

مقایسه خواص ریزساختاری و مکانیکی اتصالات نفوذی آلیاژهای ۵۷۵۴، ۶۰۶۱ و ۷۰۳۹ آلومینیوم به آلیاژ AZ31 منیزیم

مجتبی جعفریان^{۱*}، مسلم پایدار^۲ و مرتضی جعفریان^۲

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

۲- گروه مهندسی مواد، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۰۷ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۰۱/۲۳)

چکیده - در این پژوهش، خواص ریزساختاری و مکانیکی اتصالات نفوذی آلیاژهای ۵۷۵۴، ۶۰۶۱ و ۷۰۳۹ آلومینیوم به آلیاژ AZ31 منیزیم بررسی شد. اتصالات نفوذی بین آلیاژهای مورد نظر در دمای ۴۴ درجه سانتی‌گراد، زمان ۶۰ دقیقه، فشار ۲۹ مگاپاسکال و خلاء 1×10^{-4} تور صورت گرفتند. فصل مشترک اتصالات با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مجهز به تحلیلگر نقطه‌ای و خطی بررسی شدند. طبق نتایج تحلیل نقطه‌ای حضور ترکیبات بین‌فلزی Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$ و مخلوطی از این دو فاز در ناحیه نفوذ مربوط به تمامی اتصالات انجام شده، مشاهده شد. هم‌چنین طبق نتایج تحلیل خطی، مقدار سختی آلیاژ آلومینیوم تأثیر به‌سزایی در نفوذ هر چه بیش‌تر اتم‌های منیزیم به سمت آلیاژ آلومینیوم داشت و بیشترین نفوذ منیزیم در حالت استفاده از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مشاهده شد. نفوذ بیش‌تر منجر به ایجاد پیوند قوی‌تری بین اتم‌های منیزیم و آلومینیوم شد و در نتیجه بیشترین میزان استحکام در حدود ۴۲ مگاپاسکال در حالت استفاده از آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم حاصل شد.

واژگان کلیدی: اتصال نفوذی، آلیاژهای آلومینیوم، منیزیم AZ31، ریزساختار، خواص مکانیکی

The Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Diffusion Joints of 5754, 6061, and 7039 Aluminum Alloys to AZ31 Magnesium Alloy

M. Jafarian^{1*}, M. Paidar² and M. Jafarian²

1- Young Researchers and Elite Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Materials Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran

Abstract: In this study, microstructure and mechanical properties of diffusion joints between 5754, 6061 and 7039 aluminum alloys and AZ31 magnesium alloy were investigated. Diffusion joints were done between the alloys at 440 °C, for duration of 60

* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: Jafarian_67@yahoo.com

minutes, at 29 MPa pressure and under 1×10^{-4} torr vacuum. The interface of joints was studied using optical (OM) and scanning electron microscopy (SEM) equipped with EDS analysis and the line scan. According to the results of EDS analysis, the presence of intermetallic compounds including $Al_{12}Mg_{17}$, Al_3Mg_2 and their mixture was observed at the diffusion zone. Also, according to the results of the line scan, the hardness value of aluminum alloys has a considerable effect on diffusion of the magnesium atoms toward aluminum alloy and the greatest diffusion of magnesium was observed when 6061 aluminum alloy was used. More diffusion resulted in a stronger bond between atoms of magnesium and aluminum, and maximum strength of approximately 42 MPa was obtained when 6061 aluminum alloy was used.

Keywords: Aluminum alloys, AZ31 Magnesium, Diffusion bonding, Mechanical properties, Microstructure.

۱- مقدمه

آلومینیوم کاربردهای گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، نظامی و هوافضا دارد. آلومینیوم و آلیاژهای آن دارای استحکام ویژه و مقاومت به خوردگی بالا هستند. چگالی آلومینیوم 2.7 g/cm^3 است که حدود یک سوم چگالی فولاد و مس است. از طرفی آلیاژهای پایه منیزیم سبکترین آلیاژهای ساختمانی مورد استفاده در صنعت‌اند. آلیاژهای منیزیم دارای استحکام ویژه و ظرفیت میرایی بالایی بوده، به آسانی قابل بازیافت هستند [۱-۳]. این ویژگی‌ها آلیاژهای منیزیم را به گزینه‌ای ایده‌آل برای استفاده در تجهیزات الکترونیکی قابل حمل و قطعه‌های خودرو تبدیل کرده است. با توجه به کاربرد گسترده آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم در صنایع مختلف، اتصال این دو آلیاژ به یکدیگر امری اجتناب‌ناپذیر است. امروزه این دو آلیاژ به طور فزاینده‌ای به عنوان جایگزینی برای فولاد در صنعت خودرو، به منظور کاهش وزن و افزایش بهره‌وری سوخت استفاده می‌شوند. در این رابطه روش‌های اتصال ذوبی و حالت جامد برای اتصال این دو آلیاژ به کار گرفته می‌شود که با توجه به مشکلات فراوان جوش کاری ذوبی این دو آلیاژ، از جمله ترک‌های گرمایی، ناخالصی‌های اکسیدی و تشکیل بیش از اندازه ترکیبات ترد بین‌فلزی توجه به سمت اتصال این دو آلیاژ با روش‌های حالت جامد گرایش پیدا کرده است [۴-۶]. عوامل متعددی در انتخاب روش اتصال‌دهی مواد با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مختلف تأثیرگذارند. عدم انتخاب صحیح روش اتصال‌دهی و متغیرهای مؤثر بر آن مشکل‌های مختلفی به وجود می‌آورد. برای حل این مسائل می‌توان از روش‌های جوش کاری حالت جامد که فاقد هر گونه مذاب در موضع

