نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره 1، بهار و تابستان1398، صفحه 44-31

اثر افزودن عنصر آلیاژی روی بر اتصال نامشابه Al6061/AZ31ایجاد شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

امین عبداله زاده *، علی شکو فر

دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۳ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۲۵)

چکیده

در این پژوهش، به‌منظور تغییر ترکیب شیمیایی ناحیه اغتشاش یافته، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و منیزیم AZ31همراه با افزودن لایه واسط فلز روی انجام شد. با هدف تعیین شرایط بهینه جوشکاری ترکیبی از سه سرعت دورانی و دو سرعت پیشروی مورد استفاده قرار گرفت. بهترین خواص مکانیکی برای نمونه جوشکاری شده در سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۳۵ میلیمتر بر دقیقه به دست آمد، به نحوی که میزان استحکام کششی این نمونه در مقایسه با نمونه بدون لایه واسط در شرایط مشابه حدود ۲۴ درصد بهبود یافت و درصد ازدیاد طول حدود ۲/۵ برابر ارتقاء پیدا کرد. ترکیبات بین فلزیMg-Zn و Mg-Al-Zn، محلول جامد آلومینیوم و نواحی غنی از روی باقیمانده ازجمله اصلی‌ترین فازهای شناسایی‌شده در ناحیه اغتشاش یافته بودند که با ایجاد آن‌ها از شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی مضر Al-Mg جلوگیری به عمل آمد. تصاویر شکست نگاری سازگاری مناسبی با درصد ازدیاد طول بدست آمده برای نمونه‌های مختلف نشان داد به نحوی که برای نمونه جوشکاری شده با لایه واسط روی، سطح شکست دارای بافتی ریز بوده وحفره‌های کم‌عمقی در سطح شکست مشاهده شد. درحالی‌که در مورد نمونه ساده جوشکاری شده در شرایط مشابه، سطح شکست ماهیت کاملاً ترد داشت.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژ آلومینیوم، آلیاژ منیزیم، لایه واسط روی، خواص ریزساختاری، خواص مکانیکی.

The Effect of Zn Element Addition on Dissimilar Al6061/AZ31 Friction Stir Welded Joints

A. Abdollahzadeh, A. Shokuhfar

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology

(Received 13 May 2018 ; Accepted 16 September 2018)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: aabdollahzadeh@mail.kntu.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

Abstract
In this study, friction stir butt welding of Mg and Al alloys with applying Zn interlayer was performed. To obtain optimum condition, a combination of two travel and three rotation speeds were selected.Mg-Zn and Mg-Al-Zn IMCs, Al solid solution and residual Zn, were the most common phases in the stirred zone, which eliminated the formation of Al-Mg intermetallics. The maximum mechanical properties were achieved for the joint fabricated at 35 mm/min and 600 rpm, caused to 24% improvement in tensile strength and around 3 times enhancement of elongation compared with Zn free sample FSWed at the same conditions. The fracture micrographs were consistent with corresponding ductility results.Fracture surfaces of Zn-added samples presenteda fine texture with a mixture of brittle and ductile fracture feature, which was different from the coarse cleavage plane and fully brittle fracture of the joint without Zn interlayer.

Keywords: Friction Stir Welding, Aluminum Alloy, Magnesium Alloy, Zn Interlayer, Microstructural Characteristics, Mechanical Properties.

1- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم که دارای مزیت‌های استحکام بالا، شکل‌پذیری مناسب، مقاومت به خوردگی مطلوب و وزن کم می‌باشند به‌صورت گسترده‌ای در صنایع هوافضا، اتومبیل، الکترونیک و کشتی‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. از سوی دیگر آلیاژهای منیزیم به عنوان سبک‌ترین فلزات سازه‌ای و به علت داشتن خواصی مانند استحکام ویژه بالا و خواص میرایی مناسب، در حال استفاده در صنایع حمل‌ونقل و الکترونیک هستند. در یک سری از کاربردهای مشخص، جوشکاری موفقیت‌آمیز فلزات نامشابه آلومینیوم و منیزیم به عنوان یک مزیت برای تولید سازه‌های سبک‌وزن، پیشبرد فناوری وزن پایین و کاهش اتلاف انرژی مطرح است[۲].

متأسفانه، انجام جوشکاری ذوبی سنتی میان آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم معمولاً با تشکیل مقدار زیادی از ترکیبات بین فلزی ترد Al-Mg همراه است که باعث تضعیف خواص مکانیکی اتصال می‌شود [۳]. به‌علاوه، اغلب روش‌های جوشکاری ذوبی با معایبی از قبیل اندازه بزرگ ناحیه متأثر از حرارت، تشکیل حفرات، ایجاد ترک‌های انجمادی و تنش پسماند بالا همراه هستند. ازاین‌رو بکارگیری فرایندهای حالت‌جامد برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به‌تدریج موردتوجه بیشتری قرار گرفت [۴].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، یک روش اتصال حالت‌جامد است که در سال ۱۹۹۱ توسط موسسه TWI انگلستان ابداع شد. این فرایند امکان اتصال مواد را در حالت نیمه جامد فراهم می‌کند که این موضوع می‌تواند مشکلات ذکرشده ناشی از ایجاد ذوب و انجماد را کاهش دهد و به دلیل عدم نیاز به ماده پرکننده، مشکلات متالورژیکی مربوط به فرایندهای ذوبی نیز کاهش خواهد یافت، به این ترتیب می‌توان به جوشی با کیفیت مناسب دست یافت [۵]. ویژگی‌های ذکرشده برای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی موجب استفاده گسترده آن در اتصال آلیاژهای نامشابه مختلف [۶-۹] و همچنین اتصال آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم شده است [۱۰-۱۲]. واقعیت این است که اگرچه اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به‌صورت موفقیت‌آمیزی انجام شده است و طی آن از تشکیل لایه‌های ضخیم ترکیبات بین فلزی Al-Mg جلوگیری به عمل آمده است، اما با این وجود، همچنان مقادیر زیادی از ترکیبات بین فلزی ترد Al-Mg در ناحیه اتصال وجود دارد که می‌تواند منجر به ایجاد شکست ترد و ضعیف شدن اتصال شود[۱۳-۱۵].

