

اتصال نفوذی آلیاژهای AZ31 منیزیم و ۷۰۷۵ آلومینیوم تحت تاثیر پارامتر دما

حسین علیمردان^۱، صاحبعلی منافی^{۲*}، جمال صیدی^۳

تاریخ دریافت: ۱۵ مرداد ۹۲ تاریخ پذیرش: ۲۷ مهر ۹۲

چکیده

در این پژوهش، به بررسی تاثیر دما در اتصال آلیاژهای AZ31 منیزیم و ۷۰۷۵ آلومینیوم به روش جوشکاری نفوذی پرداخته شد. در جوشکاری نفوذی دما مهمترین متغیر بوده چرا که تمامی مکانیزمهای جوشکاری نفوذی به دما حساس می‌باشند. اتصالات نفوذی بین دو آلیاژ مورد نظر در دماهای ۴۳۰، ۴۴۰ و ۴۵۰ °C و زمان ۶۰ دقیقه صورت گرفتند. در تمامی آزمون‌ها فشار و خلاء ثابت و به ترتیب مقادیر ۲۹ MPa و 1×10^{-3} torr در نظر گرفته شد. فصل مشترک اتصالات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به آنالیز EDS بررسی شد و همچنین بررسی خواص مکانیکی اتصالات نیز با آزمون‌های ریزسختی سنجی و استحکام برشی مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج حضور ترکیبات بین‌فلزی Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$ در ناحیه اتصال مشاهده شد که با افزایش دما درصد وزنی این ترکیبات افزایش یافت. کمترین میزان سختی در ناحیه نفوذ و بیشترین استحکام برشی اتصال در دمای ۴۳۰ °C به ترتیب به میزان ۷۰ HV و ۳۰ MPa حاصل شد.

واژگان کلیدی: اتصال نفوذی، آلومینیوم ۷۰۷۵، منیزیم AZ31، دما..

۱. مقدمه

سبکترین آلیاژهای ساختمانی مورد استفاده در صنعت می‌باشند. آلیاژسازی منیزیم با برخی عناصر سبب دستیابی به گستره وسیعی از خواص مهندسی شده است، بگونه‌ای که کاربرد آلیاژهای منیزیم در صنعت به شدت رونق یافته و طبق پیش‌بینی محققین، هزاره سوم هزاره رونق آلیاژهای منیزیم و تیتانیوم خواهد بود. امروزه با توجه به کاربرد گسترده آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم در صنایع مختلف اتصال این دو آلیاژ به یکدیگر امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بطور 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 بکار گرفته می‌شود که با توجه به مشکلات فراوان جوشکاری ذوبی این دو آلیاژ از جمله ترک‌های حرارتی، ناخالصی‌های اکسیدی و تشکیل بیش از اندازه ترکیبات ترد

آلومینیوم دومین عنصر فلزی فراوان پوسته زمین بوده و کاربردهای گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، نظامی و هوافضا دارد. آلومینیوم و آلیاژهای آن دارای استحکام ویژه بالا، خواص مکانیکی مناسب، سبکی، خواص سطحی خوب و مقاومت به خوردگی بسیار خوبی هستند. سبکی و هدایت الکتریکی بالای آلومینیوم، کاربرد آن را به کابل انتقال انرژی الکتریکی از سایت‌های تولید قدرت ممکن می‌سازد. دانسیته آلومینیوم g/cm^3 ۲/۷ است که حدود یک سوم دانسیته فولاد و مس است. در محیط‌های اتمسفری، آبی، پتروشیمی و بسیاری سیستم‌های شیمیایی مقاومت به خوردگی عالی دارد. از دیگر ویژگی‌های آلومینیوم می‌توان به داکتیلیتی خوب در دمای زیر صفر و غیرسمی بودن آن اشاره کرد. از طرفی آلیاژهای پایه منیزیم

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات کرمانشاه، گروه مهندسی مکانیک، کرمانشاه، ایران،

۲ استایار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، گروه فنی مهندسی، شاهرود، ایران، manafi@iau-shahrood.ac.ir

۳. استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ایلام، گروه مکانیک..

بین فلزی توجهات به سمت اتصال این دو آلیاژ با روش های حالت جامد گرایش پیدا کرده است [۴-۱].

