

# اثر دما بر ریز ساختار و تشکیل ترکیبات بین فلزی در اتصال Mg/Al انجام شده به روش جوشکاری نفوذی

محمد عمار مفید<sup>۱\*</sup>، مصطفی حاجیان حیدری<sup>۲</sup>، احسان لریایی<sup>۳</sup>، هاتف شاکری<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی نفت معدن و مواد، دانشکده فنی مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*مستول مکاتبات: moh.ammar\_mofid@iauctb.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۴)

**چکیده:** اتصال‌دهی نفوذی دو آلیاژ غیر همجنس Al ۵۰۸۳ و MgAZ ۳۱ در دماهای ۴۲۰، ۴۳۰، ۴۴۰ و ۴۵۰°C در مدت زمان اتصال‌دهی ۶۰ دقیقه انجام شد. جهت بررسی مشخصه‌های ریز ساختاری در ناحیه اتصال، از میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM)، طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS) و پراش پرتو X (XRD) استفاده گردید. نتایج نشان داد که ایجاد اتصال را می‌توان به نفوذ حالت جامد Mg و Al به داخل آلیاژهای Al ۵۰۸۳ و MgAZ ۳۱ و به دنبال آن، تشکیل یوتکتیک و ذوب قانونمند در امتداد فصل مشترک مربوط دانست. در دمای اتصال‌دهی ۴۳۰°C، درشت شدن دانه القا شده به وسیله نفوذ، در فصل مشترک مشاهده گردید. با افزایش دمای اتصال‌دهی، نفوذ پذیری اتمی افزایش یافته و همین امر، ایجاد اتصال شیمیایی را تسهیل و تسریع می‌نماید. در دمای اتصال‌دهی ۴۴۰°C، در مرکز جوش، ناحیه‌ای با شکل غیر عادی مشاهده گردید که ریز ساختار آن متفاوت از دو ماده پایه می‌باشد. این ناحیه دارای شکل غیرعادی، حاوی حجم زیادی ترکیب بین فلزی Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> بوده و سختی به مراتب بالاتری را در مرکز جوش از خود نشان داد. تحقیق حاضر نشان می‌دهد، ذوب قانونمند باعث ایجاد ترکیب بین فلزی Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> در مرکز جوش گشته است.

## واژه‌های کلیدی:

اتصال‌دهی نفوذی، آلیاژ آلومینیوم، آلیاژ منیزیم، فصل مشترک، ریز ساختار، ترکیب بین فلزی.

## ۱- مقدمه

مداوم و فزاینده‌ای که از Al و Mg در صنعت می‌شود و همچنین کاربردهای بالقوه زیادی که سازه‌های هیبریدی Al/Mg می‌توانند داشته باشند، لازم است راه حلی برای مشکل اتصال‌دهی این دو ماده به یکدیگر ارائه گردد. بزرگترین مشکل در جوشکاری Al و Mg، تشکیل ترکیبات بین فلزی (IMCs) سخت و تردی است که تاثیر مخربی بر استحکام اتصال خواهند داشت [۲]. تحقیقات پرشماری در زمینه اتصال‌دهی غیر همجنس Al و Mg به روش

در استفاده از آلیاژهای Mg، اتصال‌دهی آنها به فلزات دیگر از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است تا بتوان از محسنات هر کدام، در ترکیب با هم استفاده نمود [۱]. انتظار می‌رود در آینده، هم از Mg و هم از Al بتوان به طور گسترده‌ای در صنعت استفاده کرد. ترکیب Al و Mg در یک سازه هیبریدی، استفاده از این دو آلیاژ را در کاربردهای دیگری نیز، که بحث کاهش وزن در آنها از اهمیت برخوردار است، امکان پذیر خواهد ساخت. نظر به استفاده

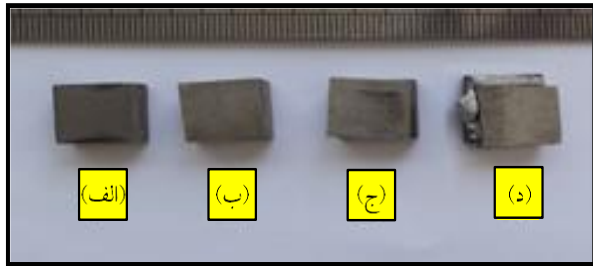
با این حال اتصال‌دهی نفوذی، بین آلیاژهای منیزیم AZ31 و آلومینیوم ۵۰۸۳، در منابع موجود بی سابقه بوده است. از همین رو در تحقیق حاضر، احتمال تشکیل یوتکتیک در ناحیه اتصال مورد بررسی قرار گرفته و مشخصه‌های ریز ساختاری در محل فصل مشترک، به عنوان تابعی از دمای اتصال‌دهی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. به همین منظور عملیات اتصال‌دهی، در دماهایی نزدیک به دماهای یوتکتیک منیزیم و آلومینیوم در نمودار دوتایی آنها ( $437^{\circ}\text{C}$  و  $450^{\circ}\text{C}$ ) انجام پذیرفت. ریز ساختارهای مجاور فصل مشترک جوش‌های نفوذی غیر همجنس Mg/Al، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. اجزای فازی در منطقه نفوذی Mg/Al، توسط پراش پرتو X - XRD) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تحقیق حاضر، گامی است در جهت بهبود عملکرد ریز ساختار، در اتصال نفوذی و افق‌های جدیدی را برای استفاده از مواد سبک غیر همجنس Mg/Al می‌گشاید.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