اخیراً اثر افزودن عناصر آلیاژی مختلف به‌منظور ایجاد تغییر در ترکیب شیمیایی جوش و جلوگیری از تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد Al-Mg مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶-۱۸]. در مورد اتصال نامشابهAl/Mg، بر اساس دیاگرام‌های فازی Mg-Zn و Al-Zn، عنصر روی می‌تواند در دماهای پایین به‌صورت مرجح با منیزیم واکنش دهد و باعث ایجاد ترکیبات بین فلزی Mg-Zn شود. به‌علاوه، حلالیت حالت‌جامد بزرگی می‌تواند میان روی و آلومینیوم شکل گیرد. بنابراین عنصر روی می‌تواند به‌عنوان یک عنصر آلیاژی مناسب برای جلوگیری از

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

ایجاد ترکیبات بین فلزی ترد Al-Mg و درنتیجه بهبود خواص مکانیکی اتصال Al/Mg عمل کند [۱۹و۲۰].

ژانگ و همکاران [۲۱] از جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به همراه افزودن لایه واسط روی برای اتصال آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۴ به آلیاژ منیزیم AZ31 استفاده کردند. نتایج نشان داد که در اتصالات تولیدشده به این روش، از تشکیل ترکیبات بین فلزی Al-Mg جلوگیری به‌عمل‌آمده و خواص استحکام برشی اتصال جوش به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای بهبود یافته است. در پژوهش انجام‌شده توسط دای و همکاران [۲۲]، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و منیزیم AZ31 به‌صورت موفقیت‌آمیزی همراه با افزودن لایه واسط روی به‌وسیله روش جوشکاری قوسی مجهز به اولتراسونیک جوشکاری شدند. نتایج نشان داد که لایه واسط روی می‌تواند مانع تشکیل ترکیبات بین فلزی Al-Mg و جایگزینی آن‌ها با ترکیبات بین فلزی Mg-Zn شود. آن‌ها گزارش کردند که ماکزیمم استحکام برشی برای اتصالات جوشکاری شده همراه با افزودن لایه واسط روی، حدود ۳۰ درصد بالاتر از اتصالات بدون لایه واسط روی می‌باشد. گائو و همکاران [۲۳] تأثیر افزودن لایه واسط روی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات Al/Mg ایجادشده به روش جوشکاری قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که قرار دادن میزان مناسبی از لایه واسط روی باعث بهبود ریزساختار اتصالات Al/Mg شده و به‌صورت مؤثری تشکیل ترکیبات بین فلزی Mg-Al را کاهش می‌دهد. آن‌ها گزارش کردند که معمول‌ترین فازهای بین فلزی تشکیل‌شده در ناحیه ذوبی و نزدیک به مرز منیزیم ترکیبات Mg-Zn و Mg-Al-Zn می‌باشند که نوع و توزیع ترکیبات بین فلزی ایجادشده بر اساس میزان روی اضافه‌شده به جوش متفاوت می‌باشد.

تاکنون مطالعاتی در مورد اثر افزودن لایه واسط روی در اتصال نامشابه Al/Mg به روش‌های مختلف جوشکاری انجام شده است. در اغلب این مطالعات از روش‌های جوشکاری ذوبی و طراحی لبه روی‌هم برای ایجاد اتصال استفاده شده است که طی آن مقدار زیادی از لایه واسط در حین فرایند میان دو فلز به عنوان یک مانع باقی می‌ماند [۲۰-۲۲]. با وجود این مطالعات، بر اساس دانش نویسندگان حاضر، تاکنون مطالعه‌ای بر روی استفاده از لایه واسط روی در جوشکاری حالت جامد اصطکاکی اغتشاشی و در حالت لب‌به‌لب میان آلیاژ آلومینیوم و منیزیم صورت نگرفته است.

بنابراین، هدف اصلی مطالعه اخیر، بررسی پتانسیل تغییر ترکیب شیمیایی جوش به‌وسیله افزودن لایه واسط روی در حالت لب‌به‌لب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ منیزیم AZ31 و آلومینیوم ۶۰۶۱ می‌باشد. به‌منظور دستیابی به اتصالی بی‌نقص، اثر سرعت‌های پیشروی و دورانی بر ماکروساختار، میکروساختار، رفتار کششی و سختی اتصالات جوشکاری شده همراه با لایه واسط روی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج با یک نمونه در حالت بدون اضافه کردن لایه واسط روی مقایسه شد.

2- روش پژوهش

در این مطالعه، نمونه‌هایی با ۶۰ میلیمتر عرض و ۱۰۰ میلیمتر طول از ورق‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ و منیزیم AZ31 با ضخامت ۵ میلیمتر برش داده شدند. ترکیب شیمیایی آلیاژهای جوشکاری شده در جدول(۱) آورده شده است. در ادامه با استفاده از گیره ساخته‌شده، لایه واسطی از جنس روی و با ضخامت ۳ میلیمتر میان تسمه‌های آلومینیوم و منیزیم ثابت شد و فلزات به‌صورت لب‌به‌لب جوشکاری شدند. به منظور انتخاب سرعت های دورانی و پیشروی، در مرحله اول بر اساس پژوهش های پیشین صورت گرفته [۲۴،۱۲ و۲۵] گستره وسیعی از سرعت های دورانی (۴۵۰، ۵۵۰، ۶۵۰، ۷۵۰ و ۸۵۰ دور بر دقیقه) و سرعت های پیشروی (۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ میلیمتر بر دقیقه) به کار گرفته شد. در ادامه مشخص شد که کیفیت ظاهری جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم و منیزیم همراه با افزودن لایه واسط روی، حساسیت بالایی به پارامترهای سرعت دورانی و پیشروی دارد. با استفاده از بازرسی های چشمی صورت گرفته مشخص شد که نمونه های جوشکـاری شده با سرعت دورانی ۵۵۰ و ۶۵۰ دور

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

جدول۱- ترکیب شیمیایی آلیاژهای جوشکاری شده.

آلیاژها	درصد وزنی عناصر								
	Al	Mg	Si	Zn	Fe	Cu	Mn	Cr	Ti
آلومینیوم ۶۰۶۱	فلز پایه	۰/۹	۰/۶۴	۰/۰۰۳	۰/۳	۰/۲۵	۰/۰۱	۰/۱	۰/۰۲
منیزیم AZ31	۲/۸۴	فلز پایه	-	۱/۱۷	۰/۰۰۴	-	۰/۱۵	-	-

جدول۲- مشخصات و شرایط جوشکاری نمونه‌ها.