از جمله مزایای جوشکاری حالت جامد در برابر جوشکاری ذوبی می توان به مواردی همچون، ایجاد حداقل اعوجاج و تغییر شکل در فلزات پایه، قابلیت اتصال قطعات نازک و ضخیم، امکان اتصال سطوح بزرگ، کامپوزیت های پایه فلزی، قطعات ریختگی و محصولاتی که به روش متالورژی پودر تهیه شده اند، اشاره کرد. همچنین تغییرات حرارتی کمتر از جوشکاری ذوبی در نتیجه تغییرات اندک در ساختار میکروسکوپی جوش نسبت به فلز پایه رخ خواهد داد و بدلیل وجود شیب گرمایی اندک، تنش های پسماند بسیار ناچیز می باشند. از جمله روش های جوشکاری در حالت جامد که برای اتصال این دو آلیاژ مورد استفاده قرار می گیرند می توان به روش های جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری انفجاری، جوشکاری با فاز مایع گذرا و جوشکاری نفوذی اشاره نمود. عوامل متعددی در انتخاب روش اتصال دهی مواد با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مختلف تاثیرگذار می باشند [۷-۵].

عدم انتخاب صحیح روش اتصال دهی و پارامترهای موثر بر آن مشکلات مختلفی بوجود می آورد. اتصال نفوذی در حلال می تواند بطور دقیق درجه حرارت و زمان نگهداری را تنظیم نموده و سپس تشکیل ترکیبات بین فلزی را کنترل نماید. در این روش پارامترهایی همچون دمای اتصال، فشار اعمالی، زمان نگهداری و میزان زبری سطح نمونه ها نقش اساسی را در تعیین میزان استحکام اتصال ایفا می کنند [۱۰-۸]. در این فرآیند اگر سطوح متصل شونده عاری از آلودگی باشند، نیروی محرکه ای که باعث ایجاد اتصال می شود، کاهش انرژی سطحی است. چون سطوح کاملاً صاف نیستند با اعمال یک نیروی فشاری، تماس

ابتدایی بین برآمدگی های سطوح برقرار می شود. سپس با تغییر شکل پلاستیک و لغزش برآمدگی ها، سطح تماس دو قطعه افزایش می یابد. 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 می شود. با استفاده از این روش فلزات غیرمشابهی همچون تیتانیوم به آلومینیوم و Fe_3Al به Q235 با موفقیت به یکدیگر متصل شده اند [۱۱، ۱۲]. تاکنون پژوهشی بر روی اتصال آلیاژ ۷۰۷۵ آلومینیوم و AZ31 منیزیم صورت نگرفته و تحقیقات صورت گرفته محدود به اتصال آلیاژهای سری ۶۰۰۰ آلومینیوم به منیزیم آلیاژی می باشد که از جمله آنها می توان به ماهدران و همکاران [۱۴، ۱۳] اشاره نمود که اتصال آلیاژ AZ31 منیزیم به آلیاژ ۲۰۲۴ آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. همچنین فرناندس و همکاران [۱۶، ۱۵] بر روی اتصال نفوذی آلومینیوم ۶۰۶۱ به منیزیم AZ80 و آلومینیوم ۶۰۶۱ به منیزیم AZ31 پژوهشی را صورت دادند. به همین دلیل در این پژوهش اتصال این دو آلیاژ به روش جوشکاری نفوذی صورت گرفت و اثر پارامتر دما بر چگونگی تشکیل فصل مشترک اتصال مورد بررسی قرار گرفت.

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

Alloy type	%Al	%Zn	%Mn	%Cr	%Cu	%Fe	%Ti	%Si	%Mg
AZ31-O	۳/۱۷	۱/۱	۰/۲	-	۰/۰۳	۰۰/۰۰۴	-	۰/۱۵	Bal.
Al 7075-T6	Bal.	۵/۶	۰/۱۵	۰/۲	۱/۵	۰/۴۵	۰/۰۳	۰/۱۲	۲/۶

۲- مواد و روش تحقیق

مقطر (H₂O) قرار داده شدند.



شکل (۱): دستگاه جوشکاری نفوذی.

