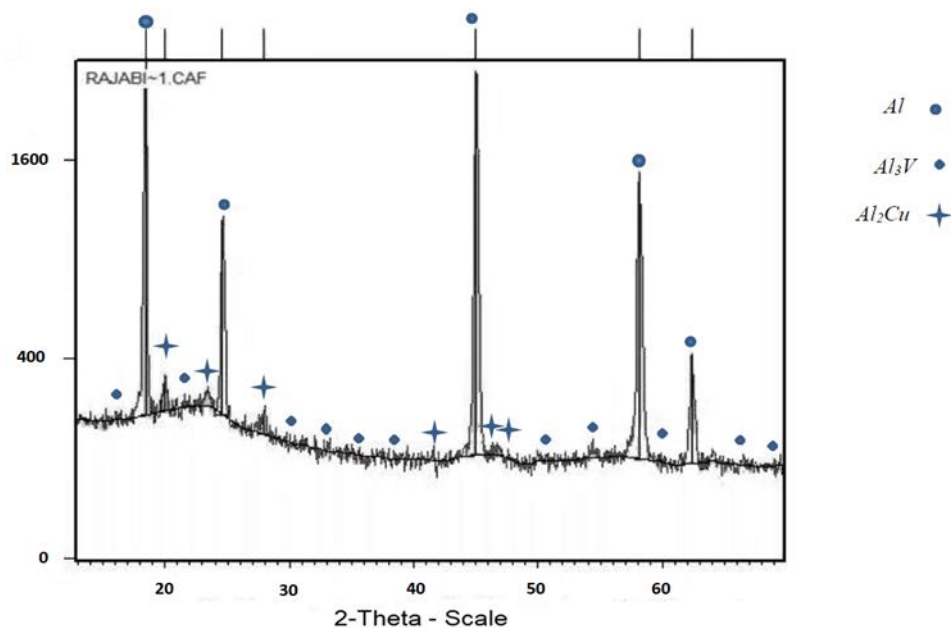
شکل (۱۵): تغییرات ریز سختی در فواصل مختلف از درز اتصال در دماها و زمان های مختلف آزمایش. ۵۸۰ درجه سانتی گراد در زمان ۴۰ دقیقه (●) ۵۸۰ درجه سانتی گراد در زمان ۶۰ دقیقه (●) ۶۰۰ درجه سانتی گراد در زمان ۲۰ دقیقه (●) ۶۰۰ درجه سانتی گراد در زمان ۴۰ دقیقه (●)

ایجاد رسوب کمتر ذرات Al₂Cu در اطراف درز اتصال است که باعث کم شدن سختی اطراف درز اتصال می‌شود. افزایش زمان اتصال در دمای بالا باعث می‌شود مقدار بیشتری از فلز پایه ذوب شود بنابراین غلظت مس لایه واسطه در آن کمتر خواهد شد. کاهش غلظت مس در درز اتصال باعث می‌شود که پس از پایان انجماد ذرات رسوبی Al₂Cu کمتری در این ناحیه وجود داشته باشد [۲۳].

در شکل (۱۶) الگوی پراش پرتویکس که بر روی درز اتصال در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۰ دقیقه انجام شده است را نشان می‌دهد. با توجه به الگوی پراش پرتویکس، فازهای موجود آلومینیوم فلز پایه و فاز Al₃V که در ساختار فلز پایه در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی و اکستروژن گرم ایجاد شده بود، به وضوح قابل تشخیص است. همچنین ذرات رسوبی Al₂Cu که حاصل از ترکیب مقدار مس بیشتر از حد حلالیت در آلومینیوم فلز پایه است، در فازهای موجود شناسایی شد.

در نمودارهای سختی حداقل سختی فلز پایه با خطچین مشخص داده شده است تا بتوان سختی در اطراف درز اتصال را با فلز پایه قبل اتصال مقایسه کرده نتایج نشان می‌دهد که سختی اطراف درز اتصال از حداقل سختی فلز پایه بیشتر است؛ که علت آن را می‌توان به نفوذ مس در فلز پایه و رسوب ذرات Al₂Cu (با توجه به فازبندی در XRD) پس از انجماد دانست.