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	۵۵۰	۵۵۰	۶۰۰	۶۰۰	۶۵۰	۶۵۰	۶۰۰
سرعت پیشروی (میلیمتر بر دقیقه)	۲۵	۳۵	۲۵	۳۵	۲۵	۳۵	۳۵
شرایط انجام فرایند	با لایه واسط روی	با لایه واسط روی	با لایه واسط روی	با لایه واسط روی	با لایه واسط روی	با لایه واسط روی	بدون لایه واسط روی

جدول۳- مشخصات ابزار مورداستفاده در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

فرایند	جنس ابزار	قطر شانه (mm)	سطح شانه	شکل پین	قطر بزرگ پین (mm)	قطر کوچک پین (mm)	طول پین (mm)
FSW	فولاد H13	۱۵	مقعر	مخروط ناقص	۶	۴	۴/۸

بر دقیقه و سرعت پیشروی ۲۵ و ۳۵ میلیمتر بر دقیقه سطح ظاهری مناسبی برای مطالعه دارند. بر همین اساس، در ادامه با انتخاب ترکیبی از دو سرعت پیشروی (۲۵ و ۳۵ میلیمتر بر دقیقه) و سه سرعت دورانی (۵۵۰، ۶۰۰ و ۶۵۰ دور بر دقیقه) ، این گستره از سرعت ها مورد مطالعه قرار گرفت .

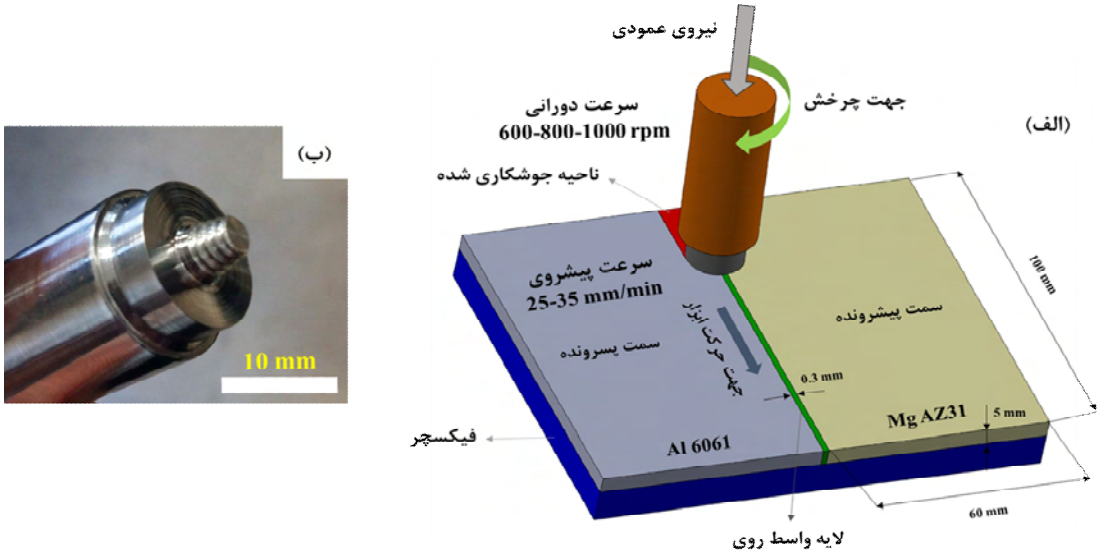
بر اساس مطالعات انجام شده [۱۲و۲۶]، در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم به منیزیم، قرار دادن منیزیم در سمت پیشرونده می تواند باعث بهبود خواص مکانیکی اتصال به واسطه کاهش حرارت ورودی و به دنبال آن کاهش ترکیبات بین فلزی مخرب شود. همچنین مشخص شده است که قرار دادن منیزیم در سمت پیشرونده، شرایط بهتری را برای نفوذ عمیق تر منیزیم به درون ناحیه اغتشاشی و قفل شدن با آلیاژ آلومینیوم ایجاد می کند که این موضوع باعث بهبود خواص مکانیکی اتصال می شود. به همین دلیل، در مورد تمام جوش‌ها منیزیم در سمت پیشرونده قرار داشت و به صورت تجربی آفست یک میلیمتر به سمت منیزیم در نظر گرفته شد.

بهترین خواص مکانیکی برای نمونه جوشکاری شده در سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۳۵ میلیمتر بر دقیقه به دست آمد. به همین علت، به‌منظور درک اثر افزودن لایه واسط بر میکروساختار و خواص مکانیکی اتصالات، جوشکاری نمونه بدون لایه واسط روی در شرایط مشابه انجام شد. تصویر شماتیکی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی همراه با افزودن لایه واسط در شکل(۱) نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به شماره‌گذاری و شرایط انجام فرایند هر نمونه در جدول(۲) آورده شده است. جزئیات مربوط به ابزار مورداستفاده در این پژوهش نیز در جدول(۳) قابل‌مشاهده است.

به‌منظور انجام مطالعات ریزساختاری، نمونه‌هایی در جهت عمود بر مسیر فرایند جوشکاری تهیه و عملیات متالوگرافی بر روی آن‌ها انجام شد. در ادامه، ماکروساختار و میکروساختار نمونه‌های جوشکاری شده با استفاده از میکروسکوپ نوری (Olympus GX51) و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM-JEOL JSM-7001F) مورد مطالعه قرار گرفت .

نمونه‌های ریز اندازه آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8 و در جهت عمود بر مسیر فرایند جوشکاری تهیه شدند. آزمون کشش این نمونه‌ها برای هر کدام از شرایط جوشکاری سه مرتبه انجام شد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]



شکل۱-الف) تصویر شماتیک فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزودن لایه واسط روی، (ب) ابزار فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

این آزمون در دمای اتاق و با نرخ کرنش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه با استفاده از دستگاه INSTRON-5502 صورت گرفت. در انتها، سطح شکست نمونه‌ها به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (FEI Quanta 200) مورد مطالعه قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