در این تحقیق آلیاژهای ۷۰۷۵ آلومینیوم و AZ31 منیزیم برای اتصال به روش جوشکاری نفوذی مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز شیمیایی مواد اولیه در جدول ۱ آورده شده است. در ابتدا نمونه‌هایی با ابعاد ۱۳×۱۳ mm و با ضخامت ۵ mm تهیه شدند. جهت ایجاد زبری بر روی سطح نمونه‌ها از سمباده‌های شماره ۶۰۰ و ۱۵۰۰ به ترتیب برای منیزیم و آلومینیوم استفاده شد. قبل از انجام آزمایش‌ها و جهت حذف هرگونه آلودگی سطحی، نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه توسط محلول استون در دستگاهอัลتراسونیک و سپس توسط الکل اتیلیک ۹۶٪ تحت شستشو قرار گرفتند و سریعاً با استفاده از جریان هوای ولرم خشک شده و در کوره قرار داده شدند. فرآیند جوشکاری نفوذی در کوره پرس گرم (شکل ۱) و در محدوده دمایی °C ۴۳۰-۴۵۰، زمان نگهداری ۶۰ min، تحت فشار تک محوری ۲۹ MPa و خلاء 1×10^{-3} torr انجام شد. نرخ گرمایش نمونه‌ها در کوره ۱۰ °C/min در نظر گرفته شد. جدول ۲ نشان دهنده کدهای نمونه‌ها در شرایط مختلف می‌باشد. جهت انجام مطالعات ریزساختاری بر روی فصل مشترک، اتصالات در یک راستا عمود بر فصل مشترک برش داده شده و پس از آماده‌سازی سطح نمونه‌ها، جهت اچ آلیاژ منیزیم نمونه‌ها به مدت ۱۵ ثانیه در محلول حاوی ۱/۴ ml اسید استیک (CH₃COOH)، ۰/۶ g اسید پیکریک (C₆H₃N₃O₇)، ۱۰ ml اتانول (C₂H₆O) و ۱/۴ ml آب

جدول (۲): کدبندی نمونه‌ها در شرایط مختلف.

کد نمونه	زمان	دما	آزمون
۴۳۰-۶۰	۶۰	۴۳۰	۱
۴۴۰-۶۰	۶۰	۴۴۰	۲
۴۵۰-۶۰	۶۰	۴۵۰	۳

سپس ریزساختارهای حاصله در مناطق مختلف توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی که مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی EDS بود، بررسی شد. همچنین آزمون ریزسختی

۳-۲- بررسی ریزساختار اتصالات با SEM

شکل ۳ نشان دهنده فصل مشترک اتصالات در دماهای ۴۳۰، ۴۴۰ و ۴۵۰ °C می باشد.

همانطور که ملاحظه می شود حضور ۳ لایه بطور پیوسته در فصل مشترک مشاهده می شود. که از سمت آلیاژ منیزیم به سمت آلیاژ آلومینیوم شامل ناحیه انتقال منیزیم، ناحیه نفوذ میانی و ناحیه انتقال آلومینیوم می باشند. طبق نتایج تشکیل لایه نزدیک منیزیم به شکلی کاملاً یکنواخت صورت گرفته است و لایه نزدیک آلومینیوم به صورت ناهموار تشکیل شده است. این مسأله از ویژگی های این دو لایه می باشد.

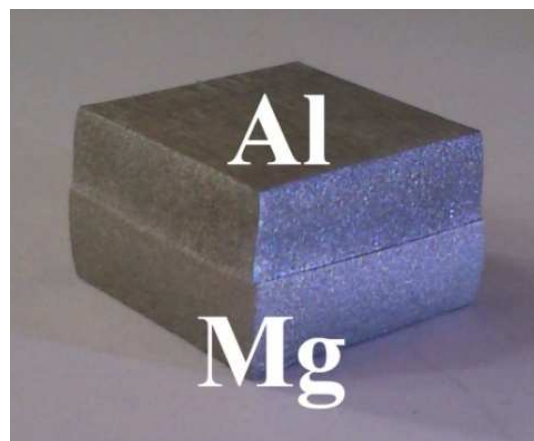
ملاحظه می شود که با افزایش دما از ۴۳۰ به ۴۵۰ °C ضخامت تمامی نواحی افزایش یافته و بطور مثال ضخامت ناحیه انتقال سطحی (Interfacial Transition Zone: ITZ) با افزایش دما از ۲۱/۴۹ به ۲۲/۹۸ μm افزایش یافته است. با افزایش دما به میزان ۲۰ °C (۰/۴)، ضخامت ناحیه انتقال سطحی به میزان ۰/۶٪ افزایش می یابد. طبق تصاویر هیچگونه میکرو حفره و حفرات مربوط به اثر کرکندال در فصل مشترک اتصال تشکیل نشده است که علت آن را می توان به نزدیک بودن ضرایب نفوذ آلومینیوم و منیزیم که به ترتیب $1/89 \times 10^{-12}$ و $2/29 \times 10^{-12}$ m^2/sec می باشند و همچنین نزدیک بودن جرم اتمی آنها که به ترتیب ۲۷ و ۲۴ g/mol می باشند نسبت داد. در رابطه با چگونگی تشکیل ترکیبات بین فلزی در حین اتصال نفوذی طبق نظریه فیلبرت می توان این چنین بیان نمود که [۸]:

