

بررسی تاثیر نوع تمپر حرارتی آلومینیوم بر خواص ریزساختاری و مکانیکی اتصال نفوذی آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱ و منیزیم AZ31

مجتبی جعفریان^{*}، علیرضا خدابنده^۲، مرتضی جعفریان^۱

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*Jafarian_67@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۲۵)

چکیده

در این پژوهش، به بررسی تاثیر نوع تمپر حرارتی آلیاژ آلومینیوم بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات نفوذی آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱ (T6,O) و منیزیم AZ31 (O) پرداخته شد. فصل مشترک اتصالات توسط میکروسکوپ‌های نوری (OM) و الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیزهای نقطه‌ای (EDS) و خطی (linescan) بررسی شدند. خواص مکانیکی اتصال‌ها با استفاده از آزمون‌های میکروسختی و بکرز و استحکام برشی اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج، در اتصال AZ31-O/Mg AZ31 تغییر فرم پلاستیک کمتر در آلیاژ منیزیم، نرخ نفوذ بیشتر اتم‌های منیزیم به سمت آلیاژ آلومینیوم و تشکیل ناحیه نفوذ با کمترین میزان میکروسختی (HV ۱۴۰) و بیشترین مقدار استحکام برشی (۳۲ MPa) نسبت به اتصال Al 6061-T6/Mg AZ31 رخ داد. بررسی سطوح شکست نشان دهنده وقوع پدیده شکست از فاز ترد Al_3Mg_2 بود.

واژه‌های کلیدی:

آلومینیوم ۶۰۶۱، منیزیم AZ31، نوع تمپر حرارتی، اتصال نفوذی، ریزساختار.

۱- مقدمه

جوشکاری ذوبی این دو آلیاژ از جمله ترک‌های حرارتی، ناخالصی‌های اکسیدی و تشکیل بیش از اندازه ترکیبات ترد بین فلزی توجهات به سمت اتصال این دو آلیاژ با روش‌های حالت جامد گرایش پیدا کرده است [۱-۴]. از جمله مزایای جوشکاری حالت جامد در برابر جوشکاری ذوبی می‌توان به مواردی همچون، ایجاد حداقل اعوجاج و تغییر شکل در فلزات پایه، قابلیت اتصال قطعات نازک و ضخیم، امکان اتصال سطوح

امروزه با توجه کاربرد گسترده آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم در صنایع حمل و نقل هوایی، هوافضا، خودرو، الکترونیک و شیمیایی، اتصال این دو آلیاژ به یکدیگر امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. به طور مثال ساختار مرکب از منیزیم-آلومینیوم در موتورها و اجزای سفینه‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این رابطه روش‌های اتصال ذوبی و حالت جامد جهت اتصال این دو آلیاژ به کار گرفته می‌شود که با توجه به مشکلات فراوان

بزرگ، کامپوزیت‌های پایه فلزی، قطعات ریختگی و محصولاتتی که به روش متالورژی پودر تهیه شده‌اند، تغییرات حرارتی کمتر از جوشکاری ذوبی در نتیجه تغییرات اندک در ساختار میکروسکوپی جوش نسبت به فلز پایه رخ می‌دهد و همچنین بدلیل وجود شیب گرمایی اندک، تنش‌های پسماند بسیار ناچیز می‌باشند [۵-۷]. از جمله روش‌های جوشکاری در حالت جامد که برای اتصال این دو آلیاژ مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌توان به روش‌های جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری انفجاری، جوشکاری با فاز مایع گذرا و جوشکاری نفوذی اشاره نمود. عوامل متعددی در انتخاب روش اتصال‌دهی مواد با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مختلف تاثیرگذار می‌باشند [۸-۱۳]. عدم انتخاب صحیح روش اتصال‌دهی و پارامترهای موثر بر آن مشکلات مختلفی بوجود می‌آورد. اتصال نفوذی در خلاء می‌تواند به طور دقیق درجه حرارت و زمان نگهداری را تنظیم نموده و سپس تشکیل ترکیبات بین‌فلزی را کنترل نماید. در این روش پارامترهایی همچون دمای اتصال، فشار اعمالی، زمان نگهداری و میزان زبری سطح نمونه‌ها نقش اساسی را در تعیین میزان استحکام اتصال ایفا می‌کنند [۱۵-۱۸]. در این فرآیند 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 [۱۸]. در رابطه با اتصال آلیاژهای AZ31 منیزیم و ۶۰۸۲ آلومینیوم دیتریچ و همکاران [۱۹] به بررسی فازهای بین‌فلزی تشکیل شده در حین اتصال پرداختند. طبق نتایج آنها حضور فازهای Al_2Mg_{17} و Al_3Mg_2 در فصل مشترک اتصال با داکتیلتی بسیار کمتر از فلزات پایه مشاهده نموده و نشان دادند شکست به صورت ترد، در فاز Al_3Mg_2 و در نزدیکی آلیاژ

آلومینیوم رخ داده است. فرناندس و همکاران [۲۰] به بررسی اتصال دو آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و منیزیم AZ80 پرداختند. آنها گزارش نمودند اتصالی که در شرایط دمایی $425^{\circ}C$ ، فشار اعمالی ۱۰ MPa و زمان نگهداری ۱۵ min ایجاد شود با توجه به تشکیل لایه نفوذی ضخیم در فصل مشترک دارای بیشترین استحکام برشی به میزان ۵۶ MPa می‌باشد. اما در رابطه با اتصال آلیاژهای AZ31 منیزیم و ۶۰۶۱ آلومینیوم، لیو و همکاران [۲۱] به بررسی اتصال نفوذی این دو آلیاژ با لایه واسط پرداختند. آنها لایه‌های میانی مختلف را از روش غوطه‌وری داغ و غوطه‌ور ساختن نمونه‌ها در حمام‌هایی از روی خالص، Zn-8Al و Zn-5Al ایجاد نموده و نشان دادند که لایه میانی بدست آمده در حمام Zn-5Al، به دلیل تشکیل فصل مشترکی غنی از ذرات آلومینیوم در فاز $MgZn_2$ ، از تردی کمتر و کارایی مکانیکی بهتری برخوردار است. در رابطه با اتصال آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم بدون لایه واسط جینگ و همکاران [۲۲] از فشار ۱۴۰ MPa، زمان نگهداری ۳۰ دقیقه و دمای $440^{\circ}C$ استفاده نمودند. همچنین فرناندس و همکاران [۲۳] در شرایطی که دمای اتصال $430^{\circ}C$ ، فشار ۱۳/۸۴ MPa، زمان نگهداری ۳۲/۵ دقیقه به بیشترین استحکام برشی برابر با ۵۱ MPa دست یافتند. تاکنون مطالعات انجام شده صرفاً به بررسی اتصال بین آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم پرداخته و تاثیر نوع تمپر حرارتی فلزات پایه مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به اینکه در این روش اتصال، ریزساختار و کارایی اتصال نفوذی بوسیله نفوذ اتم‌ها به طرفین و میزان نفوذ هر دو جزء تعیین می‌شود، برای این منظور در این پژوهش از دو نوع تمپر حرارتی مختلف آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم در اتصال نفوذی آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم استفاده شد تا میزان نفوذ اتم‌ها به طرفین و چگونگی تاثیر آن بر خواص نهایی اتصال مورد بررسی قرار گیرد. نتایج بررسی‌های ریزساختاری و مکانیکی در شرایطی کاملاً یکسان با یکدیگر مقایسه شدند.