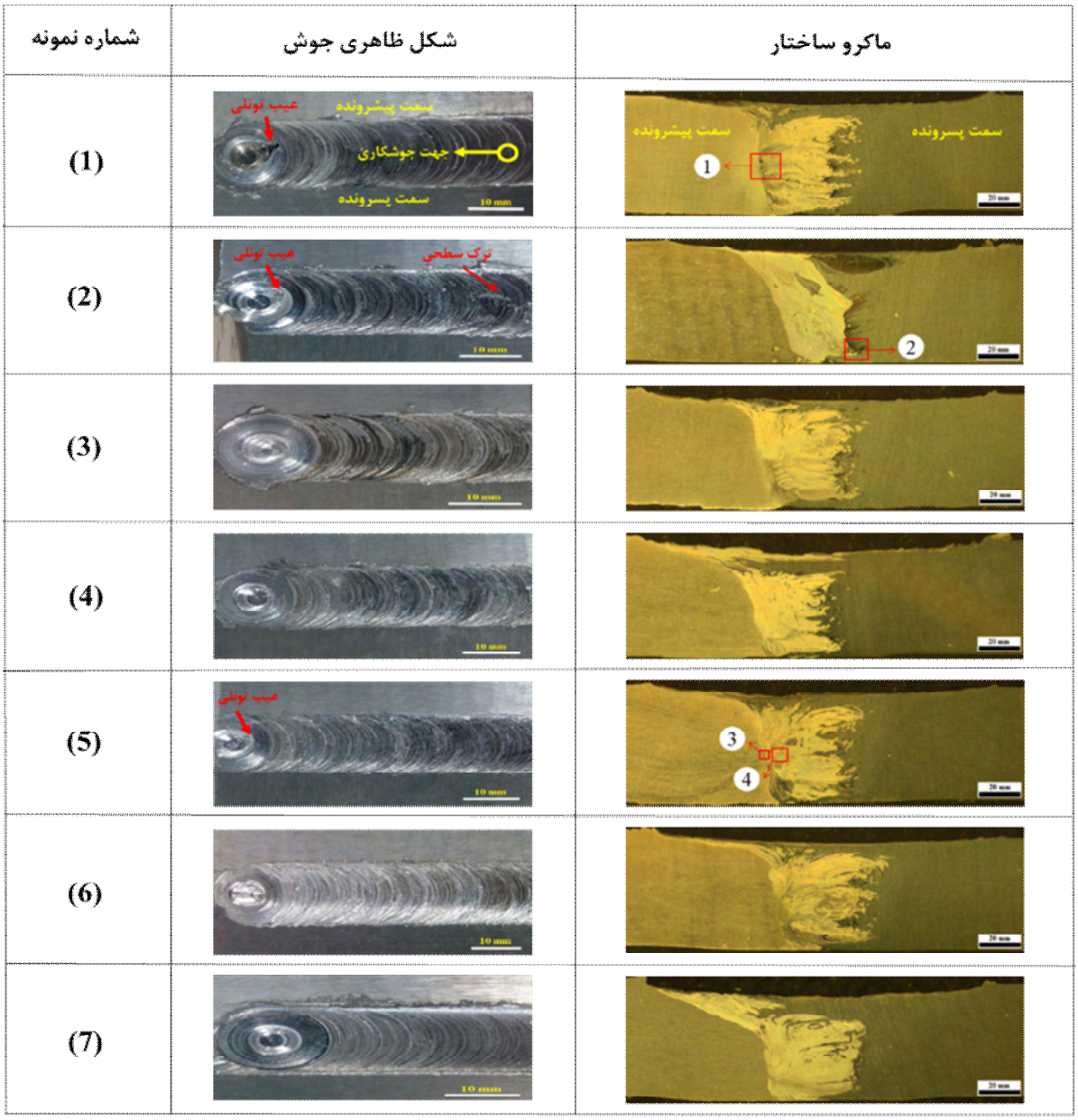
3-1- شکل ظاهری و ماکروساختار

شکل(۲) تصویر ظاهری جوش‌ها و ماکروساختار برش عرضی اتصالات غیرهمجنس آلومینیوم و منیزیم را در ترکیبات مختلفی از سرعت دورانی و پیشروی نشان می‌دهد. نواحی مشخص‌شده در شکل(۲) با بزرگنمایی بالاتر در شکل(۳) نشان داده شده‌اند. در مورد نمونه‌های شماره ۱ و ۲ به دلیل پایین بودن میزان سرعت دورانی و اغتشاش ناکافی، اختلاط ماده به‌صورت مناسبی اتفاق نیفتاده و تونل‌هایی در سطح جوش و ماکروساختار نمونه‌ها قابل‌شناسایی است. همچنین در سطح جوش نمونه شماره ۲ اثری از ترک‌های سطحی که از عمق به سطح رسیده‌اند نیز قابل‌مشاهده است که نشان از ادامه‌دار بودن تونل موجود در تمام طول نمونه دارد. بعلاوه شکل‌گیری ناقص ناگت جوش در شکل ماکروساختار این نمونه که در معرض کمترین میزان حرارت ورودی قرار داشته (کمترین سرعت دورانی و بیشترین سرعت پیشروی) مشهود است. در حرارت‌های ورودی پایین، هرچند که تشکیل ترکیبات بین فلزی محدودتر می‌شود [۲۶] اما از سوی دیگر جریان یافتن دو ماده با هم اختلاف زیادی پیدا می‌کند و ترکیب شدن دو ماده به‌صورت نامناسبی صورت می‌گیرد که می‌تواند باعث ایجاد عیوب مختلف ازجمله ایجاد تونل شود. در حفره انتهایی جوش شماره ۵ یک عیب تونلی کوچک دیده می‌شود که حضور آن در ماکروساختار این نمونه نیز قابل‌مشاهده است (شکل ۳-ج و ۳-د). این نمونه بیشترین حرارت ورودی (بالاترین سرعت دورانی و کمترین سرعت پیشروی) را در میان اتصالات تجربه می‌کند. حرارت ورودی بالا شرایط را برای ایجاد یک جریان پلاستیک مناسب فراهم می‌کند، اما از سوی دیگر با بالا رفتن دما، سطح جوش مستعد ایجاد جرقه می‌شود که این موضوع موجب از دست رفتن مقدار زیادی از ماده و به دنبال آن ایجاد تونل در جوش می‌شود .

در مورد دیگر نمونه‌ها که در حین فرایند در معرض میزان حرارت ورودی متوسطی قرار داشتند، اثرات نیم‌دایره ملایمی در سطح جوش مشاهده‌شده و اثری از ترک یا تونل حضور ندارند. این مشاهدات در مجموع مؤید آن است که اختلاط آلومینیوم و منیزیم در این نمونه‌ها به‌صورت همگنی اتفاق افتاده است .