مواد پایه مورد استفاده در این تحقیق عبارت بودند از ورق‌های با ضخامت ۳ mm از آلیاژ ۵۰۸۳ Al با ترکیب  $0.1\text{C} - 0.6\text{Mn}$  -  $0.3\text{Fe} - 0.2\text{Si} - 4.6\text{Mg} - \text{Al}$  (درصد وزنی) و آلیاژ C - O ۳۱ MgAZ با ترکیب  $0.2\text{Mn} - 3.1\text{Zn} - 5.3\text{Al} - \text{Mg}$  (درصد وزنی). نمونه‌ها به صورت مربعی شکل ( $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ) از ورق‌هایی با ضخامت ۳ mm از جنس آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم ماشین‌کاری شدند. دو سطح نمونه‌ها به روش‌های معمول سمباده زنی، آماده‌سازی شدند، طوری که در آخرین مرحله از کاغذ سمباده شماره ۱۲۰۰ استفاده گردید. این نمونه‌ها به صورت فراصوتی (اولتراسونیک) در یک حمام استن تحت شستشو قرار گرفتند تا آلودگی‌های چسبیده به سطح آن‌ها زدوده گردد. سپس این نمونه‌ها در هوا خشک شدند. جوشکاری نفوذی تحت فشار اتصال‌دهی ثابت ۱ Mpa و دماهای اتصال‌دهی  $420 - 450^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان اتصال‌دهی ۶۰ min انجام پذیرفت. فشار خلاء در کمتر از  $10^{-3} \times 6\text{Pa}$  نگه داشته شد. در فرآیند اتصال‌دهی نرخ گرمایش

های گوناگون انجام شده که در مقالات و تحقیقات قبل می‌توان آن‌ها را یافت. با توجه به مشکلات متعدد جوشکاری ذوبی این آلیاژها نظیر، ترکهای حرارتی، ناخالصی‌های اکسیدی و تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد، نظرها به سمت اتصال‌دهی این دو آلیاژ از طریق روش‌های حالت جامد جلب شده است [۳-۶]. فرآیندهای جوشکاری حالت - جامد مورد استفاده در اتصال‌دهی این دو آلیاژ عبارتند از: روش‌های جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری انفجاری، جوشکاری فاز مایع گذرا (TLP)<sup>۲</sup> و جوشکاری نفوذی<sup>۳</sup> [۷-۱۱]. جوشکاری نفوذی، یکی از روش‌های حالت جامدی است که برای اتصال‌دهی مواد غیر همجنس، بسیار مناسب می‌باشد. متغیرهای فرایندی مهم، در جوشکاری نفوذی عبارتند از: دما، فشار، زمان و زبری سطح. مشخص شده که دمای اتصال‌دهی، تاثیر بسیار بیشتری بر استحکام برشی و استحکام چسبندگی اتصالاتی از این نوع دارد و بعد از آن، فشار اتصال‌دهی، زمان نگهداری و زبری سطح حائز اهمیت هستند [۷-۸]. تحت متغیرهای مختلف، ریز ساختارهای متفاوتی ایجاد گردید. با این حال، نتایج مبین آن است که حتی در هنگام استفاده از متغیرهای بهینه نیز تشکیل ترکیبات بین فلزی در ناحیه جوش مشاهده می‌شود [۱۳-۱۴].

برای دستیابی به بیشینه استحکام باید تشکیل و رشد فازهای بین فلزی به نحو صحیحی کنترل شوند. در منابع موجود، تحقیقات اندکی به اتصال‌دهی غیر همجنس آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم از روش جوشکاری نفوذی پرداخته‌اند [۸، ۱۵-۱۶]. لیو و همکارانش معادله‌های سینتیکی مرتبط با رشد فازهای بین فلزی را در اتصال‌دهی نفوذی آلیاژهای منیزیم و آلومینیوم ۱۰۶۰ توسعه دادند [۱۵]. مهندران و همکارانش نقشه‌های مرجعی را برای انتخاب متغیرهای مناسب جهت دستیابی به اتصالاتی با کیفیت عالی بین آلیاژهای منیزیم AZ31 و آلومینیوم ۲۰۲۴، ارائه نمودند [۸]. جوزف - فرناندوس و همکارانش نمودارهای دما - زمان و فشار - زمان را جهت انتخاب متغیرهای مناسب برای اتصال‌دهی نفوذی آلیاژهای منیزیم AZ80 و آلومینیوم ۶۰۶۱ رسم نمودند [۱۶].



شکل (۱): تصاویر میکروسکوپی از اتصالات جوشکاری شده در زمان ۶۰ min و دمای اتصال‌دهی: (الف): ۴۲۰ °C، (ب): ۴۳۰ °C، (ج): ۴۴۰ °C و (د): ۴۵۰ °C

مشاهده می‌شود که اتصال با تغییر شکل پلاستیک نسبتاً اندکی حاصل شده، اما در دمای اتصال‌دهی ۴۵۰ °C ذوب شدگی در فصل مشترک اتصال روی هم، اتفاق افتاده است. جهت بررسی تشکیل لایه نفوذی در فصل مشترک، تجزیه و تحلیل ریز ساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام گرفت. شکل (۲-الف)، نشان دهنده تصویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصالی است که در دمای اتصال‌دهی ۴۲۰ °C ساخته شده است. تحت این دمای اتصال‌دهی، لایه بسیار نازکی به ضخامت ۲۷ μm در فصل مشترک تشکیل شده است. با این حال، این لایه میانی، غیر پیوسته بوده و عدم وجود آن در سمت راست این تصویر، به وضوح قابل مشاهده است. این موضوع نشان می‌دهد که اگر دمای اتصال‌دهی کمتر از ۴۲۰ °C می‌بود، هیچ اتصال (پیوندی) بین آلیاژهای Mg و Al برقرار نمی‌شد و این بر می‌گردد به ناکافی بودن دمایی که بتواند باعث نفوذ اتم‌ها شود. این مسئله می‌تواند به خاطر پیوند ضعیف سطح اتصال‌دهی شده و همچنین تحریک حرارتی اندک باشد. واکنش پیوند، به نفوذ اتم‌ها مبتنی بوده و چنین واکنشی در دمای اتصال‌دهی بالاتر شدیدتر می‌باشد. دمای اتصال‌دهی بالاتر، باعث بهبود پیدا کردن تماس طرفین خواهد شد. همچنین در دمای پایین، سیلان فلز به خوبی انجام نمی‌شود، چرا که استحکام تسلیم فلزات پایه، هنوز در حد بالایی قرار دارد و همین مساله باعث فقدان به هم پیوستن و یکی شدن دو سطح مجاور خواهد شد. به علاوه، کشش سطحی مرز دانه‌ای و پویایی مرزهای دانه، در دمای پایین، بسیار کمتر هستند و همین عوامل هستند که حرکت اولیه