۲- مواد و روش تحقیق

شماره ۶۰۰ و ۱۵۰۰ ایجاد شد. نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در حمام التراسونیک درون بشر حاوی استون به منظور حذف آلودگی‌های سطحی قرار داده شدند و سریعاً در کوره پرس داغ قرار گرفتند. دمای °C ۴۴۰، زمان نگهداری ۹۰ دقیقه، فشار ۲۹ MPa و نرخ حرارت‌دهی °C/min ۱۰ برای انجام آزمون‌ها در نظر گرفته شد [۲۴].

فلزات پایه شامل آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم و آلیاژ AZ31 منیزیم بودند که به روش جوشکاری نفوذی به یکدیگر متصل شدند. آنالیز شیمیایی و خواص مکانیکی فلزات پایه مورد استفاده به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. ابعاد فلزات پایه ۱۳×۱۳ mm، با ضخامت‌های ۴ mm و ۵ mm به ترتیب برای آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم در نظر گرفته شد. زبری سطح بر روی نمونه‌های منیزیمی و آلومینیومی با استفاده از سنباده‌های

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم (درصد وزنی)

نوع آلیاژ	%Mg	%Si	%Ti	%Fe	%Cu	%Cr	%Mn	%Zn	%Al
AZ31-O	Bal.	۰/۱۵	-	۰۰/۰۰۴	۰/۰۳	-	۰/۲	۱/۱	۳/۱۷
Al 6061	۰/۹۸۴	۰/۶۲	۰/۰۲۱	۰/۴۰۴	۰/۲۸۹	۰/۱۸۹	۰/۰۱۵	۰/۰۳۳۸	Bal.

جدول (۲): خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم

نوع آلیاژ	مدول الاستیک (GPa)	استحکام تسلیم کششی (MPa)	استحکام برشی (MPa)
Al 6061-O	۶۸/۹	۲۷۶	۸۲/۸
Al 6061-T6	۶۸/۹	۱۸۵	۲۰۷
Mg AZ31-O	۴۵	۱۵۰	۱۴۵

50 با اعمال بار فشاری با سرعت ۰/۱ mm/min صورت پذیرفت. همچنین تغییرات سختی در فصل مشترک و مناطق مجاور آن توسط دستگاه ریزسختی سنج ویکرز، با اعمال بار ۵۰ g، مدت زمان اعمال بار ۲۰ ثانیه، در فواصل ۵۰ میکرومتری در راستای عمود بر فصل مشترک و طبق استاندارد ASTM E384-11e1 انجام شد. میزان سختی در فلزات پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ با تمپر T6، آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده و منیزیم AZ31 به ترتیب ۸۲ HV، ۵۰ HV و ۴۸ HV تعیین شد.

جدول (۳): کد نمونه‌های جوشکاری شده

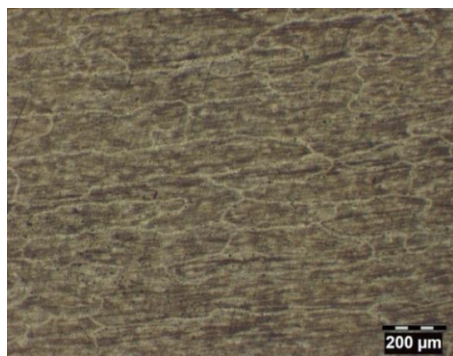
نوع اتصال	کد نمونه
Al 6061-T6/Mg AZ31	AM1
Al 6061-O/Mg AZ31	AM2

جوشکاری نفوذی در کوره پرس مدل Hot Press KHP- 200 ساخت کشور کره با ظرفیت اعمال فشار به میزان ۱۰ تن، ایجاد خلاء به میزان 1×10^{-4} torr، حداکثر دمای °C ۱۷۰۰ و با ابعاد محفظه ۱۵۰×۲۰۰×۲۰۰ mm صورت گرفت. پرس دستگاه از نوع هیدرولیک و از جنس فولاد گرم کار H13 بود. جدول ۳ نشان دهنده کد مربوط به اتصالات انجام شده می‌باشد. فصل مشترک اتصالات با روش‌های معمول برای بررسی با میکروسکوپ نوری مدل Olympus آماده‌سازی شد. بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA/TESCAN-LMU مجهز به آنالیزهای نقطه‌ای و خطی انجام شد. تعیین استحکام اتصالات با آزمون استحکام برشی طبق استاندارد ASTM: D1002-10 [۲۵] انجام شد. عملیات برش در فصل مشترک نمونه‌ها توسط دستگاه سانتام مدل STM-

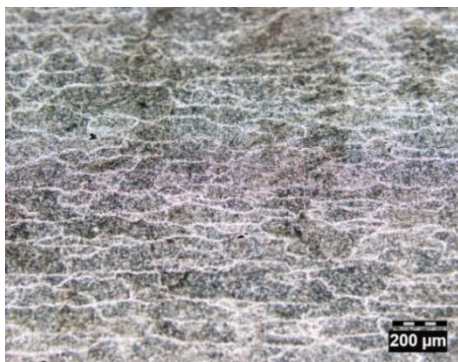
۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی ماکروسکوپی اتصالات

اتصال نفوذی AM1 در زمان ۶۰ دقیقه بدلیل نفوذ ناکافی و تشکیل پیوند ضعیف بین اتم‌های آلومینیوم و منیزیم با نیروی اندکی از یکدیگر جدا شد. برای همین منظور زمان نگهداری به مدت ۹۰ دقیقه در نظر گرفته شد تا هر دو اتصال در شرایطی یکسان مورد بررسی قرار گیرند. شکل ۱ نشان دهنده تصاویر ماکروسکوپی اتصالات انجام شده در دمای 440°C و زمان ۹۰ دقیقه می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود اتصال AM2 با تغییر شکل پلاستیک نسبتاً کم صورت گرفته، این در حالی است که اتصال AM1 با دفرمگی نسبتاً زیاد آلیاژ منیزیم همراه بوده است. به علاوه هیچگونه تغییر شکلی در آلیاژ پایه آلومینیوم صورت نگرفته است. استحکام تسلیم فشاری بالای آلیاژ آلومینیوم با تمپر T6 نسبت به منیزیم، سبب شده تا تغییر فرم صرفاً در آلیاژ منیزیم رخ داده و در نتیجه اتصالی نسبتاً مناسب بین این دو آلیاژ از نظر ماکروسکوپی شکل گیرد.