همان‌طور که میشـــرا و همکـــاران [۲۷] گـــزارش کرده‌اند، در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]



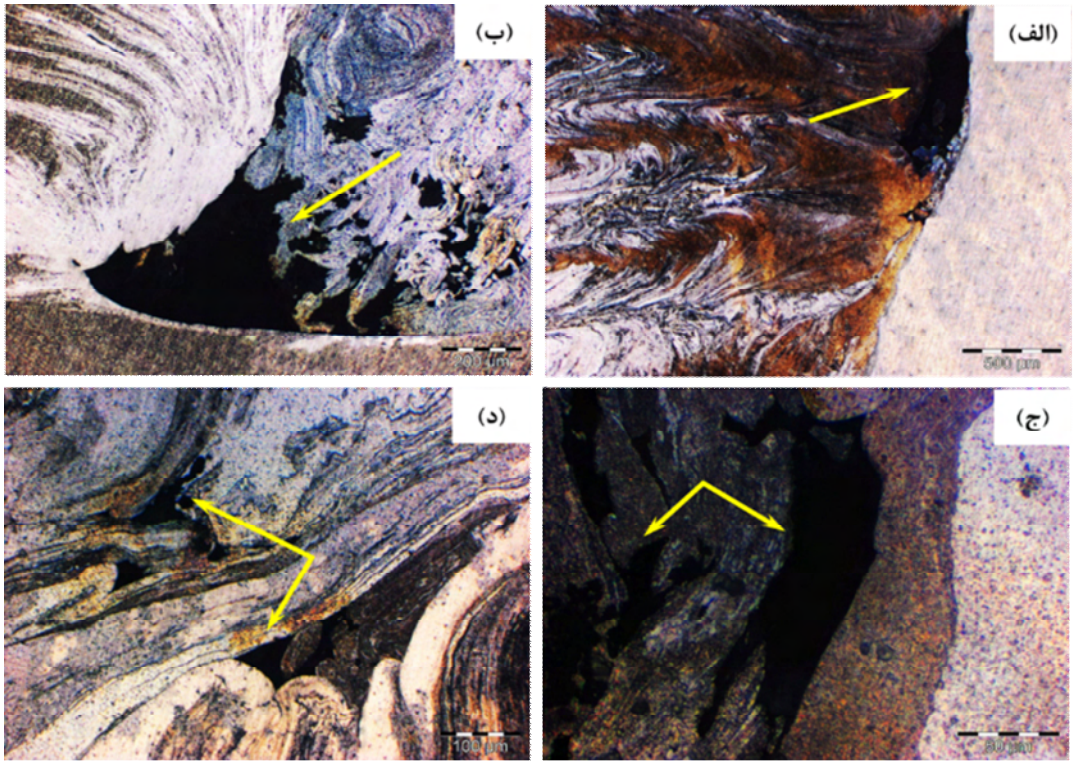
شکل۲- تصویر ظاهری و ماکروساختار نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت‌های پیشروی و دورانی متفاوت.

صورت اعمال حرارت ورودی پایین در حین فرایند جوشکاری، نرم شدن مواد پایه به‌صورت مناسبی صورت نمی‌گیرد و درنتیجه اختلاط نامناسبی از مواد در ناحیه اغتشاشی ایجاد می‌شود. این شرایط می‌تواند با ایجاد حفرات و یا دیگر عیوب همراه باشد و در یک سری از موارد خاص حتی می‌تواند به دلیل نیروهای بالای اعمالی موجب شکستن ابزار شود. از سوی دیگر، اعمال حرارت ورودی بسیار بالا به دلیل تاثیری که بر حضور فازهای با نقطه ذوب پایین و همچنین افزایش اندازه دانه و ایجاد ترکیبات ترد بین فلزی دارد، خواص نهایی اتصال را کاهش می‌دهد.

3-2- مطالعات ریزساختاری

براساس مطالعات انجام‌شده بر اتصال لب‌به‌لب آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ناحیه نواری شکل در سمت پیشرونده و نزدیکی مرز منیزیم به دلیل دربرداشتن حجم زیادی از ترکیبات بین فلزی و شکل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]



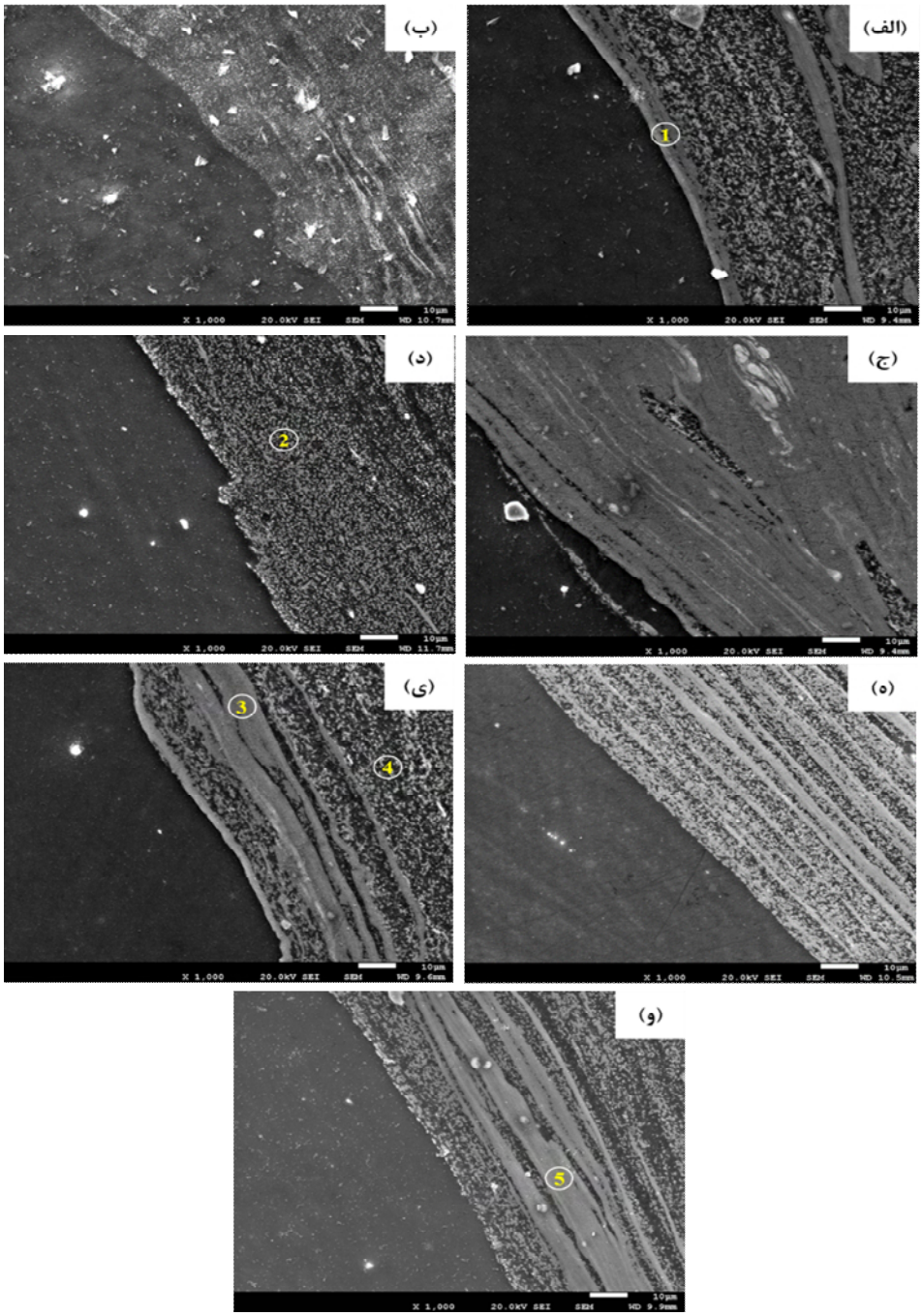
شکل۳- حضور حفرات در نواحی بزرگنمایی شده شکل ۲ در: (الف) ناحیه شماره ۱، (ب) ناحیه شماره ۲، (ج) ناحیه شماره ۳، (د) ناحیه شماره ۴.