تغییرات سختی اطراف درز اتصال به دمای اتصال و زمان اتصال بستگی دارد. همان‌طور که در نمودارها نشان داده شده است، سختی اتصال‌ها در دماها و زمان‌های مختلف نزدیک به یکدیگر است و اختلاف چندانی ندارد. در دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد سختی کمتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است که دلیل آن حجم کافی مذاب و پر کردن تمامی پستی‌وبلندی‌های درز اتصال و نفوذ بهتر لایه واسطه مس به فلز پایه در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است؛ اما سختی اطراف درز اتصال در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۰ دقیقه کمتر از زمان ۲۰ دقیقه است که احتمالاً دلیل آن



شکل (۱۶): الگوی پراش پرتویکس انجام شده روی درز اتصال نمونه 600T40M.

۴- نتیجه گیری

Al_2Cu که حاصل از ترکیب مقدار مس بیشتر از حد حلالیت در آلومینیوم فلز پایه است، شناسایی شد.

در این پژوهش اتصال قطعات نانو کامپوزیت $Al-Al_3V$ با روش اتصال نفوذی TLP در شرایط متفاوت دمایی و زمانی مورد بررسی قرار گرفت. مهم ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- بررسی نمونه های اتصال داده شده نشان داد که امکان ایجاد اتصال در دمای ۵۸۰ درجه سانتی گراد در زمان های ۴۰ و ۶۰ دقیقه و در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد در زمان های ۲۰ و ۴۰ دقیقه وجود دارد.

۲- طبق بررسی های ریزساختاری، در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد در زمان های ۲۰ و ۴۰ دقیقه میزان نفوذ بهتری مشاهده شد.

۳- با افزایش دمای اتصال، حجم مذاب ایجاد شده در درز اتصال بیشتر شده و لذا سطح وسیع تری از درز اتصال توسط مذاب پر می شود. بنابراین پستی و بلندی های سطح اتصال کمتر شده و نفوذ بهتری در فلز پایه دیده شد و استحکام اتصال بیشتر شد.

۴- با توجه به تصاویر SEM نفوذ مس در آلومینیوم زمینه در دمای ۵۸۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد بهتر انجام شده است.

۵- دما و زمان اتصال بر روی استحکام برشی نمونه های اتصال یافته تأثیر دارد. در دمای ثابت، با افزایش زمان اتصال، استحکام اتصال ها، افزایش یافت. حداکثر استحکام برشی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد و زمان اتصال ۴۰ دقیقه به دست آمد.

۶- با توجه به نمودارهای سختی سنجی به دست آمده بیشترین میزان سختی در فصل مشترک اتصال دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد در زمان ۲۰ دقیقه می باشد که دلیل آن نفوذ مس و ذرات رسوبی بیشتر در اطراف محل درز اتصال است.

۷- با توجه به الگوی پراش پرتو ایکس که بر روی درز اتصال در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد و زمان ۴۰ دقیقه انجام شده است، فازهای موجود آلومینیوم فلز پایه و فاز Al_3V که در ساختار فلز پایه در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی و اکستروژن گرم ایجاد شده بود، و همچنین ذرات رسوبی

۵- مراجع

[1] Z. Yang, Y. Shen, X. Li & Q. Meng., "Transient liquid phase bonding between tungsten and stainless steel", Journal of Nonferrous Metals Society of China, vol. 22, pp. 2783-2789, 2012.

[2] R. Blondeau, Ed. "Metallurgy and mechanics of welding". John Wiley & Sons, 2013.

[3] C. R. Hammond, "The Elements, in Handbook of Chemistry and Physics" (81st ed.), 2004.

[4] M. Ghosh, K. Bhanumurthy, G. B. Kale, J. Krishnan & S. Chatterjee, "Diffusion bonding of titanium to 304 stainless steel", Journal of Nuclear Materials, vol. 322, pp. 235-241, 2003.

[5] X. Y. Gu, D. Q. Sun, L. Liu & Z. Z. Duan, "Microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonded TiCP/AZ91D joints using copper interlayer", Journal of Alloys and Compounds, vol. 476, pp. 492-499, 2009.

[6] S. Kundu & S. Chatterjee, "Characterization of diffusion bonded joint between titanium and 304 stainless steel using a Ni interlayer", Materials Characterization, vol. 59, pp. 631-637, 2008.

[7] D. Navaei, X. R. Wang, M. S. Tillack & S. Malang, "Elastic-plastic analysis of the steel-to-tungsten transition joint for a high performance divertor", Fusion Engineering and Design, vol. 88, pp. 361-367, 2013.

[8] Z. Zhong, H. Jung, T. Hinoki & A. Kohyama, "Effect of joining temperature on the microstructure and strength of tungsten/ferritic steel joints diffusion bonded with a nickel interlayer", Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, pp. 1805-1810, 2010.