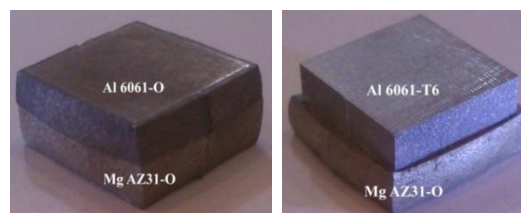
(الف)



(ب)

شکل (۲): تصاویر میکروسکوپ نوری از فلزات پایه آلومینیومی با تمپر حرارتی: (الف): T6 و (ب): O

همانطور که ملاحظه می‌شود در حالت T6 (عملیات حرارتی از نوع محلول سازی شده و پیر شده به صورت مصنوعی) (شکل ۲-الف) دانه‌های کاملاً کشیده شده در تصویر ملاحظه می‌شود که نشان دهنده کار سرد انجام شده بر روی آن می‌باشد. از طرفی در حالت O (حالت آنیل شده) (شکل ۲-ب) حضور دانه‌های ریز که نشان دهنده انجام تبلور مجدد در نمونه است، قابل ملاحظه می‌باشد. شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصالات انجام شده می‌باشد.



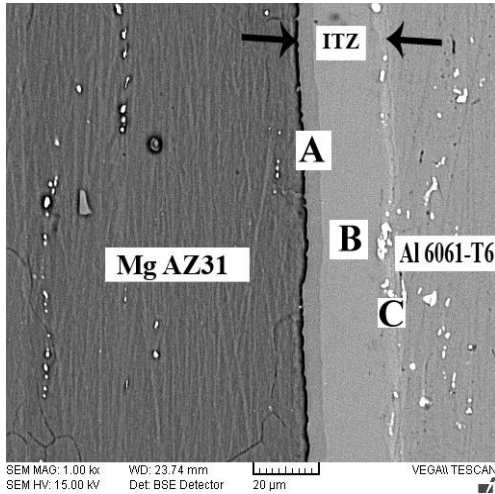
(ب)

(الف)

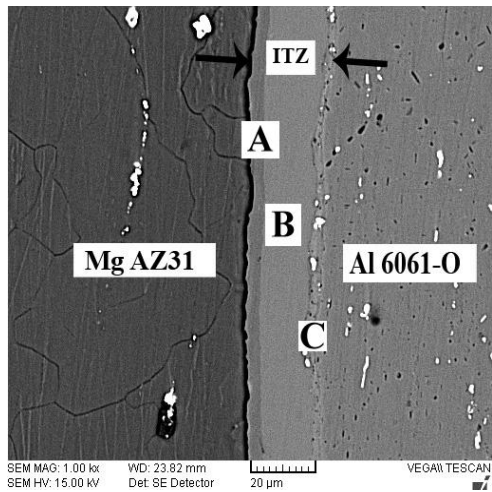
شکل (۱): تصاویر ماکروسکوپی از اتصالات: (الف): AM1 و (ب): AM2

۳-۲- ارزیابی ریزساختاری با میکروسکوپ نوری

در این پژوهش از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با دو تمپر حرارتی T6 و O استفاده شد که تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به ریزساختار این آلیاژ با دو تمپر حرارتی مذکور در شکل ۲ آورده شده است.



(الف)



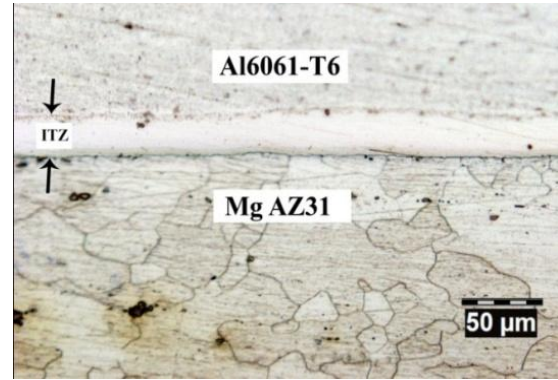
(ب)

شکل (۴): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی از فصل مشترک اتصالات: (الف): AM1 و (ب): AM2.

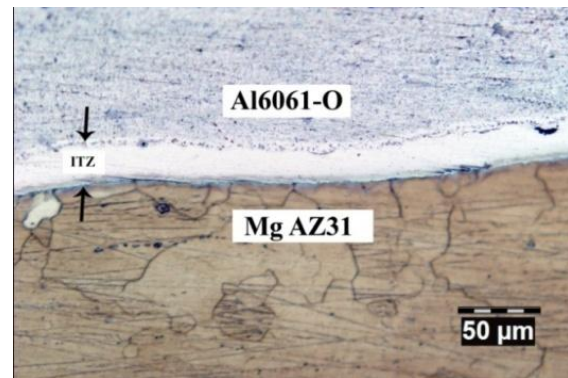
با توجه به نتایج، ضخامت لایه‌های واکنشی در اتصال AM1 بیشتر از اتصال AM2 می‌باشد. در اتصال نفوذی زمانی که غلظت به حد بحرانی برای انجام واکنش برسد واکنش بین عناصر رخ می‌دهد [۲۲-۲۴].

جدول (۴): میانگین ضخامت لایه‌های واکنشی در شرایط مختلف

نوع تمپر حرارتی آلومینیوم	ناحیه انتقال منیزیم	ناحیه انتقال آلومینیوم	ناحیه انتقال سطحی
T6	۵/۴۵	۳/۳۲	۲۷/۳۵
O	۴/۷۹	۳/۱۲	۲۵/۱



(الف)



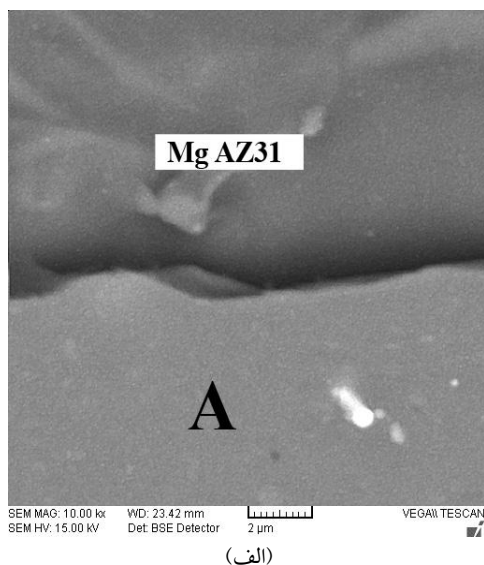
(ب)

شکل (۳): تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصالات: (الف): AM1 و (ب): AM2.