لایه‌ای آن‌ها که معمولاً به‌صورت پیوسته از بالا تا پایین جوش امتداد یافته‌اند، به‌عنوان یکی از ضعیف‌ترین نواحی در اتصال شناخته می‌شود و مسئول ایجاد شکست در اغلب این اتصالات می‌باشد [۱۳و۲۵]. شکل(۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ناحیه نواری شکل نمونه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد. شکل(۴-الف و ۴-ب) به ترتیب مربوط به نمونه‌های شماره ۱ و ۲ می‌باشد. همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ نوری مشاهده شد، به دلیل سرعت دورانی پایین و اغتشاش ناکافی ایجادشده در این نمونه‌ها، امتزاج مناسبی میان مواد ایجاد نشده است. به‌علاوه، با مراجعه به جدول(۴) مشخص شد که در ناحیه اغتشاشی و نواحی نزدیک به فصل مشترک آلیاژ منیزیم و جوش، لایه‌های پیوسته‌ای از فاز بین فلزی گاما ($Al_{12}Mg_{17}$) ایجاد شده است. درواقع با توجه به پایین بودن دما در این نمونه، ذوب شدن فویل روی و نفوذ اتم‌های آن به میزان کافی صورت نمی‌گیرد، همچنین جریان یافتن پلاستیک ماده نیز به شکل مطلوبی انجام نمی‌شود درنتیجه به دلیل وجود مشکلات ذکرشده، فویل روی نمی‌تواند درنتیجه به دلیل وجود مشکلات ذکرشده، فویل روی نمی‌تواند نقش مؤثری در جلوگیری از تشکیل ترکیبات بین فلزی میان آلومینیوم و منیزیم ایفا کند .

شکل (۴-ج و ۴-د) بخشی از ناحیه اغتشاشی نزدیک به فصل مشترک آلیاژ منیزیم و جوش در نمونه‌های شماره ۳ و ۴ را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها، میزان حرارت ورودی فرایند در حد مناسبی بوده و در مقایسه با نمونه قبل منجر به ذوب شدن مقدار بیشتری از فویل روی و نفوذ بهتر اتم‌های آن شده است. ازاین‌رو واکنش میان فلز روی و منیزیم نسبت به واکنش فلز آلومینیوم و منیزیم مرجح بوده و از تشکیل لایه‌های نواری شکل ترکیبات بین فلزی Al-Mg در این ناحیه جلوگیری به‌عمل‌آمده است. انجام آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس در نقطه شماره ۲ نیز حضور هم‌زمان عنصر منیزیم و روی را نشان می‌دهد که مقدار منیزیم بیشتر از روی می‌باشد. این موضوع امکان حضور فاز یوتکتیک α (Mg) + $MgZn_2$ در ناحیه نزدیک به فصل مشترک را تائید می‌کند.

این مشاهدات با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش‌های گذشته

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]



شکل۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک ناحیه اغتشاش یافته و آلیاژ منیزیم در نمونه:
(الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲، (ج) شماره ۳، (د) شماره ۴، (ه) شماره ۵، (ی) شماره ۶، (و) شماره ۷.

همخوانی دارد [۲۱و۲۶].

ناحیه نواری شکل نمونه‌های شماره ۵ و ۶ در شکل‌های(۴-ه و ۴-ی) نشان داده شده است. در مورد این نمونه، بازگشت لایه‌های پیوسته ترکیبات بین فلزی Al-Mg ($Al_{12}Mg_{17}$) در فصل مشترک و درون ناحیه اغتشاش یافته قابل‌مشاهده است.

با توجه به اینکه این نمونه در معرض بالاترین میزان حرارت ورودی قرار داشته (بیشترین سرعت دورانی و کمترین سرعت پیشروی)، انجام آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نشان می‌دهد که حضور لایه واسط روی به‌صورت کامل مؤثر نبوده و درنتیجه با تشکیل مجدد لایه‌های بین فلزی

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

Al-Mg در مجاورت فاز یوتکتیک α (Mg) + $MgZn_2$ همراه شده است. این موضوع مؤید آن است که افزایش بیش از حد حرارت ورودی، کمبود عنصر روی (به دلیل ایجاد ذوب موضعی در ناحیه تماس با شانه ابزار و به بیرون پرتاب شدن فلز روی در حین فرایند) و اختلاط مقدار بیشتری از مواد پایه در اتصال را به دنبال دارد که این موارد حضور مجدد ترکیبات Al-Mgرا موجب می‌شود .

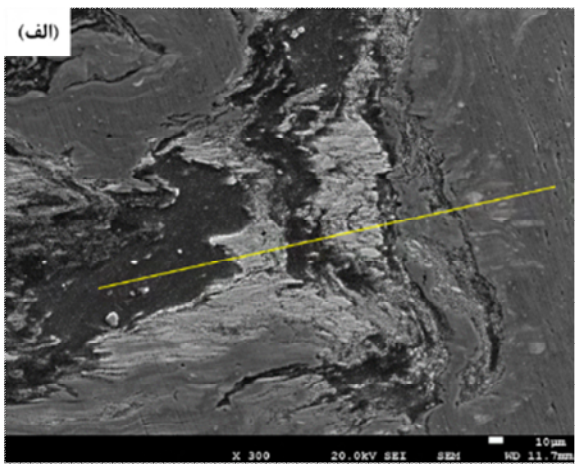
شکل(۵) آنالیز خطی طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس در راستای عمود بر فصل مشترک آلیاژ آلومینیوم در نمونه شماره ۴ را بر اساس تغییرات سه عنصر اصلی آلومینیوم، منیزیم و روی نشان داده است. مشاهده نوسان قابل‌توجه در غلظت این عناصر در نواحی مختلف نزدیک به فصل مشترک آلیاژ آلومینیوم، مؤید تشکیل فازهای مختلف در امتداد خط آنالیز نشان داده شده در شکل(۵-الف) می‌باشد. فازهای محتمل تشکیل‌شده در هر ناحیه در شکل(۵-ب) آورده شده است. نامگذاری فازهای احتمالی بر اساس میزان حضور عناصر مختلف در آن ناحیه و مشابهت آن ها با ترکیبات گزارش شده در پژوهش های پیشین [۲۱و۲۳] انجام شد.