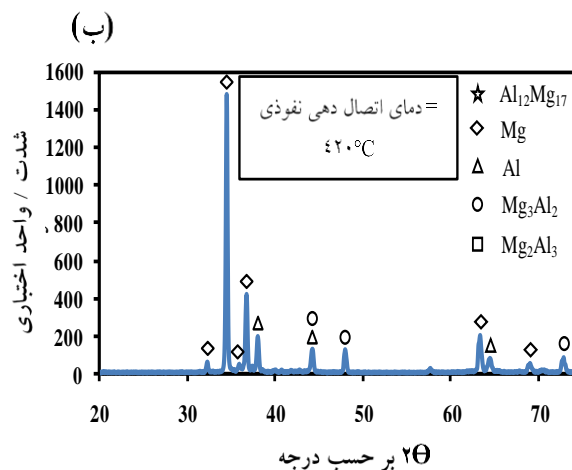
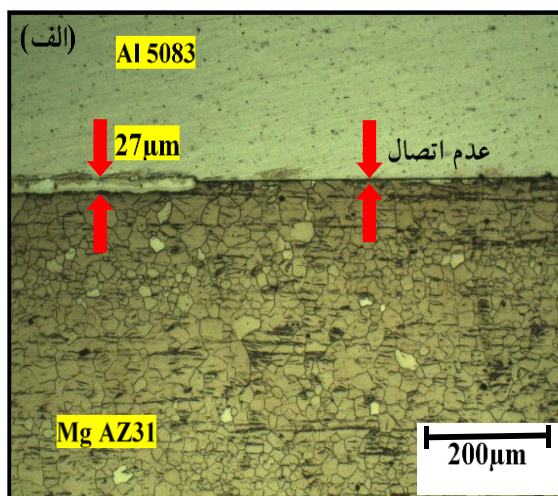
تمام نمونه‌ها در مقدار ۱۵ °C/min ثابت نگه داشته شد و سرمایش در یک محفظه عملیاتی که تحت خلاء قرار داشت، انجام پذیرفت. نمونه‌های جوشکاری شده، به وسیله یک ماشین برشکاری مقطع زنی شدند.

پس از انجام جوشکاری نفوذی، سطح - مقطع‌های دو نمونه به وسیله میکروسکوپ نوری (OM) مورد مطالعه قرار گرفت. جهت انجام میکروسکوپی نوری، نمونه‌ها در یک محلول ۵ ml اسید استیک + ۵ g اسید پیکریک + ۵ ml آب + ۱۰۰ ml اتانول حکاکی شدند تا سمت Mg جوش آشکار گردد. ترکیب شیمیایی فازهای ثانویه موجود در مناطق جوش با استفاده از SEM تجهیز شده به وسیله EDS مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، فازهای ثانویه موجود در فصل مشترک، با استفاده از روش پراش پرتو X - (XRD) مورد شناسایی قرار گرفتند. نمونه‌های مورد استفاده برای XRD، به روش پودر کردن قطعاتی از فصل مشترک جوش اتصال نفوذی داده شده، که احتمال می‌رفت بیشتر حاوی فازهای ثانویه باشد، تهیه شدند. قطعات با دقت زیاد از منطقه‌ای که احتمال می‌رفت عموماً محتوی فازهای ثانویه باشد برشکاری گردیدند. با این حال، این قطعات عملاً حاوی حجم اندکی از دو فلز پایه نیز بودند. جهت به دست آوردن مقادیر ریز سختی و بکرز در امتداد مناطق جوش از یک روش آزمایش سختی قابل حمل از طریق روش امپدانس تماس فرا صوتی<sup>۴</sup> (ASTM A1.38) استفاده گردید [۱۷]. اندازه‌گیری‌ها در خطی به طول ۲ cm از سطح مقطع (که از سمت یک فلز پایه به سمت ناحیه انتقالی و از آنجا به فلز پایه دیگر امتداد داشت) و با استفاده از بار ۱۰ N انجام شدند.

### ۳- نتایج و بحث

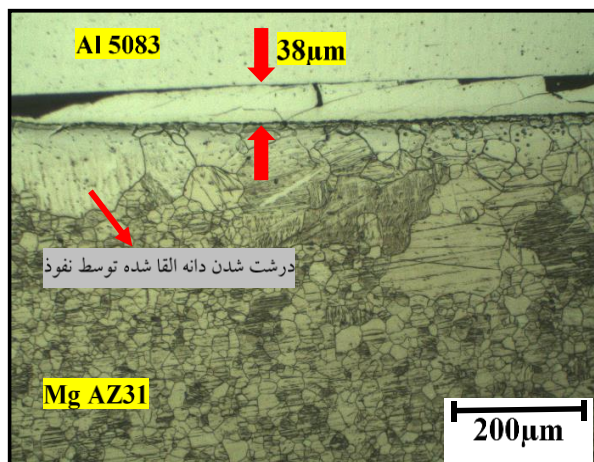
شکل (۱) تصاویر میکروسکوپی از اتصالات انجام شده در زمان ۶۰ min و دمای اتصال‌دهی ۴۲۰، ۴۳۰، ۴۴۰ و ۴۵۰ °C، را نشان می‌دهد.

مرزهای دانه مستقر در فصل مشترک را کنترل می‌نمایند. در دمای پایین، پویایی<sup>۵</sup> مرز، نسبتاً اندک می‌باشد [۱۸].