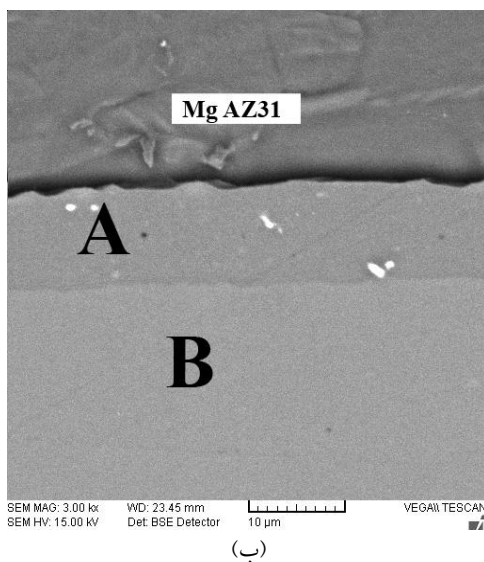
حضور ۳ لایه در ناحیه انتقال سطحی (ITZ) در تمامی نمونه‌ها بطور کاملاً پیوسته مشاهده می‌شود. در اتصال AM1 ناحیه نفوذ کاملاً یکنواخت و به صورت صاف و هموار بین دو آلیاژ تشکیل شده است، در حالیکه در اتصال AM2 به واسطه تغییر فرم اندک صورت گرفته در هر دو فلز پایه، ناحیه نفوذ به صورت صاف نبوده و دارای انحنا می‌باشد.

۲-۳- بررسی ریزساختاری با SEM

شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی از اتصالات انجام شده می‌باشد. حضور ۳ لایه با رنگ‌های متمایز در ناحیه بین سطوح مشاهده می‌شود. ضخامت لایه‌های مختلف در نواحی متعددی اندازه‌گیری و به طور میانگین مقادیر مربوطه در جدول ۴ آورده شده است.



(الف)



(ب)

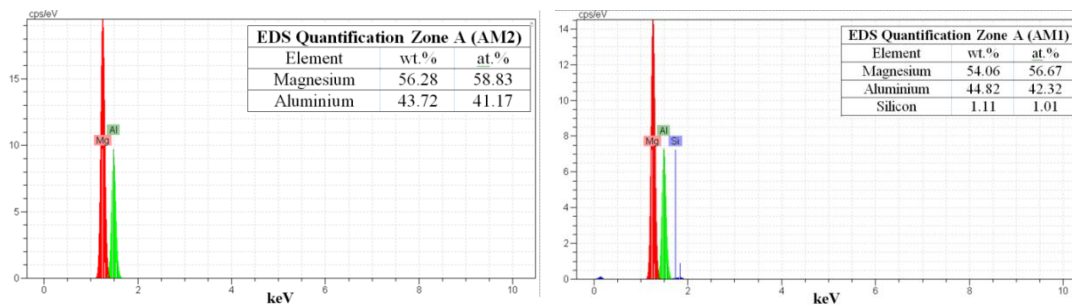
شکل (۵): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک: (الف): ITZ و آلیاژ منیزیم و (ب): فاز $Al_{12}Mg_{17}$ و آلیاژ منیزیم

جهت ایجاد اتصال حالت جامد، سطوح متصل شونده باید به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک شوند تا نیروی جاذبه کوتاه برد بین اتمی فعال شده و از طریق نفوذ اتصال بین سطوح برقرار شود [۲۴]. بنابراین سطوح جوشکاری شونده باید عاری از هرگونه آلودگی سطحی باشند. اصولاً اکسیدهای سطحی در آلیاژهای آلومینیوم از نظر فیزیکی بسیار چسبنده و از نظر شیمیایی پایدار و غیرقابل حل در زمینه آلومینیومی حتی در دماهای بالا می‌باشند [۲۰]. بنابراین اتصال کامل فلز به فلز را در ناحیه فصل مشترک

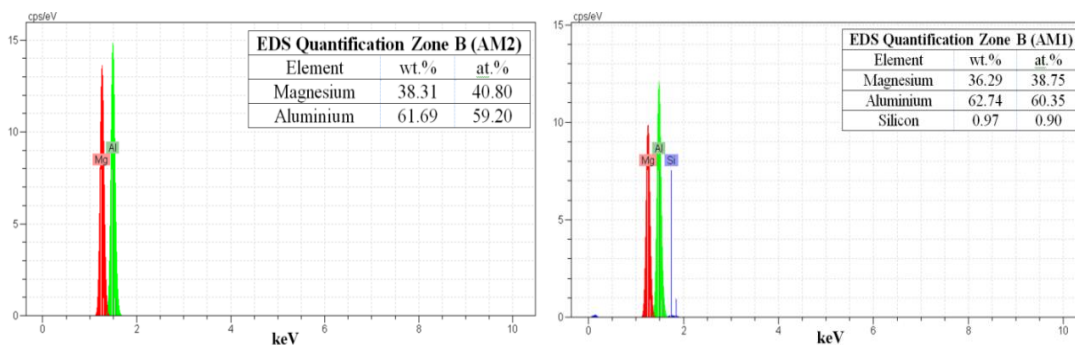
در اتصال AM1 استحکام بین پیوندهای آلومینیوم بیشتر می‌باشد. از طرفی با توجه به سختی بیشتر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با تمپر حرارتی T6 نسبت به تمپر حرارتی O، زبری‌های سطحی به زمان بیشتری برای تغییر فرم پلاستیک نیاز داشته و در نتیجه افزایش سطح تماس بین سطوح فلزات پایه در مدت زمان بیشتری رخ داده و اتم‌های منیزیم جهت نفوذ به شبکه آلومینیوم (در شرایط یکسان) فرصت کمتری داشته و بیشتر در سطح آلیاژ منیزیم تجمع می‌نمایند. در این صورت محلول جامد فوق اشباع در زمان کمتری روی سطح آلیاژ منیزیم تشکیل می‌شود، اما هر چه سختی کمتر باشد در این صورت نرخ تغییر فرم پلاستیک زبری‌های سطحی و در نتیجه افزایش بیشتر در سطح تماس در زمان کمتری رخ داده و با توجه به سست شدن بیشتر پیوندها در سمت آلیاژ آلومینیوم با تمپر حرارتی O امکان نفوذ بیشتر اتم‌های منیزیم به سمت مقابل فراهم می‌شود [۲۷، ۸]. در اتصال AM2 نفوذ متقابل اتم‌ها به طرفین منجر به تاخیر در تشکیل محلول جامد فوق اشباع شده و همین مساله باعث کاهش ضخامت لایه‌های واکنشی می‌شود. به منظور بررسی عدم تشکیل میکرو حفرات در ناحیه نفوذی تصاویری در بزرگنمایی بالاتر تهیه شد. شکل ۵ نشان دهنده تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک اتصالات در بزرگنمایی بالا می‌باشد. عدم تشکیل حفرات کرکندال در ناحیه انتقال سطحی را می‌توان به نزدیک بودن ضرایب نفوذ آلومینیوم و منیزیم که به ترتیب $1/89 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ و $2/29 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ [۲۱] و همچنین نزدیک بودن جرم اتمی آنها که به ترتیب 27 g/mol و 24 g/mol [۲۱] می‌باشند، نسبت داد. طبق تصاویر هیچ گونه میکرو حفره‌ای در ناحیه نفوذ تشکیل نشده است.