سنجی ویکرز بوسیله دستگاه ریزسختی سنج ویکرز، با بار اعمالی ۵۰ g، مدت زمان اعمال بار ۲۰ ثانیه و در فواصل ۵۰ میکرومتری در راستای عمود بر فصل مشترک انجام شد. آزمون استحکام برشی اتصالات با استفاده از دستگاه SANTAM مدل STM-50 با اعمال بار فشاری با سرعت ۰/۱ mm/min، عملیات برش در فصل مشترک اتصالات صورت پذیرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی میکروسکوپی اتصال

شکل ۲ نشان دهنده تصویر میکروسکوپی از اتصال انجام شده در دمای ۴۳۰ °C و مدت زمان ۶۰ دقیقه می باشد.



شکل (۲): تصویر میکروسکوپی از اتصال ۴۳۰-۶۰.

نمونه آلومینیومی در بالا و نمونه منیزیمی در پایین قرار داده شد. مشاهده می شود که اتصالی با کمترین میزان تغییر شکل پلاستیک بین دو آلیاژ صورت گرفته است. از جمله مزایای جوشکاری نفوذی ایجاد اتصال بین سطوح دو آلیاژ مختلف با کمترین تغییر شکل پلاستیک در فلزات پایه می باشد که در این پژوهش با اعمال فشار مناسب ۲۹ MPa اتصالی با جزئی ترین تغییر شکل پلاستیک حاصل شد.

می‌شوند.

۲- فاز دوم تنها زمانیکه فاز اول به ضخامت معینی برسد

شروع به رشد می‌کند.

۳- فرآیند تشکیل ترکیبات بین‌فلزی به شدت وابسته به

ضخامت فلزات پایه می‌باشد.

۴- موانع جوانه‌زنی فاز اول یا وجود نداشته و یا بسیار

اندک می‌باشند.

با توجه به اینکه انرژی اکتیواسیون نفوذ منیزیم در آلومینیوم (۹۲ kJ/mol) کمتر از انرژی اکتیواسیون نفوذ آلومینیوم در منیزیم (۱۴۴ kJ/mol) می‌باشد به همین دلیل منیزیم

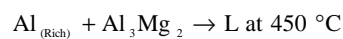
سریعتر نفوذ کرده و ناحیه انتقال منیزیم که غنی از منیزیم می‌باشد زودتر و قبل از ناحیه انتقال آلومینیوم تشکیل

می‌شود. شکل ۴ منحنی دوتایی در سیستم Mg-Al را نشان می‌دهد. دو نوع تحول یوتکتیک در نمودار فازی سیستم

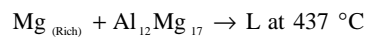
دوتایی Mg-Al در دماهای ۴۳۷ و ۴۵۰ °C وجود دارد، که در ذیل آمده‌اند. در این دما آلیاژ یوتکتیک Mg-Al کمترین

نقطه ذوب را در سیستم دوتایی دارا می‌باشد.

(۱)



(۲)



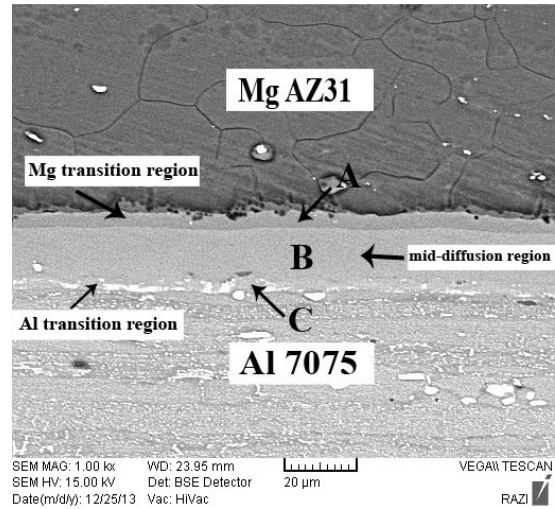
برخی از ترکیبات بین‌فلزی قابل شناسایی در این نمودار

شامل: Al_3Mg_2 ، $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ و $\text{Al}_{30}\text{Mg}_{23}$ می‌باشند.