شکل (۲): (الف): تصویر میکروسکوپ نوری و (ب): الگوی پراش پرتو X از فصل مشترک اتصال ساخته شده در دمای اتصال دهی ۴۲۰ °C و در زمان اتصال دهی ۶۰ min

واکنش شیمیایی برسد، فاز ترکیبی جدیدی تشکیل می‌شود. طبق نظر فیلیبرت و همکارانش [۱۹-۲۰] تشکیل ترکیبات بین فلزی در هنگام جوشکاری نفوذی به صورت متوالی انجام شده و شروع جوانه زنی و رشد فاز ثانویه درست هنگامی اتفاق می‌افتد که فاز اولیه به ضخامت معینی برسد. بررسی ریز ساختاری، همچنین نشان دهنده مقادیری درشت شدن دانه ها در داخل آلیاژ Mg در نواحی مجاور فصل مشترک است، (شکل (۳) ملاحظه گردد).



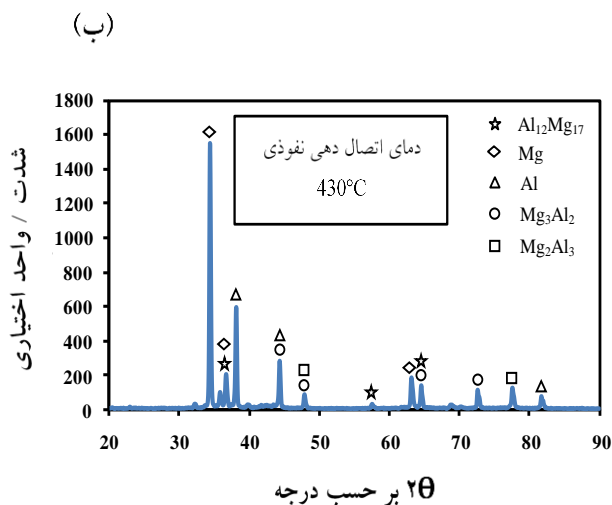
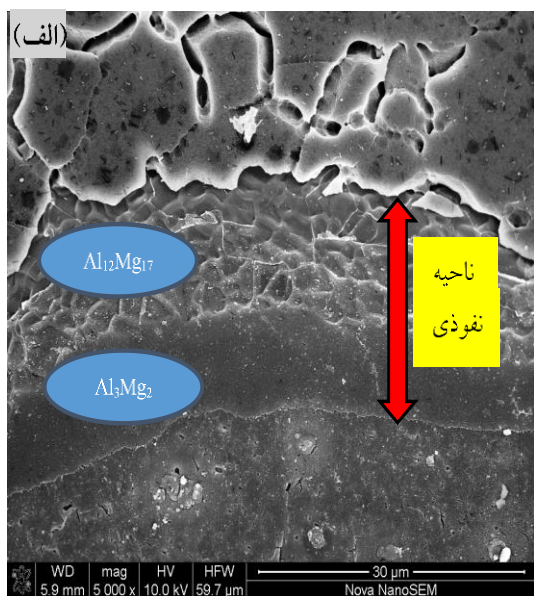
شکل (۳): تصویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصال ساخته شده در دمای اتصال دهی ۴۳۰ °C و زمان اتصال دهی ۶۰ min

عدم وجود فازهای بین فلزی در فصل مشترک این جوش، با استفاده از روش پرتو-X (XRD) مورد تایید قرار گرفت. الگوی پراش پرتو - X مربوط به اتصال جوشکاری نفوذی شده در ۴۲۰ °C در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. الگوی پراش پرتو-X موید فقدان تشکیل ترکیبات بین فلزی به خاطر ناکافی بودن دما، برای نفوذ اتم ها است. نفوذ پذیری اتم ها با افزایش دما، افزایش پیدا می‌کند و همین امر ایجاد پیوند شیمیایی را تسهیل و تسریع می‌نماید. شکل (۳) نشان می‌دهد که افزایش دمای اتصال دهی نفوذی به ۴۳۰ °C، انتقال جرم عناصر آلیاژی را در عرض فصل مشترک افزایش می‌دهد. دلیل افزایش کسر حجمی محصولات واکنشی در این محدوده نیز همین است. از همین روست که یک لایه نفوذی با ضخامت ۳۸ μm در شرایط دمای جوشکاری ۴۳۰ °C تشکیل می‌شود. تشکیل این لایه باعث تردی اتصال می‌شود. با این حال، ریمش پلاستیک سطوح متقابل، باعث تماس تنگاتنگ تر می‌گردد که به نوبه خود، پدیده ترد شدن ناشی از تشکیل فازهای بین فلزی را جبران و خشی می‌نماید. فاز جدیدی که در ناحیه انتقالی تشکیل می‌شود، در اثر نفوذ اتم های Mg و Al به وجود می‌آید. هر گاه غلظت اتم ها به میزان لازم برای انجام

(۱) یک انتقال ماکروسکوپی اتم ها بین دو فلز پایه به تبع دمای بالا و (۲) واکنش شیمیایی که هنگامی اتفاق می افتد که غلظت اتم های محلول، در مجاورت فصل مشترک فازی به سطح معینی برسد و به این ترتیب فاز جدید ایجاد گردد. هنگامی که غلظت اتم ها به سطح مورد نیاز برای انجام واکنش شیمیایی رسید، فاز ترکیبی جدید تشکیل می شود. یک واکنش بین - نفوذی ساده بین اتم های Mg و Al، دلیل تشکیل فاز ترکیبی در هنگام جوشکاری نفوذی در دمای بالاتر می باشد. برای اثبات تشکیل ترکیبات بین فلزی مختلف در ناحیه اتصال از XRD استفاده گردید. شکل (۴-ب) الگوی XRD مربوط به اتصال جوشکاری نفوذی، انجام شده در  $430^{\circ}\text{C}$  را نشان می دهد. در این الگو قله های متعددی قابل مشاهده است که بعضی از آن ها به خاطر تشکیل ترکیبات بین فلزی، ایجاد شده اند و بقیه نیز به قله های فلزهای پایه آلومینیوم و منیزیم مربوط می شوند. قله های مربوط به ترکیبات بین فلزی،  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  و  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  و  $\text{Al}_2\text{Mg}_3$  تشخیص داده شدند.