صورت پی در پی تشکیل شده و فاز دوم تنها زمانی که فاز اول به ضخامت معینی برسد شروع به جوانه زنی و رشد می کند. به علاوه فرآیند تشکیل ترکیبات بین فلزی به شدت وابسته به ضخامت فلزات پایه می باشد. در رابطه با مراحل اولیه تشکیل و رشد ترکیبات بین فلزی در حین اتصال نفوذی طبق بررسی های صورت گرفته می توان این چنین بیان نمود که، هر دو طرف با نرخ های متفاوت در یکدیگر نفوذ کرده، سپس محلول جامد فوق اشباعی تشکیل می شود. جوانه کریستالی فازهای جدید در عیوب، جاییکه غلظت عنصر نفوذ کرده بالا است، شکل می گیرد. جوانه کریستالی ترکیب بین فلزی در امتداد فصل مشترک رشد کرده و تعداد زیادی از این جوانه های رشد کرده به یکدیگر متصل شده و به طور معمول به صورت طولی رشد می کنند. بعد از آن جوانه های کریستالی ترکیب بین فلزی دوم در فصل مشترک شکل گرفته و رشد می کنند. شکل ۷ نشان دهنده نتایج آنالیز خطی از فصل مشترک اتصالات AM1 و AM2 می باشد. آنالیز خطی بر روی خطی به طول $100 \mu\text{m}$ انجام شد. سه ناحیه بطور مجزا از منیزیم به سمت آلومینیوم با حروف a, b و c علامت گذاری شده است. در نواحی a و c وجود گرادیان غلظتی بین اتم های منیزیم و آلومینیوم نشان می دهد که این نواحی لایه های واکنشی آلومینیوم و منیزیم می باشند. در اتصال AM2 شیب گرادیان غلظتی مربوط به منیزیم کمتر بوده و همانطور که مشاهده می شود نرخ نفوذ اتم های منیزیم و آلومینیوم به یکدیگر نزدیک شده است. ولی در اتصال AM1 در شکل ۷-الف به طور واضح فاصله بین خطوط نشان دهنده تفاوت زیاد بین نرخ های نفوذ اتم های آلومینیوم و منیزیم در ناحیه b می باشد.

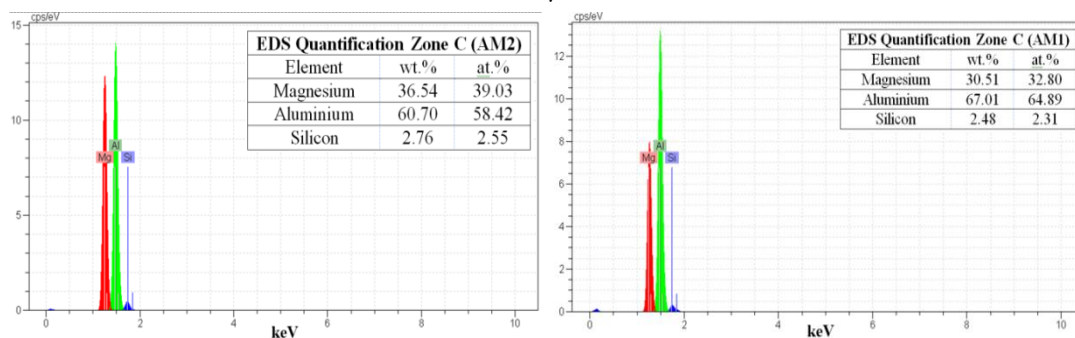
دچار مشکل می کنند. یکی از روش های غلبه بر مشکل لایه های اکسیدی در جوشکاری نفوذی استفاده از سطوح نسبتاً خشن می باشد که منجر به ایجاد اتصالی با استحکام بالاتر می شود. تغییر شکل پلاستیک موضعی در مراحل اولیه اتصال، منجر به گسیخته شدن فیلم اکسیدی می شود. در سطح ناهموار، برآمدگی ها بیشتر دچار تغییر شکل می شوند. بنابراین گسیختگی بیشتری در لایه اکسیدی رخ داده و اتصال فلز به فلز بهبود می یابد. بنابراین در این پژوهش سطوح فلزات پایه به صورت زبر در نظر گرفته شد. به منظور تعیین فازهای تشکیل شده در ناحیه واکنشی بین سطوح فلزات پایه از آنالیز نقطه ای از نواحی A, B و C مشخص شده در شکل ۴ استفاده شد. شکل ۶ نتایج آنالیز نقطه ای می باشد. با توجه به درصد اتمی عناصر تشکیل دهنده لایه های مختلف و مطابقت نتایج با دیاگرام فازی دو تایی آلومینیوم-منیزیم [۲۳]، حضور ترکیب بین فلزی $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ (γ) در لایه A، مخلوطی از فازهای $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ و Al_3Mg_2 (β) در لایه B و ترکیب بین فلزی β در لایه C مشاهده شد. نکته قابل توجه نفوذ بیشتر اتم های منیزیم در تمام نواحی در اتصال AM2 می باشد. شعاع اتمی آلومینیوم به مقدار ناچیزی کمتر از شعاع اتمی منیزیم است. بنابراین انرژی اکتیواسیون برای نفوذ اتم ها به طرفین تفاوت بسیاری با یکدیگر ندارند. در نتیجه تنها علت نفوذ بیشتر اتم های منیزیم به سمت آلیاژ آلومینیوم در اتصال AM2 سست شدن بیشتر پیوندها در آلومینیوم 6061 آنیل شده در اثر نیروی اعمالی می باشد. در نتیجه شکستن پیوندهای بین اتم های آلومینیوم و نفوذ به درون شبکه آلومینیوم در حالت AM2 بسیار راحت تر از حالت AM1 می باشد. در آلومینیوم 6061 آنیل شده در اثر نیروی اعمال شده جهت جوشکاری، پیوندهای بین اتم های آلومینیوم سریعتر سست شده و جاهای خالی به سرعت تشکیل می شوند. به علاوه حضور بیشتر اتم های سیلیسیم در لایه C نشان دهنده نفوذ بیشتر اتم های آلومینیوم به سمت آلیاژ منیزیم و ترک ذرات حاوی سیلیکون در پشت سر خود می باشد. در رابطه با چگونگی تشکیل ترکیبات بین فلزی در حین اتصال نفوذی طبق نظریه فیلیبرت [۲۳-۲۴] اصولاً ترکیبات بین فلزی به