اتصال هستند، استفاده کرد [۷-۹]. فلزها و آلیاژهای غیرهم‌جنسی که جوش کاری ذوبی آن‌ها به هم امکان‌پذیر نیست و یا به علت تشکیل ترکیبات بین فلزی ناخواسته با مشکل‌های زیادی همراه است، ممکن است به راحتی و با کمترین تخریب متالورژیکی به کمک فرایندهای جوش کاری حالت جامد به یکدیگر اتصال داده شوند [۱۰]. از دیگر مزایای این روش‌ها می‌توان به کمتر بودن میزان تنش‌های حرارتی و پسماند در محل اتصال نسبت به روش‌های ذوبی، به دلیل دمای پایین فرایند و نبود انبساط و انقباض ناشی از ذوب و انجماد، اشاره داشت [۱۱-۱۵]. هم‌چنین در نتیجه تغییرات گرمایی کم‌تر از جوش کاری ذوبی، تغییرات اندکی در ساختار میکروسکوپی جوش نسبت به فلز پایه رخ می‌دهد. اتصال نفوذی در خلاء می‌تواند به طور دقیق دما و زمان نگهداری را تنظیم و سپس تشکیل ترکیبات بین‌فلزی را کنترل نماید. در این روش متغیرهایی هم‌چون دمای اتصال، فشار اعمالی، زمان نگهداری و میزان زبری سطح نمونه‌ها نقش اساسی را در تعیین میزان استحکام اتصال ایفا می‌کنند [۱۶-۲۰]. در زمینه اتصال آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم، ماهدران و همکارانش [۹] موفق به اتصال آلیاژهای ۲۰۲۴ آلومینیوم و AZ31B منیزیم به روش جوش کاری نفوذی در شرایطی که دمای اتصال ۴۲۵ درجه سانتی‌گراد، فشار ۲۰ مگاپاسکال و زمان ۴۵ دقیقه بود، شدند و تشکیل لایه نفوذی با ضخامت بهینه و بیشترین میزان استحکام برشی (۳۵ مگاپاسکال) را گزارش نمودند. از طرفی لیو و همکاران [۱۰] با بررسی تأثیر ترکیب لایه میانی بر ریزساختار و استحکام اتصال نفوذی آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم و آلیاژ AZ31 منیزیم، لایه میانی Zn-5Al را به عنوان لایه‌ای مناسب گزارش نمودند و به

اتصال با استحکام برشی (۸۶ مگاپاسکال) دست یافتند. هم‌چنین دیتریج و همکاران [۲۱] به بررسی فازهای بین‌فلزی تشکیل‌شده در حین جوش‌کاری نفوذی آلیاژهای ۶۰۸۲ آلومینیوم و AZ31 منیزیم پرداختند و حضور فازهای Al_3Mg_2 و $Al_{12}Mg_{17}$ را در فصل مشترک اتصال مشاهده نمودند. آنها علاوه بر این گزارش نمودند که انعطاف‌پذیری فازهای بین‌فلزی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کم‌تر از فلزات پایه است و شکست ترد عمدتاً در فاز Al_3Mg_2 و در نزدیکی آلیاژهای آلومینیوم رخ می‌دهد. طبق بررسی‌های صورت گرفته تاکنون مطالعات انجام شده صرفاً به بررسی اتصال بین آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم پرداخته، مقایسه‌ای بین اتصال آلیاژهای مختلف آلومینیوم و منیزیم در شرایط یکسان صورت نگرفته است. برای همین منظور در این پژوهش از سه آلیاژ مختلف آلومینیوم به‌منظور اتصال نفوذی با آلیاژ AZ31 منیزیم استفاده شد و نتایج ریزساختاری و مکانیکی در شرایطی کاملاً یکسان با یک‌دیگر مقایسه شدند.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از روش جوش‌کاری نفوذی برای اتصال آلیاژهای ۵۷۵۴، ۶۰۶۱ و ۷۰۳۹ آلومینیوم به آلیاژ AZ31 منیزیم استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلزات پایه در جدول ۱ و خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است. هم‌چنین تصاویری از ریزساختار فلزات پایه در شکل ۱ آورده شده است. ابتدا پس از برش فلزات پایه با دستگاه سنگ مغناطیس در ابعاد 13×13 میلی‌متر، برای آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به‌ترتیب ضخامت‌های ۴ و ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. سپس برای حذف آلودگی و ایجاد زبری سطح، نمونه‌های منیزیمی و آلومینیومی به‌ترتیب ابتدا با استفاده از سنباده‌های شماره ۶۰۰ و ۱۵۰۰ آماده‌سازی و سپس درون بشر حاوی استون به‌مدت ۱۵ دقیقه در حمام التراسونیک قرار داده شدند و سریع در کوره پرس گرم قرار گرفتند. میزان میانگین زبری سطح برای نمونه‌های آلومینیومی ۵۷۵۴، ۶۰۶۱ و ۷۰۳۹

به‌ترتیب ۱۷/۳، ۲۵/۵ و ۲۰/۴ نانومتر و برای نمونه منیزیمی AZ31 برابر با مقدار $64/8$ نانومتر به‌دست آمد. دمای ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد، زمان نگهداری ۶۰ دقیقه، فشار ۲۹ مگاپاسکال و نرخ گرمادهی ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه برای انجام آزمون‌ها در نظر گرفته شد. به‌منظور انجام اتصال نفوذی از کوره پرس داغ مدل Hot Press KHP-200 ساخت کشور کره با ظرفیت اعمال فشار به‌میزان ۱۰ تن، ایجاد خلاء به‌میزان 10^{-4} تور، حداکثر دمای ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و با ابعاد محفظه $150 \times 200 \times 200$ میلی‌متر استفاده شد. دستگاه پرس از نوع هیدرولیک و دارای دو فک از جنس فولاد گرم کار HI3 بود که فک بالایی متحرک و فک پایینی ثابت بود.

بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به تحلیلگر (EDS) نقطه‌ای^۱ و خطی^۲ انجام شد. برای تعیین استحکام مکانیکی اتصال‌های حاصل، از آزمون برش استفاده شد. برای انجام آزمون استحکام برشی از استاندارد ASTM E229-97 استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های برشی ابتدا نمونه‌هایی با سطح مقطع 10×10 میلی‌متر از نمونه‌های جوش‌کاری نفوذی شده با استفاده از دستگاه وایرکات تهیه شدند. سپس با استفاده از دستگاه SANTAM مدل STM-50 با اعمال بار فشاری با سرعت اعمال بار ۰/۱ میلی‌متر در دقیقه، عملیات برش در فصل مشترک اتصال صورت پذیرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ماکروسکوپی اتصالات

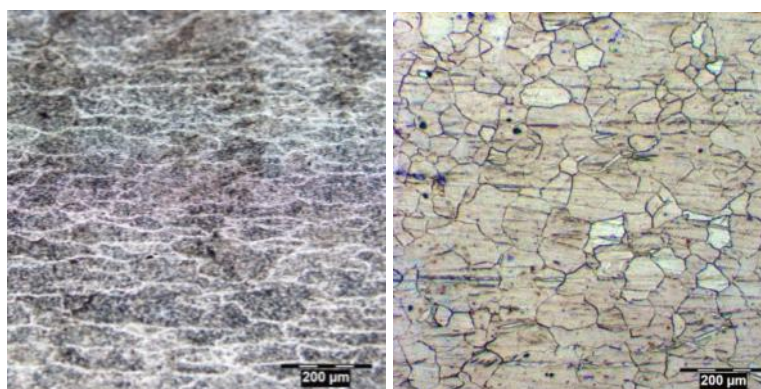
در تمامی حالات نمونه آلومینیومی در بالا و نمونه منیزیمی در پایین قرار داده شد، زیرا با توجه به استحکام بیش‌تر آلیاژ آلومینیوم نسبت به آلیاژ منیزیم در حین اعمال فشار برآمدگی‌های سطحی نمونه منیزیمی دچار تغییر شکل شده، نه تنها منجر به شکسته شدن لایه‌های اکسیدی احتمالی موجود در سطح نمونه آلومینیومی می‌شود بلکه منجر به پر شدن حفرات ایجاد شده در فصل مشترک اتصال خواهد شد. بررسی ماکروسکوپی اتصالات حاکی از آن بود که با توجه به اعمال