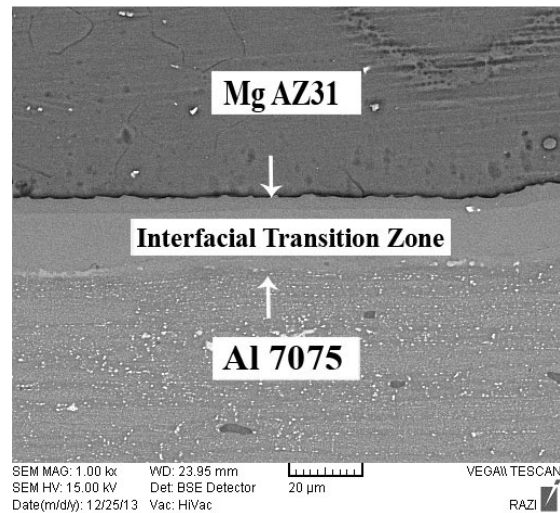
به منظور تعیین فازها و درصد عناصر تشکیل دهنده آنها از

آنالیز EDS استفاده شد. شکل ۵ نتایج آنالیز EDS از نواحی

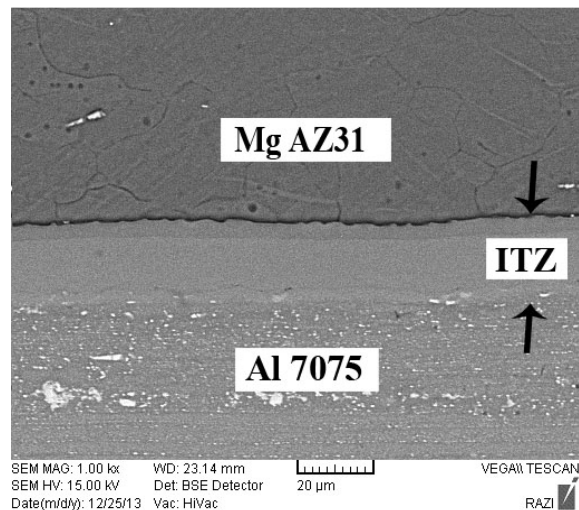
مشخص شده در شکل ۳-الف را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۳): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از اتصال‌های،

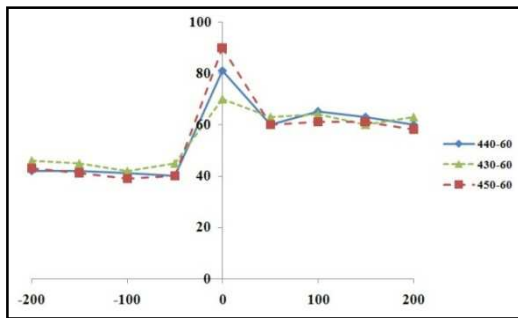
(الف) ۴۳۰-۶۰، (ب) ۴۴۰-۶۰ و (ج) ۴۵۰-۶۰.

۱- اصولاً ترکیبات بین‌فلزی به صورت پی در پی ظاهر

نواحی مشخص شده در شکل ۳-الف، ناحیه A حاوی منیزیم (۵۶/۴۵ درصد اتمی) و آلومینیوم (۴۳/۵۵ درصد اتمی) بوده که با توجه به دیاگرام فازی دوتایی آلومینیوم-منیزیم که در شکل ۴ آورده شده است، احتمال حضور فاز $Al_{12}Mg_{17}$ (γ) در این لایه پیش‌بینی می‌شود، ناحیه B حاوی منیزیم (۳۹/۹۸ درصد اتمی)، آلومینیوم (۵۸/۷۳ درصد اتمی) و روی (۱/۳۰ درصد اتمی) بوده که در این لایه احتمال تشکیل مخلوطی از فازهای $Al_{12}Mg_{17}$ و Al_3Mg_2 (β) (با درصد وزنی β بیشتر) وجود دارد. ناحیه C حاوی منیزیم (۲۴/۸۲ درصد اتمی)، آلومینیوم (۷۳/۵۷ درصد اتمی)، روی (۰/۸۷ درصد اتمی) و مس (۰/۷۴ درصد اتمی) می‌باشد. در این ناحیه با توجه به درصدهای اتمی عناصر تشکیل دهنده احتمال حضور مخلوطی از فازهای α و β پیش‌بینی شد.