این شکل از درشت شدن دانه القا شده توسط نفوذ، توسط محققین قبلی نیز مشاهده شده است، اما آن ها هیچ توضیح روشنی راجع به آن ارائه نداده اند [۲۱]. وجود آخا لها می تواند ماده را در برابر رشد دانه بسیار مقاوم سازد. اما این مقاومت در برابر رشد دانه ممکن است در دماهای به میزان کافی بالا شکسته شود. نتیجه، رشد دانه ناپیوسته<sup>۷</sup> یا رشد دانه اغراق آمیز<sup>۸</sup> به صورتی که در شکل ۳ مشاهده می شود خواهد بود. حل شدن ذرات فاز - ثانویه یا غلبه یافتن بر مقاومت آن ها به تعدادی از دانه ها اجازه رشد، به قیمت از بین رفتن سایر دانه ها را می دهد.

شکل (۴-الف) تصویر SEM اتصال را نشان می دهد. یک مرز آشکار و واضح ما بین فلز پایه Mg و ناحیه نفوذی وجود دارد. با این وجود، این مرز را نمی توان بین فلز پایه Al و ناحیه نفوذی تشخیص داد. بر اساس نمودار دو تایی آلومینیوم - منیزیم [۲۲] و تحت شرایط نفوذ انتظار می رود دو لایه متوالی از فازهای بین فلزی در هنگام جوشکاری نفوذی تشکیل شوند:  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  و  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ . فرآیند واکنش نفوذ بین Mg و Al مشتمل می شود بر



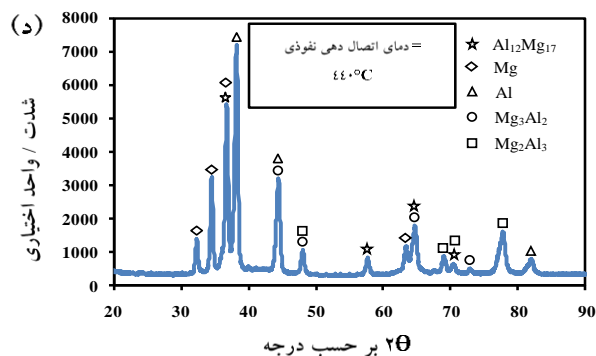
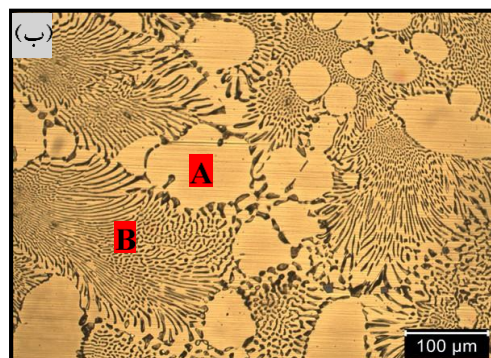
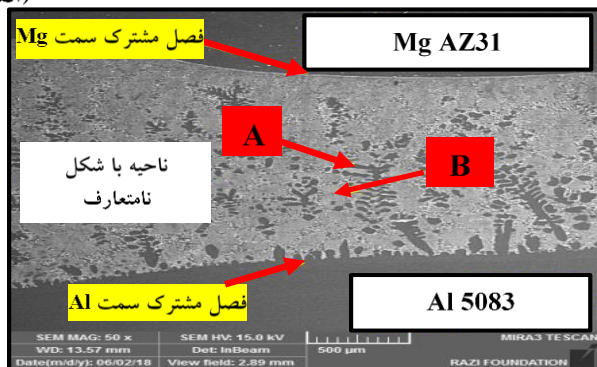
شکل (۴): (الف): تصویر SEM و (ب): الگوی XRD از اتصال جوشکاری نفوذی انجام شده در دمای اتصال دهی  $430^{\circ}\text{C}$  و زمان اتصال دهی ۶۰ min



نامتعارف در مرکز جوش است (به ضخامت  $60\ \mu\text{m}$ ). تصویر میکروسکوپ نوری از این ناحیه با شکل نامتعارف، در شکل (۵-ب) نشان داده شده است.

تصویر SEM جوش نفوذی غیر همجنس انجام شده در دمای  $440^\circ\text{C}$  برای مدت زمان جوشکاری  $60\ \text{min}$  در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. این جوش فاقد هر گونه عیب بزرگ می-باشد. اما حاوی یک لایه بسیار ضخیم از ناحیه ای با شکل

(الف)

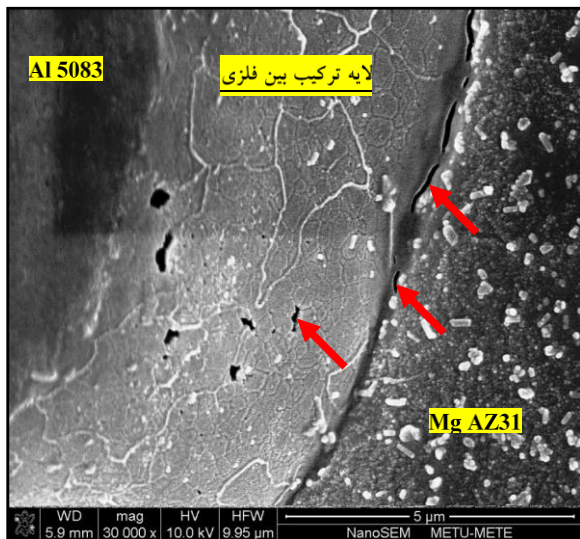


شکل (۵): (الف): تصویر SEM، (ب): تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه با شکل نامتعارف، (ج): تشکیل مذاب یوتکتیک در سمت Al فصل مشترک و (د): الگوی XRD از اتصال نفوذی غیر همجنس ایجاد شده در دمای  $440^\circ\text{C}$  و در زمان  $60\ \text{min}$

ب) از  $38\ \text{wtAl}$  و  $62\ \text{wtMg}$  تشکیل شده در حالی که فاز تیره محتوی  $35\ \text{wtAl}$  و  $65\ \text{wtMg}$  است. این نتایج نشان می دهند که فازهای سفید و سیاه در شکل (۵-ب)، به ترتیب ترکیب بین فلزی  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  و محلول جامد Mg هستند. بر اساس نتایج به دست آمده ضخامت لایه های تعاملی در دمای جوشکاری بالاتر ( $440^\circ\text{C}$ ) بیشتر از دماهای جوشکاری پایین تر می باشد. در جوشکاری نفوذی، هر گاه ترکیب، به یک سطح بحرانی برای انجام واکنش برسد، واکنش بین عناصر اتفاق می افتد [۲۳].