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

فلز پایه	%Al	%Zn	%Mn	%Cr	%Cu	%Fe	%Ti	%Si	%Mg
Mg AZ31-O	۳/۱۷	۱/۱	۰/۲	-	۰/۰۳	۰۰/۰۰۴	-	۰/۱۵	بقیه
Al 6061-O	بقیه	۰/۰۳۳۸	۰/۰۱۵	۰/۱۸۹	۰/۲۸۹	۰/۴۰۴	۰/۰۲۱	۰/۶۲	۰/۹۸۴
Al 5754-H22	بقیه	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۱	۰/۳	۰/۰۷	۰/۳	۳
Al 7039-O	بقیه	۴/۲	۲/۶	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۳۵	۰/۰۷	۰/۲	۲/۶

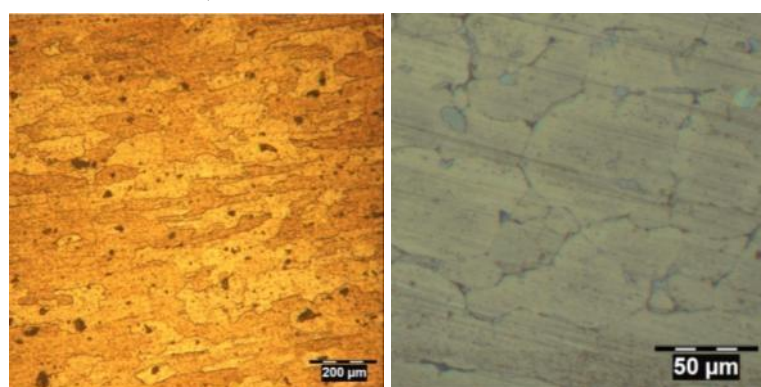
جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم استفاده شده

نوع آلیاژ آلومینیوم	استحکام تسلیم کششی	سختی برینل (HBN)
	(مگاپاسکال)	(گلوله با قطر ۱۰ mm و نیروی ۵۰۰ kg)
Al 6061-O	۵۵/۲	۳۰
Al 5754-H22	۱۸۵	۶۸
Al 7039-O	۱۰۰	۶۱



(ب)

(الف)

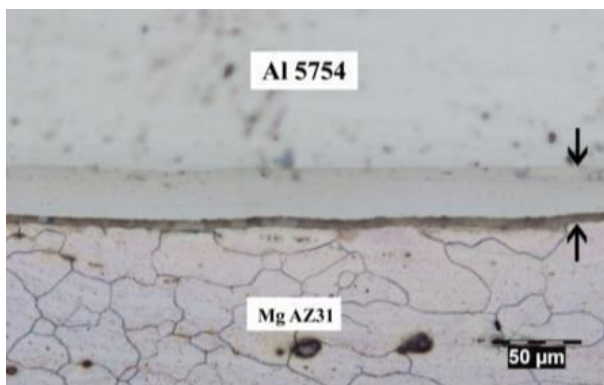


(د)

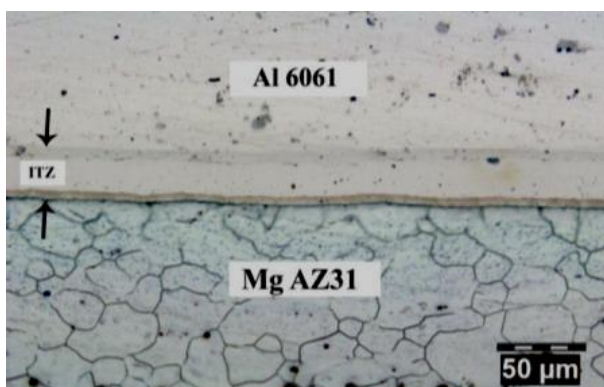
(ج)

شکل ۱- ریزساختار فلزات پایه قبل از جوش کاری: الف) منیزیم AZ31،

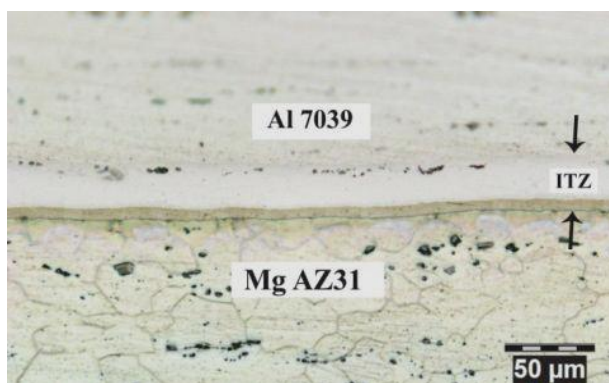
ب) آلومینیوم ۶۰۶۱، ج) آلومینیوم ۷۰۳۹ و د) آلومینیوم ۵۷۵۴



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصالات:

الف) 5754-AZ31، ب) 6061-AZ31 و ج) 7039-AZ31

بین فلزی به شدت وابسته به ضخامت فلزات پایه است [۱۲]. میزان تشکیل فاز جدید به وسیله نفوذ درهم در روش حالت جامد بستگی به نرخ نفوذ و نرخ واکنش‌ها در فصل مشترک دارد. نرخ نفوذ وابستگی شدیدی به دما دارد و قوانین ساده سینتیک می‌تواند در این زمینه مورد استفاده قرار گیرد. با

فشار بهینه بر روی نمونه‌ها بعد از انجام فرایند جوش کاری حداقل تغییرشکل در تمامی نمونه‌ها رخ داد و فرایند جوش کاری بدون ایجاد تغییرشکل زیاد در فلزات پایه انجام شد. این مسئله نشان داد که در صورت اعمال فشار ۲۹ مگاپاسکال و تغییر در نوع آلیاژ آلومینیوم در حین اتصال نفوذی آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم هیچ‌گونه تغییر شکلی در اتصال نهایی رخ نخواهد داد و اتصالی با کمترین تغییرشکل تشکیل می‌شود.