(الف)

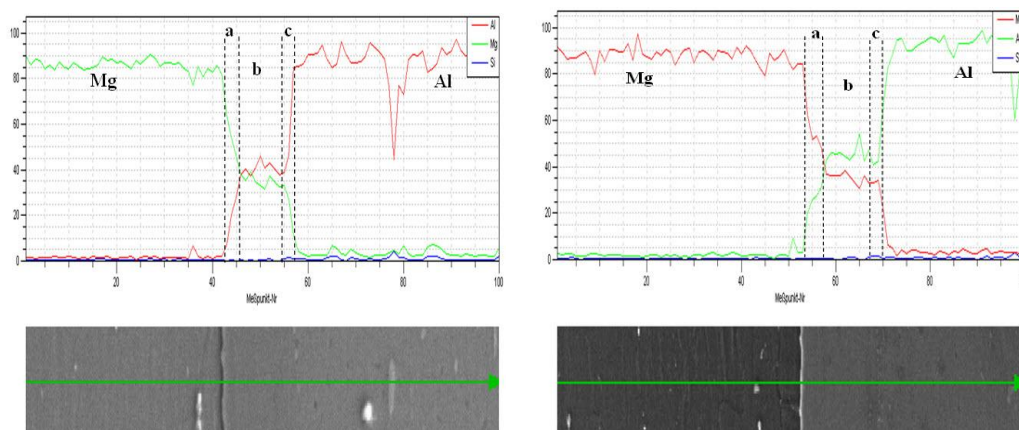


(ب)



(ج)

شکل (۶): آنالیز نقطه‌ای از نواحی شکل ۳: (الف): A, (ب): B و (ج): C



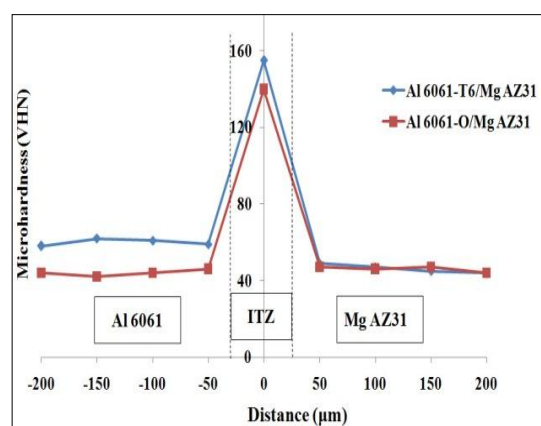
(ب)

(الف)

شکل (۷): نتایج آنالیز خطی از اتصالات: (الف): AM1 و (ب): AM2

۳-۳- بررسی خواص مکانیکی اتصالات

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات از آزمون‌های ریزسختی سنجی ویکرز و آزمون استحکام برشی استفاده شد. پروفیل ریزسختی اتصال‌های جوشکاری شده در زمان ۹۰ دقیقه و دمای °C ۴۴۰ در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود میزان سختی در فصل مشترک اتصال بیشترین مقدار بوده و با فاصله گرفتن از فصل مشترک از میزان سختی کاسته شده است.

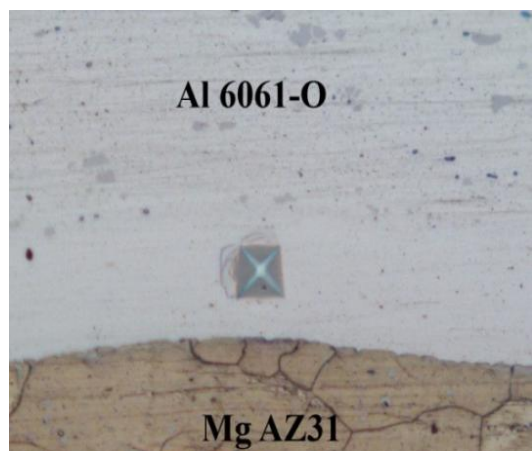


شکل (۸): توزیع میکروسختی در اتصالات AM2 و AM1

نواحی بر روی سطح آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با تمپر T6 اتصال با آلیاژ منیزیم شکل نگرفته است. این در صورتی بود که در روی تمامی سطح آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده نفوذ بطور یکنواخت شکل گرفته و اتصال انجام شده است. این مساله نشان می‌دهد در اتصال AM2 با توجه به استحکام فشاری کمتر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده و تغییر فرم اندکی که در حین اتصال در آن رخ می‌دهد باعث می‌شود تا زبری‌های سطحی بطور کامل حذف و در نتیجه نفوذ به طور کامل انجام شود، ولی در اتصال AM1 بدلیل استحکام بالاتر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با تمپر T6 این اتفاق رخ نداده و فقط در برخی مناطق به دلیل تغییر شکل آلیاژ منیزیم فرآیند نفوذ اتفاق می‌افتد.