به نظر می رسد که ناحیه با شکل نامتعارف دارای ریز ساختاری انجمادی است. ریز ساختار، متشکل از دو ناحیه «A» و «B» به صورت نشان داده شده در شکل (۵-ب) است. ناحیه «A» متشکل از فقط یک فاز سفید رنگ است در حالی که ناحیه «B» دارای یک ریز ساختار یوتکتیک است که از دو فاز روشن و تیره تشکیل شده است. این ریز ساختار، کاملاً متفاوت از ریز ساختار دو فلز پایه است. توزیع Al و Mg در ناحیه با شکل نامتعارف توسط EDS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تجزیه و تحلیل کمی ترکیبات شیمیایی با استفاده از EDS نشان داد که فاز روشن در شکل (۵-ب)

متفاوتی در هر دو طرف اتصال اتفاق می‌افتد. در همین حال، تشکیل محلول جامد فوق اشباع نیز انجام می‌شود. جوانه زنی بلور فازهای جدید در عیوب انجام می‌شود. هر جا غلظت عنصر نفوذ کرده بالا باشد، جوانه زنی بلور ترکیبات بین فلزی و رشد آنها در امتداد فصل مشترک اتفاق خواهد افتاد. بسیاری از این جوانه های رشد کرده به یکدیگر ملحق شده و معمولاً به صورت طولی رشد می‌نمایند (نگاه کنید به شکل (۵-ج)). پس از آن، جوانه زنی بلوری ترکیب بین فلزی دوم و رشد آن در فصل مشترک انجام خواهد شد. وجود فازهای بین فلزی در ناحیه فعل و انفعالی، با استفاده از روش پراش پرتو X (XRD) مورد تایید قرار گرفت. الگوی پراش پرتو X- اتصال جوشکاری نفوذی شده در  $440^{\circ}\text{C}$  در شکل (۵-د) نشان داده شده است. این الگوی XRD تشکیل ترکیبات بین فلزی نظیر  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  و  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  و  $\text{Al}_2\text{Mg}_3$  را در منطقه واکنش به اثبات می‌رساند. شکل (۶) نشان می‌دهد که حفرات کرکندال به خاطر ضریب نفوذ بالاتر اتم های منیزیم در آلومینیوم، در سمت منیزیم تشکیل شده اند.



شکل (۶): حفرات کرکندال و رسوبات متعدد در فصل مشترک جوش نفوذی انجام شده در دمای اتصال دهی  $440^{\circ}\text{C}$  و در زمان اتصال دهی min ۶۰

این در تضاد با نتایج سایر محققین، مثلاً جعفریان و همکارانش [۲۵] است که چنین پدیده ای را به هنگام جوشکاری نفوذی

جدول (۱) ضخامت میانگین لایه های تعاملی را تحت شرایط مختلف نشان می‌دهد.

جدول (۱): ضخامت متوسط لایه های تعاملی در دماهای اتصال دهی مختلف

دمای اتصال دهی نفوذی	$420^{\circ}\text{C}$	$430^{\circ}\text{C}$	$440^{\circ}\text{C}$
ضخامت لایه های تعاملی	$27\ \mu\text{m}$	$38\ \mu\text{m}$	$\approx 60\ \mu\text{m}$

اعتقاد بر این است که تشکیل پیوند متالورژیکی در آلایژهای  $\text{Al}_{5083}$  و  $\text{MgAZ31}$ ، به دو سازوکار وابسته است. اول اینکه نفوذ حالت - جامد در فصل مشترک اتفاق می‌افتد. پس از آنکه نفوذ  $\text{Al}$  و  $\text{Mg}$  اتفاق افتاد، در ادامه تشکیل مذاب یوتکتیک در فصل مشترک آلایژ  $\text{Al}$  رخ می‌دهد. این موضوع را می‌توان در شکل ۵ ج مشاهده نمود. طبق نمودار فاز  $\text{Al-Mg}$  هنگامی که  $\text{Al}$  و  $\text{Mg}$  با هم حرارت داده می‌شوند، ترکیبات بین فلزی  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  و  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  می‌توانند تشکیل شوند، اولی در سمت  $\text{Al}$  و دومی در سمت  $\text{Mg}$ . با تداوم حرارت دهی، واکنش یوتکتیک  $\text{Mg} + \text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} \rightarrow \text{L}$  در دمای یوتکتیک  $437^{\circ}\text{C}$  و واکنش یوتکتیک  $\text{Al} + \text{Al}_3\text{Mg}_2 \rightarrow \text{L}$  در دمای یوتکتیک  $450^{\circ}\text{C}$  اتفاق می‌افتد. به این نوع از تشکیل مذاب، ذوب قانونمند<sup>۹</sup> گفته می‌شود [۲۴]. جوشکاری نفوذی یک فرآیند اتصال دهی حالت - جامد است که در آن معمولاً فلز جوش ذوب نمی‌شود. اما در مورد جوشکاری نفوذی غیر همجنس، این امکان وجود دارد که ذوب قانونمند در حین نفوذ در جوشکاری نفوذی اتفاق افتد. نفوذ متقابل شدید می‌تواند به صورت قانون مند فاز مذابی را تشکیل دهد. این اتفاق زمانی می‌افتد که ماده به صورت ثابت در دمایی بالاتر از  $435^{\circ}\text{C}$  نگه داشته شود. این می‌تواند باعث تامین مذاب در امتداد فصل مشترک آلایژ  $\text{Al}$  گردد. انحلال و ناحیه پهن سازی شده در اتصال دهی فاز مذاب گذرا در مورد اتصال ساخته شده در  $440^{\circ}\text{C}$  به وضوح قابل مشاهده است (نگاه کنید به شکل (۵-الف)). علاوه بر این، فرآیند تشکیل ترکیبات بین فلزی، بستگی زیادی به ضخامت فلزات پایه دارد. در اولین مراحل تشکیل و رشد ترکیبات بین فلزی در هنگام جوشکاری نفوذی، نفوذ با نرخ های

اتصال نفوذی غیر همجنس  $Al\ 5.83$  و  $MgAZ\ 31$  در دماهای اتصال دهی مختلف و زمان اتصال دهی ۶۰ min انجام شد. نتایج حاصله را می توان به صورت زیر مرور کرد.