۳-۲- بررسی فصل مشترک اتصالات توسط میکروسکوپ نوری
تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک اتصالات انجام شده در شکل ۲ نشان داده شده است. حضور سه لایه در ناحیه انتقال سطحی^۳ در تمامی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. ناحیه نفوذ در همه حالات به صورت یکنواخت است و به‌طور میانگین ضخامت ناحیه انتقال سطحی در تمامی حالات در گستره ۳۰ تا ۳۳ میکرومتر است.

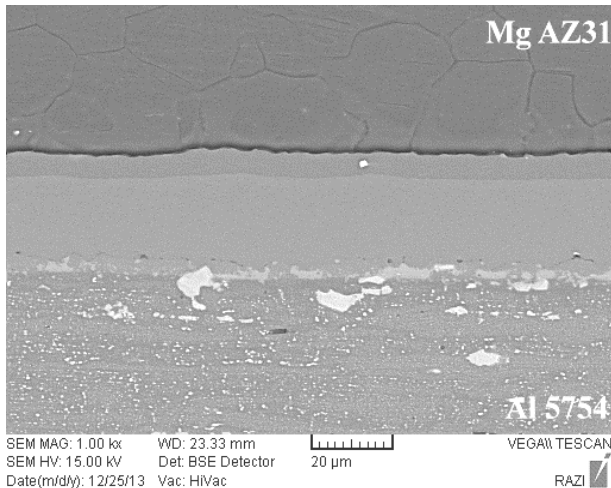
در ساختمان‌های بلوری فشرده، مانند FCC در آلومینیوم و HCP در منیزیم، نفوذ بیش‌تر از طریق جاهای خالی انجام می‌گیرد زیرا انرژی محرکه لازم برای نفوذ توسط جاهای خالی در این شبکه‌ها نسبت به سایر مکانیزم‌ها کم‌تر است. در واقع این ساز و کار در اکثر فلزات به‌عنوان غالب‌ترین و مهم‌ترین ساز و کار نفوذ است. طبق تصاویر هیچ‌گونه میکرو حفره و حفرات مربوط به اثر کرکندال در فصل مشترک اتصالات تشکیل نشده است که علت آن را می‌توان به نزدیک بودن ضرایب نفوذ آلومینیوم و منیزیم (به‌ترتیب $10^{-12} \times 1/89$ و $10^{-12} \times 2/29$ مجذور متر بر ثانیه) [۲۱] و هم‌چنین نزدیک بودن جرم اتمی آن‌ها (به‌ترتیب ۲۷ و ۲۴ گرم بر مول) [۲۱] نسبت داد. در رابطه با چگونگی تشکیل ترکیبات بین‌فلزی در حین اتصال نفوذی، طبق نظریه فیلیبرت اصولاً ترکیب‌های بین‌فلزی به صورت پی‌درپی تشکیل می‌شوند و فاز دوم تنها زمانی که فاز اول به ضخامت معینی برسد شروع به جوانه‌زنی و رشد می‌کند. به‌علاوه فرایند تشکیل ترکیبات

این حال، عوامل دیگری می‌توانند نرخ نفوذ را تحت تأثیر قرار دهند که از جمله آن‌ها می‌توان به مواردی همچون اندازه دانه، مهاجرت مرزدانه و چگالی نابجایی‌ها اشاره نمود [۱۵].

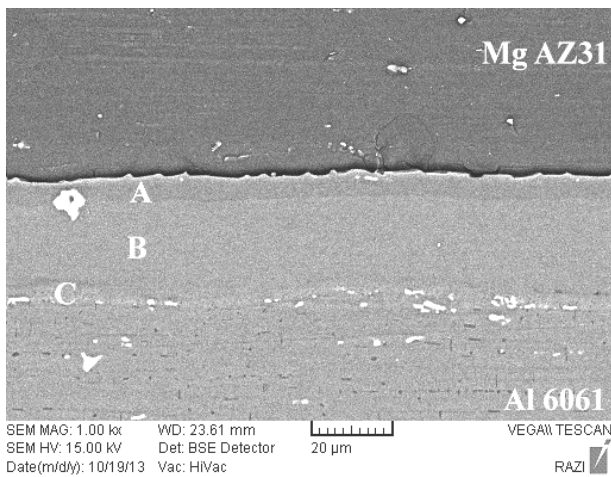
۳-۳- بررسی ریزساختار فصل مشترک اتصالات با SEM

برای ایجاد اتصال حالت جامد، سطوح متصل شونده باید به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک شوند تا نیروی جاذبه کوتاه برد بین‌اتمی فعال و از طریق نفوذ اتصال بین سطوح برقرار شود. بنابراین سطوح جوش کاری شونده باید فاقد 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 هستند و بنابراین اتصال کامل فلز به فلز را در ناحیه فصل مشترک دچار مشکل می‌کنند. یکی از روش‌های غلبه بر مشکل لایه‌های اکسیدی در جوش کاری نفوذی استفاده از سطوح به نسبت خشن است که منجر به ایجاد اتصالی با استحکام بالاتری نسبت به اتصالات حاصل از سطوح پولیش خورده است [۱۶]. تغییر شکل پلاستیک موضعی در مراحل اولیه اتصال، منجر به گسیخته شدن فیلم اکسیدی می‌شود. در سطح ناهموار، برآمدگی‌ها بیشتر دچار تغییر شکل می‌شوند. بنابراین گسیختگی بیش‌تر لایه اکسیدی رخ می‌دهد و اتصال فلز به فلز بهبود بیشتری می‌یابد. بنابراین در این پژوهش سطوح فلزات پایه به صورت زبر در نظر گرفته شد تا با تغییر شکل پلاستیک برآمدگی‌های سطوح، گسیختگی لایه‌های اکسیدی که احتمال تشکیل آن‌ها در سطح فلزات پایه وجود داشت رخ داده، اتصالی فاقد هرگونه ریزحفره و با استحکام بالا ایجاد شود. شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از اتصالات انجام شده در حالات مختلف را نشان می‌دهد.