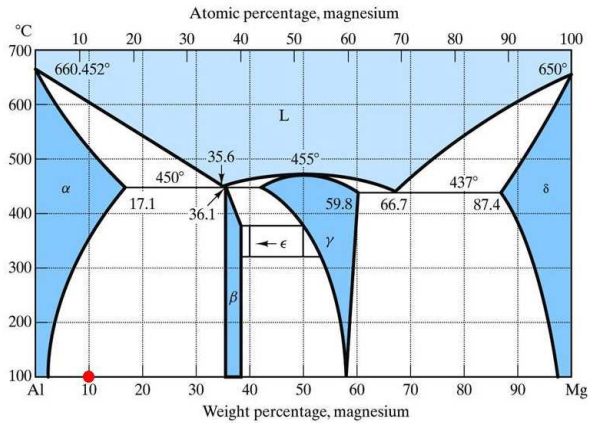
۳-۳- بررسی خواص مکانیکی اتصالات

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات انجام شده در دماهای مختلف آزمون‌های ریزسختی سنجی ویکرز و آزمون استحکام برشی بر روی اتصالات انجام شد. شکل ۶ نشان دهنده پروفیل ریزسختی در عرض اتصالات جوشکاری شده در زمان ثابت ۶۰ دقیقه و دماهای ۴۳۰، ۴۴۰ و ۴۵۰ °C می‌باشد.

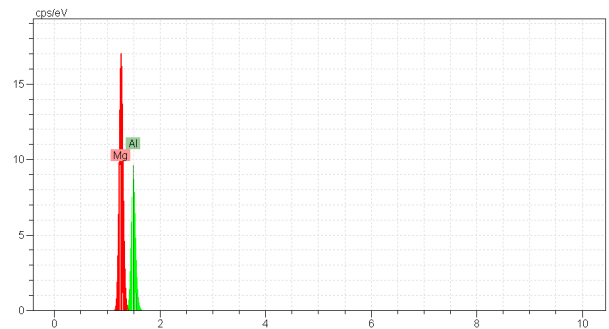


شکل (۶): پروفیل ریزسختی در عرض اتصالات‌های،

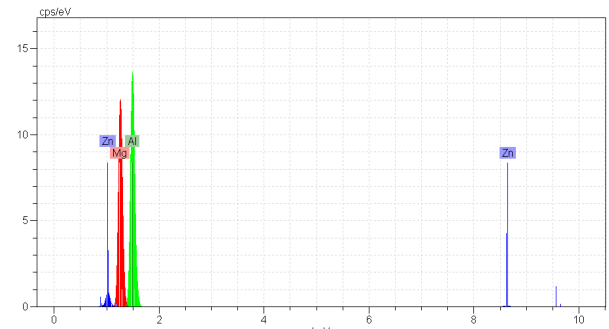
۴۵۰-۶۰ و ۴۴۰-۶۰ و ۴۳۰-۶۰.



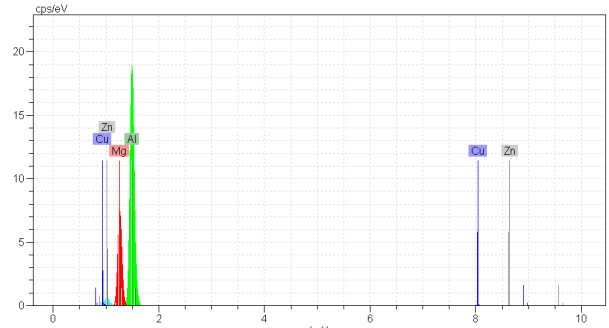
شکل (۴): دیاگرام دوتایی آلومینیوم-منیزیم [۵].