[9] M. Muratoglu, O. Yilmaz & M. Aksoy, "Investigation on diffusion bonding characteristics of aluminum metal matrix composites (Al/SiCp) with pure aluminum for different heat treatments", Journal of materials processing technology, vol. 7, pp. 178-211, 2006.

پنجمین کنفرانس بین‌المللی انجمن مهندسی مواد و متالورژی و انجمن علمی ریخته‌گری ایران، شیراز، دانشگاه شیراز، ۱۳۹۵.

[18] S. Z. Anvari, F. Karimzadeh & M. H. Enayati, "Synthesis and characterisation of nanostructured Al-Al₃V and Al-(Al₃V-Al₂O₃) composites by powder metallurgy", *Materials science and Technology*, vol. 34, no. 2, pp. 1-12, 2017.

[19] H. Nami, A. Halvae, H. Adgi & A. Hadian, "Transient liquid phase diffusion bonding of Al/Mg₂Si metal matrix composite", *Materials and Design*, vol. 32, pp. 3957-3965, 2011.

[20] A. A. Shirzadi & E. R. Wallach, "New approaches for transient liquid phase diffusion bonding of aluminium based metal-matrix composites", *J Mater Sci Technol*, vol. 13, pp. 135-42, 1997.

[21] K. Liu, Y. Li, C. Xia & J. Wang, "Microstructural evolution and properties of TLP diffusion bonding super-Ni/NiCr laminated composite to Ti-6Al-4V alloy with Cu interlayer", *Materials and Design*, vol. 135, pp. 184-196, 2017.

[22] M. Ghayoor & A. M. Hadian, "On the Role of Bonding Time on Microstructure and Mechanical Properties of TLP Bonded Al/Mg₂Si Composite", *J. Compos. Sci*, vol.3, pp. 66, 2019.

[23] X. P. Zhang, Y. W. May, G. F. Quan & W. Way, "Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites (Al/SiCMMC)", *Composites A*, vol. 30, pp. 1415-1421, 1999.

۶- پی‌نوشت

- [1] Diffusion Bonding
- [2] Interdiffusion
- [3] Isothermal Solidification
- [4] Interlayer
- [5] Sayyedain et al
- [6] Grant & Cook
- [7] Hot Extrusion
- [8] Eutectic Transformation

[۱۰] م. خاکیان قمی، م. سعید شهریاری و س. ناطق، "تأثیر زمان اتصال بر ریزساختار و تکمیل انجماد ایزوترم در خلال اتصال TLP سوپر آلیاژهای پایه نیکل غیرمشابه IN738LC و Nimonic 75"، *فراآیندهای نوین در مهندسی مواد*، سال ۱۵، شماره ۲، صفحه ۱۳-۲۵، ۱۴۰۰.

[۱۱] م. رجیبی و ر. بختیاری، "ساخت و مشخصه‌یابی نوار و پودر آلیاژ آمورف MBF-100 بکار رفته در اتصال TLP سوپرآلیاژ-FSX-414"، *فراآیندهای نوین در مهندسی مواد*، سال ۱۲، شماره ۱، صفحه ۵۹-۷۲، ۱۳۹۷.

[12] S. S. Sayyedain, H. R. Salimijazi, M. R. Toroghinejad & F. Karimzadeh, "Microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonding of Al₂O₃ /Al nanocomposite using copper interlayer", *Materials and Design*, vol. 53, pp. 275-282, 2014.

[13] S. S. Sayyedain, M. R. Toroghinejad & F. Karimzadeh, "Joining of Al/Al₂O₃ nanocomposite by Transient Liquid Phase Diffusion Bonding", *Conference Paper December*, 2011.

[14] M. Yarahmadi, M. Shamanian, H. R. Salimijazi, "Study of Microstructure and Mechanical Properties of Transient Liquid Phase bonded of Al/Al₂O₃", *Materials Science and Engineering*, Vol. 1396, 2014.

[15] G. Zhang, J. Zhang, Y. Pei, S. Li & D. Chai, "Joining of Al₂O₃p/Al composites by transient liquid phase (TLP) bonding and a novel process of active-transient liquid phase (A-TLP) bonding", *Materials Science and Engineering A*, vol. 488, pp. 146-156, 2008.

[16] O. Grant & C. D. Cook, "Overview of Transient Liquid Phase and Partial Transient Liquid Phase bonding", *Sorensen Springer Science*, Vol. 245, pp. 25-34, 2011.

[۱۷] م. عزیزی و ر. بختیاری، "اتصال فاز مایع گذرا (TLP) برای آلیاژ Al5083 با استفاده از لایه واسط مس"، *دهمین همایش مشترک و*