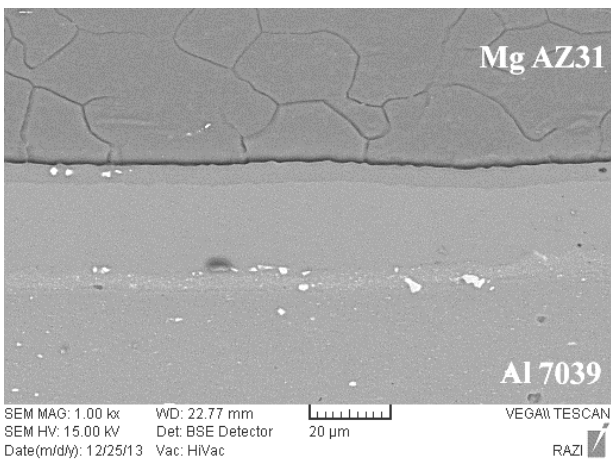
همانطور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ملاحظه می‌شود هیچ‌گونه ریزحفره‌ای در فصل مشترک اتصال ایجاد نشده است و حضور سه لایه واکنشی در بین سطوح فلزات پایه کاملاً مشخص است. دو نوع تحول یوتکتیک



(الف)



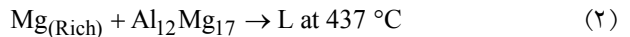
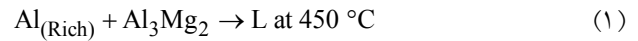
(ب)



(ج)

شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک اتصالات: الف) 5754-AZ31، ب) 6061-AZ31 و ج) 7039-AZ31

در نمودار فازی سیستم دوتایی منیزیم/آلومینیوم که در دماهای ۴۳۷ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد وجود دارد، در ذیل آمده‌اند. در این حالت آلیاژ یوتکتیک منیزیم/آلومینیوم کمترین نقطه ذوب را در سیستم دوتایی (شکل ۴ [۲۲]) دارا است.

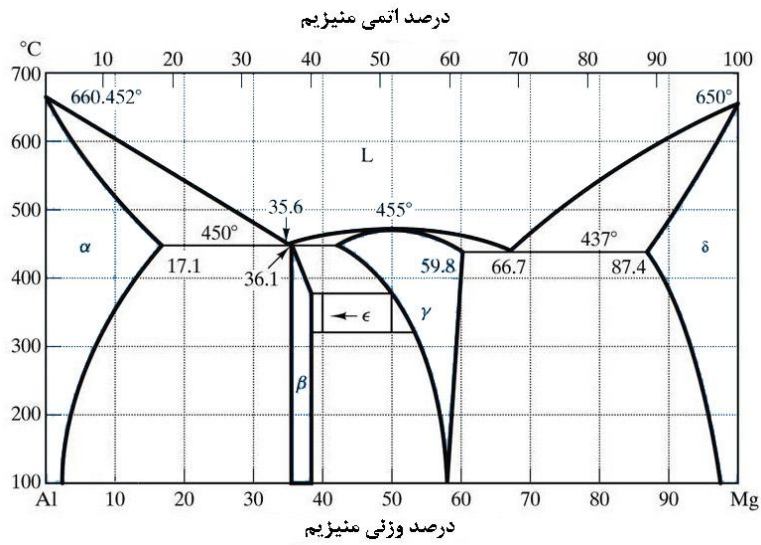


برخی از ترکیبات بین‌فلزی قابل شناسایی در این نمودار شامل Al_3Mg_2 ، $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ و $\text{Al}_{30}\text{Mg}_{23}$ هستند. برای تعیین فازهای تشکیل شده در ناحیه واکنشی بین سطوح فلزات پایه از تحلیل نقطه‌ای از نواحی A، B و C مشخص شده در تصویر ۳-ب استفاده شد. شکل ۵ نتایج این تحلیل را نشان می‌دهد. ناحیه A حاوی منیزیم (در گستره ۵۵ تا ۵۶/۷ درصد اتمی) و آلومینیوم (در گستره ۴۲/۴ تا ۴۳/۳ درصد اتمی) است که با توجه به دی‌گرام فازی دوتایی آلومینیوم-منیزیم (شکل ۴)، احتمال حضور فاز $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ (γ) در این لایه پیش‌بینی می‌شود. فاز گاما با ترکیب $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ دارای ساختار بلوری BCC و فواصل شبکه‌ای ۱۰/۵۴ آنگستروم است. به‌علاوه دارای نانوسختی‌ای به‌میزان ۴/۳۵ nHV و مدول الاستیک بسیار پایین است [۹، ۱۰]. ناحیه B حاوی منیزیم (در گستره ۳۹/۵ تا ۴۰/۱ درصد اتمی) و آلومینیوم (در گستره ۵۹/۹ تا ۶۰/۳ درصد اتمی) است که در این لایه احتمال تشکیل مخلوطی از فازهای Al_3Mg_2 (β) (با درصد وزنی β بیش‌تر) وجود دارد. فاز بتا دارای ساختار بلوری وجوه مرکز پر (FCC) و فواصل شبکه‌ای بزرگ در حدود ۲۸/۲۳ آنگستروم است. این فاز دارای نانوسختی‌ای به‌میزان ۴/۴ nHV و مدول الاستیک بسیار پایینی است [۹، ۱۰]. ناحیه C حاوی منیزیم (در گستره ۳۸/۹ تا ۳۹/۱ درصد اتمی) و آلومینیوم (در گستره ۶۲ تا ۶۲/۴ درصد اتمی) بود که با توجه به درصدهای اتمی عناصر تشکیل‌دهنده احتمال حضور فاز β پیش‌بینی شد.