(الف)



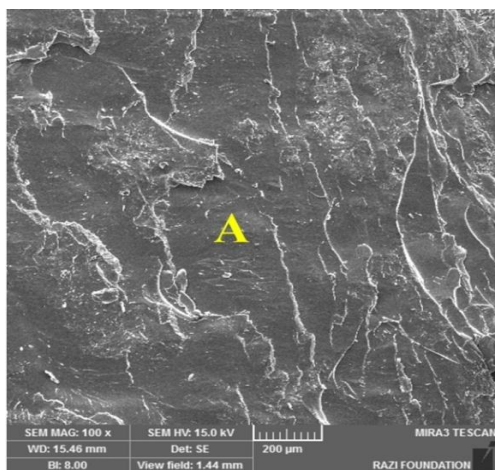
(ب)

شکل (۹): تصاویر ایندنتور در ناحیه نفوذ میانی اتصالات: (الف): AM1 و

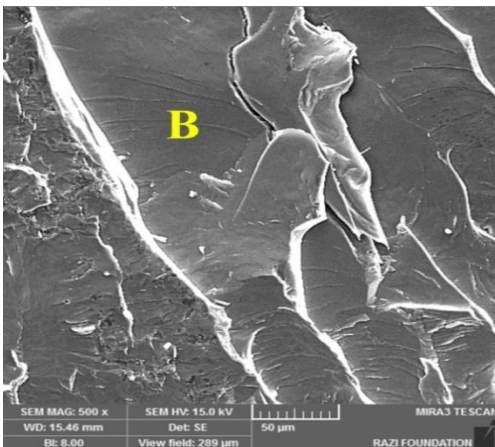
(ب): AM2

طبق نتایج پس از فرآیند اتصال تغییرات ریزسختی در فلزات پایه تقریباً یکنواخت بوده و میزان سختی در فلزات آلومینیوم ۶۰۶۱ با تمپر T6، آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده و منیزیم AZ31 به طور میانگین در حدود HV ۶۰، HV ۴۴ و HV ۴۶ بود. مقدار ریزسختی در ناحیه نفوذ میانی بیشترین مقدار خود را داشته و در اتصال AM2 و AM1 به ترتیب در حدود HV ۱۴۰ و HV ۱۵۵ بود. شکل ۹ نشان دهنده تصاویر ایندنتور در ناحیه نفوذ میانی می‌باشد. علت افزایش اندک در میزان سختی در اتصال AM1 ضخامت بیشتر ترکیبات بین‌فلزی و در نتیجه افزایش سختی در ناحیه نفوذ میانی می‌باشد. شکل ۱۰ نشان دهنده نتایج آزمون استحکام برشی می‌باشد. میزان استحکام برشی در اتصال‌های AM1 و AM2 به ترتیب برابر با ۱۸ و ۳۲ MPa حاصل شد. پس از انجام آزمون استحکام برشی مشاهده شد که در بعضی از

که نسبت به فاز $Al_{12}Mg_{17}$ از سختی بیشتری برخوردار است. شکل ۱۱-ب تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست آلیاژ آلومینیوم می‌باشد. در این حالت نیز آثار شیار رودخانه‌ای که حاکی از شکست از نوع ترد می‌باشد، مشاهده می‌شود. آنالیز نقطه‌ای از نقطه B نشان می‌دهد که این نقطه حاوی منیزیم (۴۰/۹ at%) و آلومینیوم (۵۹/۱ at%) بوده که نشان دهنده فاز ترد Al_3Mg_2 می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود میکروتترک‌های بسیار زیادی بر روی سطح شکست وجود داشته که به دلیل وجود بیشتر فاز Al_3Mg_2 بر روی سطح آلیاژ آلومینیوم می‌باشد و این مساله نشان دهنده شروع رشد و اشاعه ترک از این فاز بوده تا شکست بطور کامل رخ داده است.



(الف)

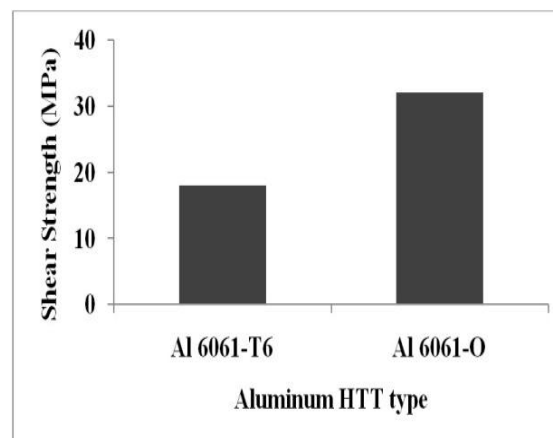


(ب)

شکل (۱۱): سطوح شکست نمونه AM2، سطح: (الف): منیزیم و (ب):

آلومینیوم

در اتصال AMI این امکان وجود دارد که حتی برخی از فرورفتگی‌های سطحی موجود بر روی آلیاژ آلومینیوم به طور کامل توسط آلیاژ منیزیم پر نشده و در نتیجه نفوذ در آن مناطق رخ ندهد. بنابراین می‌توان این چنین برداشت نمود که نفوذ بیشتر اتم‌های منیزیم در حالت استفاده از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده منجر به پیوند قوی‌تر بین اتم‌های آلومینیوم و منیزیم شده و در نتیجه استحکام پیوند و اتصال نهایی افزایش می‌یابد.



شکل (۱۰): نتایج آزمون استحکام برشی اتصالات مختلف

شکل ۱۱-الف و ۱۱-ب به ترتیب نشان دهنده تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه AM2 از سطح شکست منیزیم و آلومینیوم می‌باشد. در هر دو نمونه شکست از منطقه نفوذ (ناحیه انتقال سطحی) رخ داده چرا که این منطقه حاوی ترکیبات ترد بین فلزی و با ضخامت کم بود. اصولاً به دلیل تشکیل ترکیبات ترد بین فلزی، داکتیلیته جوش نسبت به فلزات پایه پایین‌تر می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۱-الف ملاحظه می‌شود اثرات شیار رودخانه‌ای کاملاً بر روی سطح نمونه منیزی مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد که شکست از نوع ترد و کلیواژ می‌باشد. به علاوه حضور میکروتترک‌ها نیز بر روی سطح شکست کاملاً مشهود است. طبق نتایج آنالیز نقطه‌ای نقطه A حاوی منیزیم (۴۱/۴۲ at%) و آلومینیوم (۵۸/۵۸ at%) بوده که نشان دهنده فاز ترد Al_3Mg_2 در این ناحیه می‌باشد. این مساله نشان می‌دهد که شکست در فاز Al_3Mg_2 رخ داده است