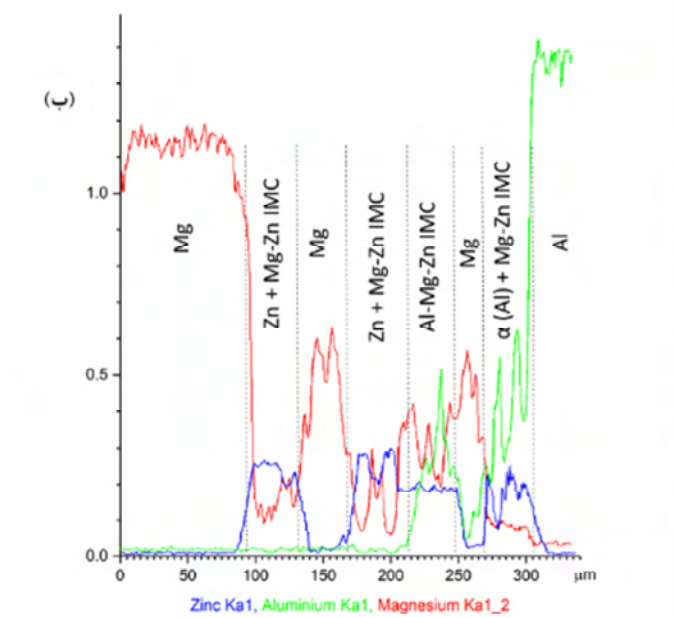
در مجموع، انجام آنالیز نقطه‌ای و خطی طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس در نواحی مختلف اتصال نمونه جوشکاری شده در سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۳۵ میلیمتر بر دقیقه نشان می‌دهد که از انجام واکنش میان آلومینیوم و منیزیم جلوگیری به‌عمل‌آمده و ترکیبات Mg-Zn و Mg-Al-Znجایگزین ترکیبات بین فلزی Al-Mg شده‌اند. تغییرات ایجادشده به آن علت است که آنتالپی مولار استاندارد واکنش میان منیزیم و روی بسیار کمتر از آنتالپی مولار واکنش میان آلومینیوم و منیزیم بوده و همچنین فلزات منیزیم و روی دارای شبکه کریستالی یکسانی می‌باشند [۱۹و۲۰]. ازاین‌رو در شرایطی که میزان مناسبی از حرارت ورودی فراهم باشد، ترکیبات Mg-Zn به‌صورت مرجح جایگزین ترکیبات Al-Mg خواهند شد. این مشاهدات با نتایج پژوهشگران پیشین همخوانی دارد [۲۲و۲۷].

3-3-خواص مکانیکی

3-3-1- آزمون کشش

منحنی‌های تنش-کرنش و همچنین نمودار میله‌ای استحکام کششی و درصد ازدیاد طول آلیاژ های پایه و نمونه‌های جوشکاری شده به ترتیب در شکل‌های(۶ و ۷) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت کلی، در مورد نمونه‌های بدون نقص، اضـــافه کردن عنصر روی موجب بهبود استحـکام

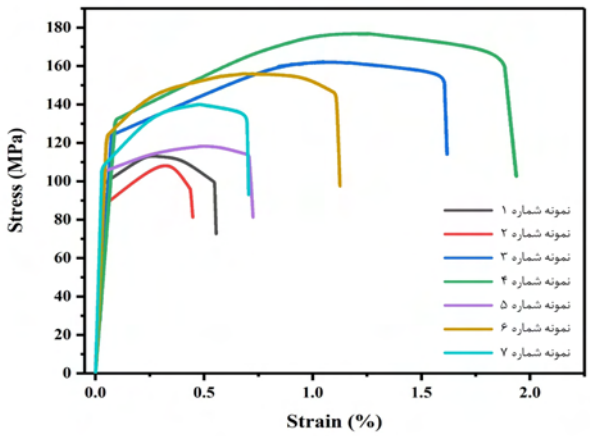




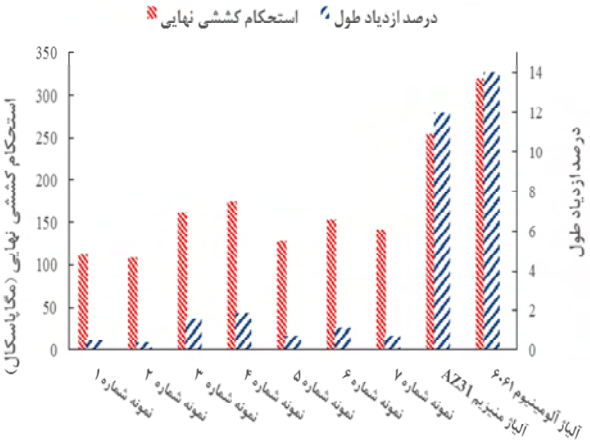
شکل۵-آنالیز خطی طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس در فصل مشترک آلیاژ آلومینیوم و ناحیه اغتشاش یافته.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

کششی نهایی و درصد ازدیاد طول اتصال می‌شود. همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ نوری مشاهده شد (شکل ۳–الف و ۳–ب) حضور حفره در هر دو نمونه ۱ و ۲ و همچنین عدم امتزاج مناسب ماده در نمونه شماره ۲، دلیل اصلی برای آن است که خواص مکانیکی ضعیفی در مورد این نمونه‌ها بدست آید. درواقع حضور حفره موجب کاهش سطح مقطع عرضی و درنتیجه کاهش میزان مقاومت در برابر تنش اعمالی می‌شود. به‌علاوه، لبه‌های تیز در درون حفره یک سری نقاط تمرکز تنش ایجاد می‌کند که به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای استحکام عضو تحت تنش را کاهش می‌دهد [۳۰].



شکل۶– منحنی‌های تنش–کرنش نمونه‌های جوشکاری شده.



شکل۷– استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول آلیاژهای پایه و نمونه‌های مختلف جوشکاری شده.