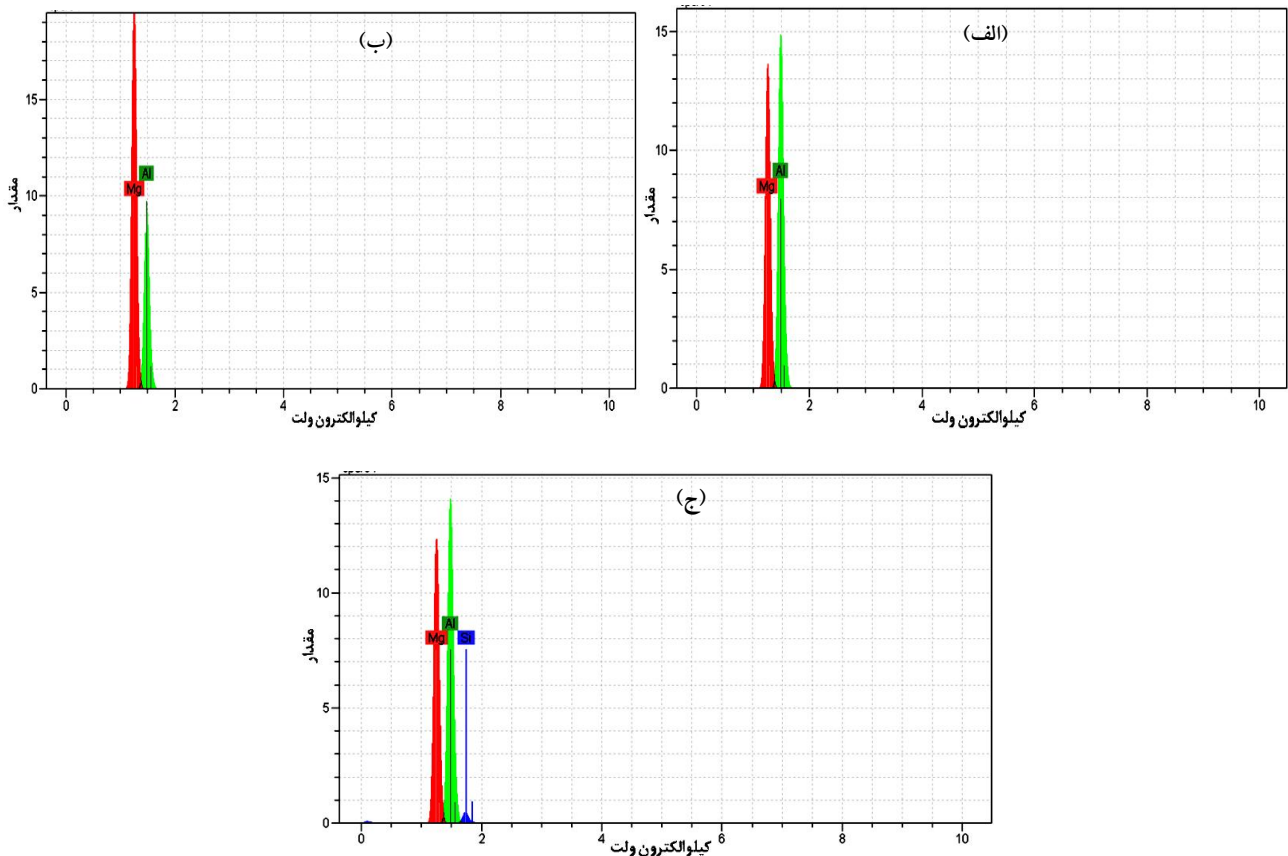
در رابطه با رشد فازها بین آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم در تمامی پژوهش‌های صورت گرفته [۲۱-۲۶] تنها دو فاز بین‌فلزی Al_3Mg_2 و $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ گزارش شده است که فاز غنی

از منیزیم در سمت منیزیم و فاز غنی از آلومینیوم در سمت آلومینیوم مشاهده شده است. در مقابل تغییرات فازی در حالت مذاب، جوانه‌زنی همگن در تغییرات فازی حالت جامد به‌ندرت رخ خواهد داد ولی جوانه‌زنی غیرهمگن در مکان‌هایی هم‌چون ناخالصی‌ها، مرزخانه‌ها و نابجایی‌ها رخ می‌دهد [۲۲]. بررسی‌ها نشان می‌دهند که احتمال رسوب فاز جدید وابسته به عواملی هم‌چون فاکتورهای سینتیکی، حالت نفوذ اتم‌ها، نیروهای محرکه ترمودینامیکی، دمای واکنش و مناطق اتصال خواهد بود. در رابطه با مراحل اولیه تشکیل و رشد ترکیبات بین‌فلزی در حین اتصال نفوذی طبق بررسی‌های صورت گرفته می‌توان چنین بیان نمود که هر دو طرف با نرخ‌های متفاوت در یک‌دیگر نفوذ می‌کند، سپس محلول جامد فوق‌اشباعی تشکیل می‌شود. جوانه بلوری فازهای جدید در عیوب، جایی که غلظت عنصر نفوذ کرده بالا است، شکل می‌گیرد. جوانه بلوری ترکیب بین‌فلزی در امتداد فصل مشترک رشد خواهد کرد، تعداد زیادی از این جوانه‌های رشد کرده به یک‌دیگر متصل می‌شوند و به‌طور معمول به‌صورت طولی رشد می‌کنند. بعد از آن جوانه‌های بلوری ترکیب بین‌فلزی دوم در فصل مشترک شکل می‌گیرد و رشد می‌کند. با توجه به نظریه نفوذ، تشکیل فاز اولیه در زوج نفوذی در یک دمای خاص بلافاصله نخواهد بود، بلکه یک دوره نهفتگی در واکنش نفوذ وجود دارد. نفوذ درهم در فصل مشترک تا حد معینی در دوره نهفتگی رخ می‌دهد [۲۲].

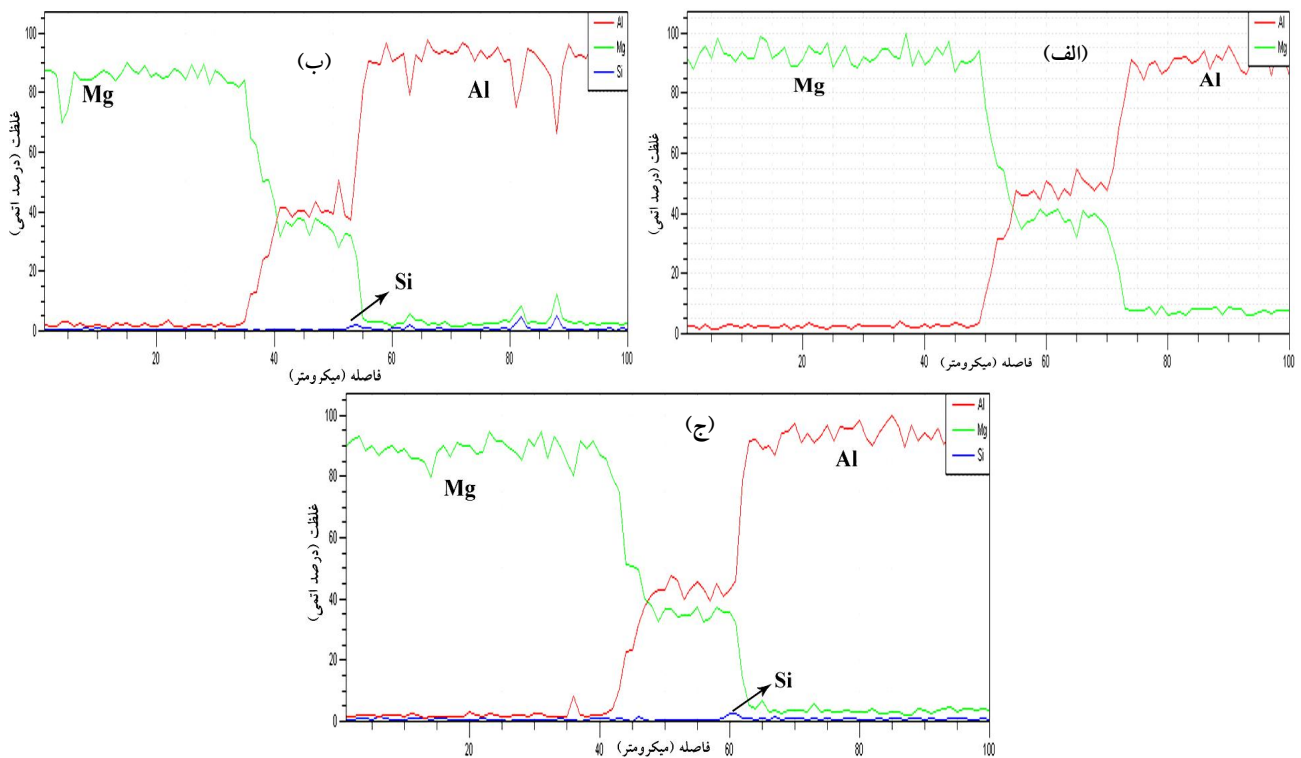
شکل ۶ نشان‌دهنده نتایج تحلیل خطی از فصل مشترک اتصالات در حالات مختلف است. تحلیل خطی بر روی خطی به‌طول ۱۰۰ میکرومتر انجام شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در حالتی که از آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده شده است شیب گرادیان غلظتی مربوط به منیزیم دارای کمترین مقدار خود است و در حالت استفاده از آلومینیوم ۵۷۵۴ بیشترین مقدار خود را دارا است. این مسئله به‌دلیل نفوذ بیش‌تر منیزیم به سمت آلیاژ آلومینیوم است. با توجه به سختی بیش‌تر آلیاژ ۵۷۵۴ آلومینیوم، زبری‌های سطحی به‌زمان بیش‌تری برای تغییر شکل پلاستیک نیاز دارند و در نتیجه افزایش سطح تماس بین سطوح فلزات