۱- در دمای اتصال دهی  $420\ ^\circ C$ ، یک لایه بسیار نازک به ضخامت  $27\ \mu m$  در فصل مشترک تشکیل شد. با این وجود، این لایه ناپیوسته و منقطع بود. در این حالت، دما برای نفوذ دادن اتم ها ناکافی بود.

۲- با افزایش دمای اتصال دهی به  $430\ ^\circ C$ ، نفوذ پذیری اتمی افزایش پیدا می کند و همین باعث تسهیل و تسریع ایجاد پیوند شیمیایی می گردد. در این حالت، یک لایه نفوذی ضخیم  $38\ \mu m$  در محل فصل مشترک تشکیل شد. مورد دیگری که در مورد این نمونه مشاهده شد، درشت شدن دانه القا شده توسط نفوذ بود.

۳- در دمای اتصال دهی  $440\ ^\circ C$ ، جوش حاوی لایه ای بسیار ضخیم از یک ناحیه با شکل نامتعارف در مرکز جوش بود (ضخامت این لایه  $600\ \mu m$  بود). این ناحیه با شکل نامتعارف محتوی حجم بزرگی از ترکیب بین فلزی  $Al_{12}Mg_{17}$  بود و ریز ساختار انجمادی به همراه سختی به مراتب بالاتری در مرکز جوش از خود نشان داد.

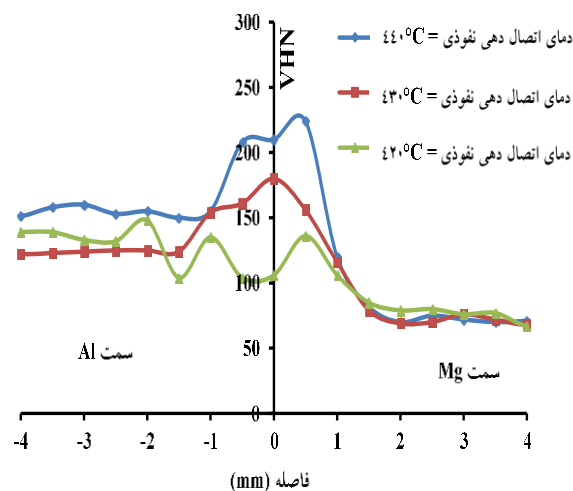
۴- ذوب قانونمند باعث تشکیل ترکیب بین فلزی در مرکز جوش گردید.

## ۵- مراجع

- [1] L. M. Liu, S. X. Wang & M. L. Zhu, "Study on TIG welding of dissimilar Mg Alloy and copper with Fe as interlayer", *Sci Technol Weld Join*, Vol. 11, pp. 523-5, 2006.
- [2] P. Liu, Y. J. Li, H. R. Geng & J. Wang, "Microstructure characteristics in TIG welded joint of Mg Al dissimilar materials", *Mater. Lett.*, Vol. 61, pp. 1288-1291, 2007.
- [3] 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.

آلومینیوم و منیزیم مشاهده نکردند. علاوه بر این، شکل (۶) نشان دهنده تعداد زیادی از رسوباتی است که از آلیاژ سازی بین آلومینیوم و منیزیم نشأت گرفته اند. اگر جوشکاری در چند درجه بالاتر از دمای یوتکتیک انجام پذیرد، باعث ایجاد فازهای مذابی خواهد شد. هر چه دمای جوشکاری بالاتر باشد، غلظت رسوبات آلیاژی در فاز  $Al_{12}Mg_{17}$  نیز بیشتر خواهد شد (شکل ۶).

پروفیل های ریز سختی ناحیه اتصال برای جوش های انجام شده در  $420\ ^\circ C$  و  $430\ ^\circ C$  در شکل (۷) نشان داده شده اند. مشاهده می شود که مقدار سختی در فصل مشترک جوش بیشینه است و با دور شدن از فصل مشترک، میزان سختی کاهش پیدا می کند. تعدادی مقادیر بسیار بالای سختی در فصل مشترک های جوش های نفوذی مشاهده می شود. فلزات پایه آلیاژهای  $Al$  و  $Mg$  به ترتیب دارای سختی متوسط  $128$  و  $72\ Hv$  هستند. این در حالی است که ناحیه بر همکنش در مرکز جوش، سختی بین  $120$  و  $224\ Hv$  از خود نشان می دهد. این سختی بالا به خاطر تشکیل ترکیبات بین فلزی ایجاد شده است.