(الف)



(ب)

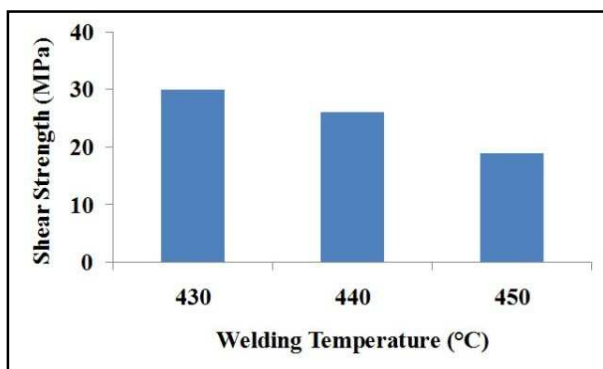


(ج)

شکل (۵): آنالیز EDS از نواحی شکل ۳-الف، A، B (ب و ج)

C.

اتصال گردیده که نتیجه آن افزایش سریعتر سطوح تماس موثر نمونه‌ها در فشار آزمایش و افزایش استحکام نمونه‌ها می‌باشد. با افزایش دما تا 430°C استحکام افزایش می‌یابد ولی در دماهای بالاتر از دمای 430°C بدلیل افزایش حجم ترکیبات ترد بین‌فلزی و افزایش بیش از حد سختی، کاهش استحکام رخ می‌دهد.



شکل (۷): تغییرات استحکام برشی اتصالات در، دماهای 430°C ، 440°C و 450°C و زمان ۶۰ دقیقه.

۴- نتیجه‌گیری

۱- اتصال نفوذی بین آلیاژهای 7075 آلومینیوم و AZ31 منیزیم در دماهای 430°C ، 440°C و 450°C با موفقیت انجام شد.

۲- با توجه به اختلاف کم بین ضرایب نفوذ ذاتی عناصر، در فصل مشترک‌های ایجاد شده حفرات کرکندال مشاهده نشد.

۳- پروفیل‌های ریزسختی نمونه‌ها حاکی از افزایش سختی با افزایش دما بوده است، بدلیل افزایش وجود محصولات واکنشی مختلف و فازهای ترد، سختی نمونه‌ها افزایش یافته است.

۴- بیشترین استحکام در دمای 430°C به میزان 30 MPa حاصل شد با افزایش دما کاهش استحکام رخ داد که ناشی از افزایش حجم ترکیبات بین‌فلزی ایجاد شده در فصول مشترک بود.

بر طبق نتایج، روند توزیع کلی ریزسختی در دماهای مختلف جوشکاری در سمت آلومینیوم و منیزیم مشابه بوده و مقدار ریزسختی ناگهان در ناحیه نفوذ افزایش می‌یابد. همچنین در هر دو طرف فلزات پایه بطور یکنواخت توزیع شده است. ملاحظه می‌شود که سختی در ناحیه واکنشی در بیشترین دما یعنی 450°C به میزان 90 HV و در کمترین دما، 430°C به میزان 70 HV می‌باشد. با کاهش دما و در نتیجه کاهش حجم ترکیبات ترد بین‌فلزی در ناحیه اتصال، کاهش در میزان ریزسختی رخ خواهد داد. در دمای 430°C سختی در ناحیه اتصال به سختی آلومینیوم نزدیک شده است که علت این مسأله می‌تواند حضور فاز α در ناحیه نفوذ باشد. همچنین استحکام برشی اتصال اندازه‌گیری شد و نتایج در شکل ۷ آورده شده است. آزمون استحکام برشی بر اساس استاندارد ASTM E229-97 صورت گرفت. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین استحکام در دمای 430°C به میزان 30 MPa حاصل شد. در این حالت فصل مشترک ایجاد شده شامل ترکیبی از محلول جامد و ترکیب ترد بین‌فلزی بود. با افزایش دما و افزایش حجم ترکیبات ترد بین‌فلزی استحکام در دمای 450°C به میزان 20 MPa کاهش یافت که همانطور که در میزان ریزسختی نیز ملاحظه شد در این دما بیشترین سختی در ناحیه نفوذ میانی وجود داشته و منجر به کاهش استحکام در این دما شده است. دما از سه طریق می‌تواند باعث افزایش استحکام اتصال‌ها شود. افزایش دما موجب افزایش ضرایب نفوذ، ترغیب فرآیند نفوذ و نیز افزایش میزان انحلال عناصر مختلف در یکدیگر می‌شود، همچنین با افزایش دما بواسطه تحریک اتمی بالاتر، میزان جرم انتقال یافته بیشتر شده و پیوندهای اتمی قویتری نیز ایجاد می‌شود. نهایتاً افزایش دما موجب نرم‌تر شدن سطوح