شکل ۴- دیاگرام دوتایی آلومینیوم- منیزیم [۲۲]



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



شکل ۶- نتایج تحلیل خطی از اتصالات: الف) 5754-AZ31، ب) 6061-AZ31 و ج) 7039-AZ31

یک عنصر را مشخص می‌کند شعاع اتمی، چگالی و دمای ذوب عنصر است. ساختار بلوری عناصر و آلیاژها در ضریب نفوذ آن‌ها مؤثر است، اتم‌ها در ساختارهای بازتر سریعتر نفوذ می‌کنند. شعاع اتمی آلومینیوم و منیزیم به ترتیب $1/43$ و $1/6$ آنگستروم گزارش شده است [۲۲، ۲۳]. با توجه به اینکه انرژی فعال‌سازی برای نفوذ اتم‌های کوچک‌تر، کم‌تر است، اتم‌های کوچک‌تر سرعت نفوذ بیشتری دارند. به این ترتیب از این نظر سرعت نفوذ و در نتیجه عمق نفوذ آلومینیوم بیش‌تر از منیزیم است.

۳-۴- بررسی خواص مکانیکی اتصالات

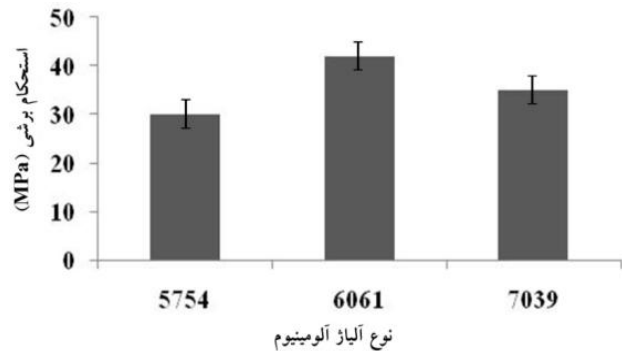
برای ارزیابی خواص مکانیکی اتصالات انجام شده در حالات مختلف، آزمون استحکام برشی بر روی اتصالات انجام شد. شکل ۷ نشان‌دهنده نتایج آزمون استحکام برشی است. در شرایط استفاده از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بیشترین میزان استحکام برشی به مقدار ۴۲ مگاپاسکال حاصل شد، این در صورتی است

پایه در مدت زمان بیش‌تری رخ می‌دهد و فرصت کم‌تری در اختیار اتم‌های منیزیم برای نفوذ به سمت مقابل (در شرایطی یکسان نسبت به سایر آلیاژهای آلومینیوم) قرار خواهد گرفت و در نتیجه نرخ نفوذ کم‌تر اتم‌های منیزیم به سمت آلیاژ آلومینیوم رخ می‌دهد. هر چه سختی کم‌تر باشد نرخ تغییرشکل پلاستیک زبری‌های سطحی بیشتر بوده، در نتیجه افزایش بیش‌تر در سطح تماس در زمان کم‌تری رخ می‌دهد و با توجه به سست شدن بیش‌تر پیوندها در سمت آلیاژ آلومینیوم امکان نفوذ بیش‌تر اتم‌های منیزیم به سمت مقابل فراهم می‌شود. این مسئله در رابطه با اتصالات صورت گرفته با آلیاژهای آلومینیوم ۷۰۳۹ و ۶۰۶۱ مشاهده شد که در رابطه با اتصال صورت گرفته با آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم نفوذ بیش‌تر اتم‌های منیزیم رخ داد و به همین دلیل خطوط مربوط به گرادیان غلظتی اتم‌های آلومینیوم و منیزیم به یک‌دیگر کاملاً نزدیک شده است. هم‌چنین به‌طور کلی در تمامی حالات نرخ نفوذ اتم‌های آلومینیوم به سمت آلیاژ منیزیم بیش‌تر است. از جمله مهم‌ترین عواملی که سرعت نفوذ

عامل منجر به کاهش فواصل اتمی در فصل مشترک می‌شود، نیروهای چسبندگی بین اتم‌ها را نیز فعال‌تر می‌کند و پتانسیل شیمیایی برای نفوذ را افزایش می‌دهد و در نهایت اتصالی مستحکم‌تر بین سطوح فلزات پایه رخ می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- اتصال نفوذی بین آلیاژهای ۶۰۶۱، ۵۷۵۴ و ۷۰۳۹ آلومینیوم با AZ31 منیزیم در دمای ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد و تحت فشار ۲۹ مگاپاسکال 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- سختی آلیاژهای آلومینیوم در چگونگی اتصال آلیاژ آلومینیوم و منیزیم تأثیر به‌سزایی دارد. هر چه استحکام کم‌تر، در اثر تغییرشکل سریع‌تر زبری‌های سطحی، نقاط تماس افزایش بیش‌تری می‌یابد و اتصالی مستحکم‌تر تشکیل می‌شود.
- ۴- بیشترین استحکام در حالت استفاده از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به میزان ۴۲ مگاپاسکال حاصل شد.