شکل (۷): منحنی های ریز سختی از ناحیه اتصال برای جوش های ساخته شده در  $420\ ^\circ C$  و  $430\ ^\circ C$  و  $440\ ^\circ C$

## ۴- نتیجه گیری



- diffusion bonding parameters in AA6061-T6 Aluminum and AZ80 magnesium alloy dissimilar joints”, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 21, pp. 2303–2315, 2012.
- [13] J. Shang, K. H. Wang, Q. Zhou, D. K. Zhang, J. Huang & J.Q. Ge, “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.
- [14] D. Dietrich, D. Nickel, Krause, M. 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.
- [15] W. Liu, L. Long, Y. Ma & L. Wu, “Microstructure evolution and mechanical properties of Mg/Al diffusion bonded joints”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 643, pp. 34–39, 2015.
- [16] M. Joseph-Fernandus, T. Senthikumar & V. Balasubramanian, “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.
- [17] ASTM Committee A01 A1038–10 standard practice for portable hardness testing by the ultrasonic contact impedance method, 2010.
- [18] W. Juan, L., Yajiang, L., Penga & G. Haoranb, “Microstructure and XRD analysis in the interface zone of Mg/Al diffusion bonding”, *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 205, No. 1-3, pp. 146-150, 2008.
- [19] M. Joseph Fernandus, T. Senthikumar, V. B. Alasubramanian & S. Rajakumar, “Optimising diffusion bonding parameters to maximize the strength of AA6061 aluminium and AZ31B magnesium alloy joints”, *Mater. Des.*, Vol. 33, pp. 31–41, 2012.
- [20] M. Jafarian, A. Khodabandeh & S. A. Manafi, “Evaluation of diffusion welding of 6061 aluminum and AZ31 magnesium alloys without using an interlayer”, *Mater. Des.*, Vol. 65, pp. 160–164, 2015.
- [۴] م. شعبانی، ب. شایق بروجنی و ر. ابراهیمی کهریزسنگی، “تأثیر سرعت چرخش ابزار بر خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال غیرهمجنس آلایز آلومینیوم ۵۰۸۳ و تیتانیوم خالص تجاری به روش جوشکاری همزن اصطکاکی”، فصلنامه فرآیند های نوین در مهندسی مواد، سال یازدهم، شماره چهارم، صفحات ۷۹ – ۹۶، زمستان ۱۳۹۶.
- [۵] ح. آقاجانی درازکلا، م. الیاسی و م. حسین زاده، “بررسی شکل گیری عیوب و لایه های بین فلزی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم AA100 به فولاد A441 AISI”، فصلنامه فرآیند های نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره سوم، صفحات ۱۱۹ – ۲۳۳، پاییز ۱۳۹۴.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] G. Mahendran, V. Balasubramanian & T. Senthilvelan, “Developing diffusion bonding windows for joining AZ31B magnesium - AA2024 aluminium alloys”, *Mater.Des.*, Vol. 30, pp. 1240–1244, 2009.
- [9] 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.
- [10] 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”, *J. Mater. Sci.*, Vol. 34, pp. 5187–5197, 1999.
- [11] 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.
- [12] M. J. Fernandus, T. Senthikumar, V. Balasubramanian & S. Rajakumar, “Optimizing

- [21] X. G. Fan, D. M. Jiang, Q. C. Meng, B. Y. Zhang & T. Wang, "Evolution of eutectic structures in Al-Zn-Mg-Cu Alloys during heat treatment", *Trans Nonfer Met Soc China*, Vol. 16, pp. 577-81, 2006.
- [22] ASM handbook, Alloy phase diagrams, ASM International, Metals park, OH, Vol. 3, 1988.
- [23] 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. Nonferrousmet.Soc.China*, Vol. 22, pp. 1961-1966, 2012.
- [24] Y. S. Sato & C. Park, "Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys", *Scr Mater*, Vol. 50, pp. 1233-1236, 2004.
- [25] M. Jafarian, M. Saboktakin Rizi, M. Jafarian, M. Honarmand, H. R. Javadinejad, A. Ghaheri, M. T. Bahramipour & M. Ebrahimian, "Effect of thermal tempering on microstructure and mechanical properties of Mg-AZ31/Al-6061 diffusion bonding", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 666, pp. 372-9, 2016.

## ۶- پی نوشت

- [1] Intermetallic compounds  
[2] Transient Liquid Phase  
[3] Diffusion bonding  
[4] Ultrasonic Contact Impedance Method  
[5] mobility  
[6] Diffusion Induced Grain Coarsening  
[7] Discontinuous grain growth  
[8] Exaggerated grain growth  
[9] Constitutional liquation

## Effect of bonding temperature on microstructure and intermetallic compound formation of diffusion Bonded Mg/Al joints

Mohamad Amar Mofid<sup>1,\*</sup>, Mostafa Hajian Heidary<sup>2</sup>, Ehsan Loryaei<sup>3</sup>, Hatef Shakeri<sup>3</sup>

1- Assistant Prof., Department of Petroleum, Mining and Material Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Prof. Department of Materials science and Metallurgy, Shahrood University of technology, Shahrood, Semnan, Iran

3- M.Sc. Student, Department of Petroleum, Mining and Material Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\*Corresponding Author: moh.ammar\_mofid@iauctb.ac.ir

---

### Abstract

The diffusion bonding of two dissimilar alloys Al 5083 and Mg AZ31 was carried out at 420,430,440 and 450 °C for bonding time of 60 min. In order to characterize the microstructure evolution in the joint zone, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD) were applied. The results show that joint formation is attributed to the solid-state diffusion of Mg and Al into Al 5083 and Mg AZ31 alloys followed by eutectic formation and constitutional liquation along the interface. At bonding temperature of 430°C diffusion induced grain coarsening was observed at the interface. With increase in bonding temperature, the atomic diffusivity increases, results in easier and speedier chemical bonding. In bonding temperature of 440°C the weld had an irregular shaped region in the weld center, having a different microstructure from the two base materials. The irregular shaped region contained a large volume of intermetallic compound  $Al_{12}Mg_{17}$  and showed significantly higher hardness in the weld center. The present study suggests that constitutional liquation resulted in the intermetallic compound  $Al_{12}Mg_{17}$  in the weld center.

**Keywords:** Diffusion Bond, Al Alloy, Mg Alloy, Interface, Microstructure, Intermetallic.

---

Journal homepage: [ma.iaumajlesi.ac.ir](http://ma.iaumajlesi.ac.ir)

### Please cite this article using:

Mohamad Amar Mofid, Mostafa Hajian Heidary, Ehsan Loryaei, Hatef Shakeri, Effect of bonding temperature on microstructure and intermetallic compound formation of diffusion Bonded Mg/Al joints, New Process in Material Engineering, 2020, 14(1), 85-95.