- [5] D. Q. Sun, X. Y. Gu & W. H. Liu, "Transient Liquid Phase Bonding of Magnesium Alloy (Mg-3Al-1Zn) using Aluminium Interlayer", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 391A, pp. 29-33, 2005.
- [6] P. Liu, Y. Li, G. Haoran & W. Juan, "Investigation of Interfacial Structure of Mg/Al Vacuum Diffusion Bonded Joint", *Vacuum*, Vol. 80, pp. 395-400, 2006.
- [7] Y. Li, P. Liu, J. Wang & H. Ma, "XRD and SEM Analysis near the Diffusion Bonding Interface of Mg/Al Dissimilar Materials", *Vacuum*, Vol. 82, pp. 9-15, 2008.
- [8] G. Mahendran, N. Balasubramanian & T. Senthilvelan, "Influences of Diffusion Bonding Process Parameters on Bond Characteristics of Mg-Cu Dissimilar Joints", *Trans. Non-Ferrous Met. Soc. China*, Vol. 20, pp. 997-1005, 2010.
- [9] G. Mahendran, V. Balasubramanian & T. Senthilvelan, "Developing Diffusion Bonding Windows for Joining AZ31B Magnesium-AA2024 Aluminium Alloys", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 1240-1244, 2009.
- [10] S. Jing, W. Ke-hong, Z. Qi, Z. De-ku, H. Jun & G. Jia-qi, "Effect of Joining Temperature on Microstructure and Properties of Diffusion Bonded Mg/Al Joints", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 22, pp. 1961-1966, 2012.
- [11] M. W. Tseng, D. B. Williams, K. K. Soni & R. Levi-Setti, "Microstructural Evolution during Transient Liquid-phase Bonding in a Ni-base Superalloy/sapphire Fiber Composite", *Journal of Materials Science*, Vol. 34, pp. 5187-5197, 1999.
- [12] N. Orhan, T. I. Khan & M. Eroglu, "Diffusion Bonding of a Microduplex Stainless Steel to Ti-6Al-4V", *Scripta Materialia*, Vol. 45, pp. 441-446, 2001.
- [13] 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.
- [14] S. Kundu & S. Chatterjee, "Diffusion Bonding between Commercially Pure Titanium and Micro-Duplex Stainless Steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 480, pp. 316-322, 2008.
- [15] S. Hinotani & Y. Ohmari, "The Microstructure of Diffusion-Bonded Ti/Ni Interface", *Trans. Jpn. Inst.*

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر نوع تمپر حرارتی آلیاژ آلومینیوم بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات آلومینیوم و منیزیم مورد بررسی قرار گرفت. از دو تمپر T6 و O آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم استفاده شد. آزمون‌ها در شرایطی یکسان انجام شد. طبق نتایج نوع تمپر حرارتی آلیاژ آلومینیوم در چگونگی اتصال چه از نظر ظاهر و چه از نظر استحکام نهایی تاثیر به سزایی دارد. نتایج نشان داد به واسطه کمتر بودن استحکام فشاری آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده اتصالی با کمترین تغییر فرم ممکن در فشار ۲۹ MPa شکل گرفته است. ضخامت کمتر لایه‌های واکنشی و میکروسختی در اتصال آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ آنیل شده به آلیاژ منیزیم AZ31 حاصل شد. همچنین هیچگونه میکرو حفره در فصل مشترک اتصال مشاهده نشد. با توجه به تغییر فرم مناسب آلیاژ آلومینیوم در این حالت بیشترین میزان اتصال بین سطوح رخ داده و استحکام اتصال به میزان ۳۲ MPa تعیین شد. نتایج بررسی‌های سطوح شکست نشان دهنده شروع ترک از فاز Al_3Mg_2 و در نتیجه ایجاد شکست از نوع کلیواژ در این فاز بود.

۵- مراجع

- [1] A. C. Somasekharan & L. E. Murr, "Microstructures in Friction-stir Welded Dissimilar Magnesium Alloys and Magnesium Alloys to 6061-T6 Aluminum Alloy", *Mater. Charact.*, Vol. 52, pp. 49-64, 2004.
- [۲] ف. غروی، ا. ابراهیم زاده و ع. سهیلی، "ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه رویهم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در سرعت‌های پیشروی متفاوت"، نشریه فرایندهای نوین در مهندسی مواد، شماره ۲، ص ۱۱۵-۱۲۹، ۱۳۹۵.
- [۳] م. ت. صالحی، س.ح. سیدین و ا. بادامی، "پیش بینی ریزساختار حاصل از پیچش گرم در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱"، نشریه فرایندهای نوین در مهندسی مواد، شماره ۳، ص ۱۱-۲۱، ۱۳۹۳.
- [4] J. Wang, J. C. Feng & Y. X. Wang, "Microstructure of Al-Mg Dissimilar Weld made by Cold Metal Transfer MIG Welding", *Mater. Sci. Technol.*, Vol. 24, pp. 827-831, 2008.

- Design, Vol. 30, pp. 4548-4551, 2009.
- [22] S. Jing, W. Ke-hong, Z. Qi, Z. De-ku, H. Jun & G. Jia-qi, "Effect of Joining Temperature on Microstructure and Properties of Diffusion Bonded Mg/Al Joints", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 22, pp. 1961-1966, 2012.
- [23] M. Joseph Fernandus, T. Senthilkumar, V. Balasubramanian & S. Rajakumar, "Optimising Diffusion Bonding Parameters to Maximize the Strength of AA6061 Aluminium and AZ31B Magnesium Alloy Joints", *Materials and Design*, Vol. 33, pp. 31-41, 2012.
- [24] M. Jafarian, A. Khodabandeh & S. A. Manafi, "Evaluation of diffusion welding of 6061 aluminum and AZ31 magnesium alloys without using an interlayer", *Materials and Design*, Vol. 65, pp. 160-164, 2015.
- [25] ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal).
- [26] ASTM E384-11e1, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials.
- [27] S. Chen, F. Ke, M. Zhou & Y. Bai, "Atomistic investigation of the effects of temperature and surface roughness on diffusion bonding between Cu and Al", *Acta Materialia*. Vol. 55, pp. 3169-3175, 2007.
- Met., Vol. 29, pp. 116-24, 1988.
- [16] H. Nishi, T. Araki & M. Eto, "Diffusion Bonding of Alumina Dispersion-Strengthened Copper to 316 Stainless Steel with Interlayer Metals", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 39, pp. 505-511, 1988.
- [17] O. Yilmaz & M. Aksoy, "Investigation of Micro-Crack Occurrence Conditions in Diffusion Bonded Cu-304 Stainless Steel Couple", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 121, pp. 136-142, 2002.
- [18] O. Yilmaz & H. Celik, "Electrical and Thermal Properties of the Interface at Diffusion-Bonded and Soldered 3040 Stainless Steel and Copper Bimetal", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 141, pp. 67-76, 2003.
- [19] D. Dietrich, D. Nickel, M. Krause, T. Lampke, M.P. Coleman & V. Randle, "Formation of Intermetallic Phases in Diffusion Welded Joints of Aluminium and Magnesium Alloys", *J. Mater. Sci*, Vol. 46, pp. 357-364, 2011.
- [20] M. J. Fernandus, T. Senthilkumar & V. Balasubramania, "Developing Temperature-Time and Pressure-Time Diagrams for Diffusion Bonding AZ80 Magnesium and AA6061 Aluminium Alloys", *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 1651-1656, 2011.
- [21] L. Liu, L. Zhao & R. Xu, "Effect of Interlayer Composition on the Microstructure and Strength of Diffusion Bonded Mg/Al Joint", *Materials and*