شکل ۷- نتایج آزمون استحکام برشی اتصالات مختلف

که در صورت استفاده از آلیاژهای آلومینیوم ۷۰۳۹ و ۵۷۵۴ مقدار استحکام برشی به‌ترتیب به میزان ۳۵ و ۳۰ مگاپاسکال حاصل شد. همان‌طور که در تحلیل خطی مشاهده شد، نفوذ بیش‌تر اتم‌های منیزیم در حالت استفاده از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ اتفاق می‌افتد و این مسئله منجر به پیوند قوی‌تر بین اتم‌های آلومینیوم و منیزیم می‌شود و در نتیجه استحکام پیوند و اتصال نهایی نسبت به دو مورد دیگر افزایش می‌یابد. از طرفی زمانی که سختی پایین‌تر باشد در این صورت در یک فشار ثابت، تغییر شکل پلاستیک زبری‌های سطح سریع‌تر اتفاق می‌افتد و در نتیجه زمان نفوذ کاهش می‌یابد. هم‌چنین لایه‌های اکسیدی احتمالی را که مانع از انحلال سطحی شده به‌سرعت شکسته و مساحت سطح در معرض تماس را نیز افزایش می‌دهد. این

واژه‌نامه

1. energy-dispersive X-ray spectroscopy
2. line scan analysis

3. Interfacial Transition Zone

مراجع

1. Jafarian, M., Khodabandeh, A. and Manafi, S., "Evaluation of Diffusion Welding of 6061 Aluminum and AZ31 Magnesium Alloys without Using an Interlayer", *Materials and Design*, Vol. 65, pp. 160-164, 2015.
2. Guo, W., Hua, M. and Kin Lim Ho, J., "Study on Liquid-Phase-Impact Diffusion Welding SiCp/ZL101", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 1041-1046, 2007.
3. Hui, L., Ming, Q. and 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*, Vol. 28, pp. 61-63, 2007.
4. Wang, J., Feng, J.C. and Wang, Y.X., "Microstructure of Al-Mg Dissimilar Weld Made by Cold Metal Transfer MIG Welding", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 24, pp. 827-831, 2008.
5. Liu, B.X., Huang, L.J., Geng, L., Wang, B., Liu, C. and Zhang, W.C., "Fabrication and Superior Ductility

- of Laminated Ti-TiBw/Ti Composites by Diffusion welding", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 602, pp. 187-192, 2014.
6. Liu, P., Li, Y., Haoran, G. and Juan, W., "Investigation of Interfacial Structure of Mg/Al Vacuum Diffusion Bonded Joint", *Vacuum*, Vol. 80, pp. 395-400, 2006.
 7. Li, Y., Liu, P., Wang, J. and Ma, H., "XRD and SEM Analysis Near the Diffusion Bonding Interface of Mg/Al Dissimilar Materials", *Vacuum*, Vol. 82, pp. 9-15, 2008.
 8. Mahendran, G., Balasubramanian, N. and Senthilvelan, T., "Influences of Diffusion Bonding Process Parameters on Bond Characteristics of Mg-Cu Dissimilar Joints", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, pp. 997-1005, 2010.
 9. Mahendran, G., Balasubramanian, V. and Senthilvelan, T., "Developing Diffusion Bonding Windows for Joining AZ31B Magnesium-AA2024 Aluminium Alloys", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 1240-1244, 2009.
 10. Liu, L.M., Zhao, L.M. and Xu, R.Z., "Effect of Interlayer Composition on the Microstructure and Strength of Diffusion Bonded Mg/Al Joint", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 4548-4551, 2009.
 11. Jing, S., Ke-hong, W., Qi, Z., De-ku, Z., Jun, H. and Jia-Qi, G., "Effect of Joining Temperature on Microstructure and Properties of Diffusion Bonded Mg/Al Joints", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 1961-1966, 2012.
 12. Joseph Fernandus, M., Senthilkumar, T., Balasubramanian, V. and Rajakumar, S., "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.
 13. Cooper, D.R. and Allwood, J.M., "Influence of Diffusion Mechanisms in Aluminium Solid-State Welding Processes", *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 2147-2152, 2014.
 14. Orhan, N., Khan, T.I. and Eroglu, M., "Diffusion Bonding of a Microduplex Stainless Steel to Ti-6Al-4V", *Scripta Materialia*, Vol. 45, pp. 441-446, 2001.
 15. Kundu, S. and Chatterjee, S., "Characterization of Diffusion Bonded Joint between Titanium and 304 Stainless Steel using a Ni Interlayer", *Materials Characterization*, Vol. 59, pp. 631-637, 2008.
 16. Kundu, S. and Chatterjee, S., "Diffusion Bonding between Commercially Pure Titanium and Micro-Duplex Stainless Steel", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 480, pp. 316-322, 2008.
 17. Guo, W., Hua, M., Wai Law, H. and Kin Lim Ho, J., "Liquid-Phase Impact Diffusion Welding of SiC_p/6061Al and its Mechanism", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 490, pp. 427-437, 2008.
 18. Ji-Cai, F., Ya-Rong, W. and Zong-Dian, Z., "Status and Expectation of Research on Welding of Magnesium Alloy", *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, Vol. 15, pp. 165-178, 2005.
 19. Somasekharan, A.C. and Murr, L.E., "Microstructures in Friction-Stir Welded Dissimilar Magnesium Alloys and Magnesium Alloys to 6061-T6 Aluminium Alloy", *Materials Characterization*, Vol. 52, pp. 49-64, 2004.
 20. Yilmaz, O. and 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*, Vol. 141, pp. 67-76, 2003.
 21. Dietrich, D., Nickel, D., Krause, M., Lampke, T., Coleman, M.P. and Randle, V., "Formation of Intermetallic Phases in Diffusion Welded Joints of Aluminium and Magnesium Alloys", *Journal of Materials Science*, Vol. 46, pp. 357-364, 2011.
 22. Joseph Fernandus, M., Senthilkumar, T. and Balasubramanian, V., "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.
 23. Chen, S., Ke, F., Zhou, M. and Bai, Y., "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.
 24. Tanguiep Njiokep, E.M., Salamon, M. and Mehrer, H., "Growth of Intermetallic Phases in the Al-Mg system", *Defect and Diffusion Forum*, Vol. 194, pp. 1581-1586, 2001.
 25. Li, Z.F., Dong, J., Zeng, X.Q., Lu, C., Ding, W.J. and Ren, Z.M., "Influence of Strong Static Magnetic field on Intermediate Phase Growth in Mg-Al Diffusion Couple", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 440, pp. 132-136, 2007.
 26. Shirzadi, A.A., Assadi, H. and Wallach, E.R., "Interface Evolution and Bond Strength When Diffusion Bonding Materials with Stable Oxide Films", *Surface and Interface Analysis*, Vol. 31, pp. 609-618, 2001.