۵-مراجع

- [1] Kundu, S., Chatterjee, S. "Diffusion Bonding between Commercially Pure Titanium and Micro-Duplex Stainless Steel", *Materials Science and Engineering A*, 480, 316, 2008.
- [2] Yilmaz, O., Aksoy, M., "Investigation of Micro-Crack Occurrence Conditions in Diffusion Bonded Cu-304 Stainless Steel Couple", *Journal of Materials Processing Technology*, 121, 136, 2002.
- [3] Yilmaz, O., Celik, H., "Electrical and Thermal Properties of the Interface at Diffusion-Bonded and Soldered 3040 Stainless Steel and Copper Bimetal", *Journal of Materials Processing Technology*, 141, 67, 2003.
- [4] Hui, L., Ming, Q., Da, L.I., "The Effect of Intermetallic Compounds on laser Weldability of Dissimilar Metal Joint between Magnesium Alloy AZ31B and Aluminum Alloy 6061", *Laser Journal*, 28, 61, 2007.
- [5] Wang, J., Feng, J.C., Wang, Y.X., "Microstructure of Al-Mg Dissimilar Weld made by Cold Metal Transfer MIG Welding", *Mater. Sci. Technol.*, 24, 827, 2008.
- [6] Sun, D.Q., Gu, X.Y., Liu, W.H., "Transient Liquid Phase Bonding of Magnesium Alloy (Mg-3Al-1Zn) using Aluminium Interlayer", *Mater. Sci. Eng. A*, A391, 29, 2005.
- [7] Liu, P., Li, Y., Haoran, G., Juan, W., "Investigation of Interfacial Structure of Mg/Al Vacuum Diffusion Bonded Joint", *Vacuum*, 80, 395, 2006.
- [8] Li, Y., Liu, P., Wang, J., Ma, H., "XRD and SEM Analysis near the Diffusion Bonding Interface of Mg/Al Dissimilar Materials", *Vacuum*, 82, 15, 2008
- [9] Liu, L.M., Zhao, L.M., Xu, R.Z., "Effect of Interlayer Composition on the Microstructure and Strength of Diffusion Bonded Mg/Al Joint", *Materials and Design*, 30, 4548, 2009.
- [10] Jing, S., Ke-hong, Qi, W., De-ku, Z., Z., Jun, H., Jia-qi, G., "Effect of Joining Temperature on Microstructure and Properties of Diffusion Bonded Mg/Al Joints", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 22, 1961, 2012.
- [11] Jiang-wei, R., Ya-jiang, L., Tao, F., "Microstructure Characteristics in the Interface Zone of Ti/Al Diffusion Bonding", *Mater. Lett.*, 56, 647, 2002,
- [12] Ya-jiang, L., Juan, W., Yan-sheng, Y., Hui-qiang, W., Ji-cai, F., "Analysis of Microstructure in the Interface of Diffusion Welding for Fe₃Al/Q235 Dissimilar Material", *Transactions of the China Welding Institution*, 23, 25, 2002.
- [13] Mahendran, G., Balasubramanian, N., Senthilvelan, T., "Influences of Diffusion Bonding Process Parameters on Bond Characteristics of Mg-Cu Dissimilar Joints", *Trans. Non-Ferrous Met. Soc. China*, 20, 997, 2010.
- [14] Mahendran, G., Balasubramanian, N., Senthilvelan, T., "Developing Diffusion Bonding Windows for Joining AZ31B Magnesium-AA2024 Aluminium Alloys", *Materials and Design*, 30, 1240, 2009.
- [15] Fernandus, J. M., Senthilkumar, T., Balasubramanian, V., Rajakumar, S., "Optimising Diffusion Bonding Parameters to Maximize the Strength of AA6061 Aluminium and AZ31B Magnesium Alloy Joints", *Materials and Design*, 33, 31, 2012.
- [16] Fernandus, J. M., Senthilkumar, T., Balasubramanian, V., Rajakumar, S., "Developing Temperature-Time and Pressure-Time Diagrams for Diffusion Bonding AZ80 Magnesium and AA6061 Aluminium Alloys", *Materials and Design*, 32, 1651, 2011.