با افزایش میزان سرعت دورانی به ۶۰۰ دور بر دقیقه و درنتیجه افزایش میزان حرارت ورودی در نمونه‌های شماره ۳ و ۴، امتزاج ماده بهبودیافته و عیوب ریزساختاری از بین می‌رود، همچنین میزان کافی از لایه واسط روی ذوب‌شده و با ایجاد ترکیبات بین فلزی Mg-Zn و محلول جامد Al-Zn از تشکیل ترکیبات بین فلزی Al-Mg جلوگیری می‌کند (شکل۴–د). این فازها در مقایسه با ترکیبات بین فلزی Al-Mg سختی کمتری داشته و درنتیجه تردی کمتر و داکتیلیته بالاتری دارند [۱۹]، به‌علاوه اینکه به شکل لایه‌های ترد نواری شکل ظاهر نمی‌شوند. همه این موارد موجب شد تا ماکزیمم استحکام و درصد ازدیاد طول برای نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۳۵ میلیمتر بر دقیقه بدست آید، به‌نحوی‌که حدود ۲۴ درصد بهبود در استحکام کششی نهایی و حدود ۲/۵ برابر افزایش در درصد ازدیاد طول در مقایسه با نمونه بدون لایه واسط ایجاد شد .

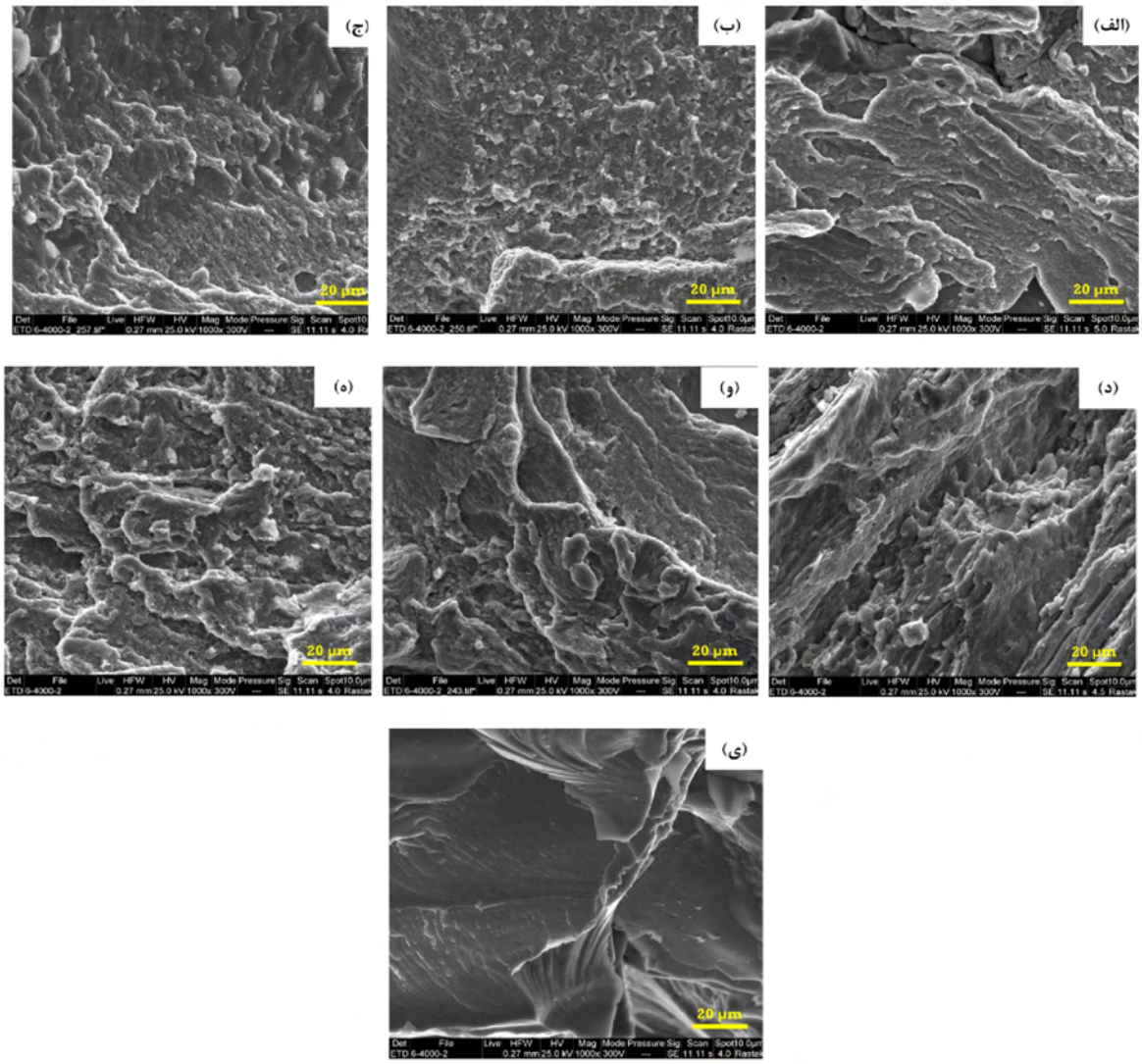
در مورد نمونه‌های شماره ۵ و ۶، با افزایش سرعت دورانی به ۶۵۰ دور بر دقیقه، دیگر لایه واسط نمی‌تواند به‌عنوان یک مانع عمل کند و علاوه بر حضور ترکیباتMg-Zn ، ترکیبات بین فلزی لایه‌ای شکل Al-Mg نیز در ناحیه نواری شکل نزدیک به فصل مشترک آلیاژ منیزیم نمایان می‌شود و این موضوع در مورد نمونه شماره ۵ که در معرض بالاترین میزان حرارت ورودی قرار دارد به‌صورت فاجعه‌بارتری اتفاق می‌افتد (شکل ۴–ی). علاوه بر این موارد، حضور عیب ریزساختاری در نمونه شماره ۵ (شکل ۳–ج و ۳–د) از دیگر عوامل کاهش خواص مکانیکی اتصال در این نمونه می‌باشد .

این نتایج نشان می‌دهد که هیچ‌کدام از ترکیب سرعت دورانی بالا و سرعت پیشروی پایین و یا ترکیب سرعت دورانی پایین و سرعت پیشروی بالا، دستیابی به بالاترین میزان استحکام و درصد ازدیاد طول را تضمین نمی‌کند. درواقع درصورتی‌که میزان حرارت ورودی فرایند کم باشد، مقدار کمتری از فویل روی ذوب‌شده و نفوذ اتم‌های آن نیز سخت‌تر صورت می‌گیرد. به‌این‌ترتیب میزان کمتری از فلز روی برای واکنش با منیزیم و جلوگیری از انجام واکنش مستقیم میان آلومینیوم و منیزیم وجود خواهد داشت. از سوی دیگر اگر میزان حرارت ورودی بسیار زیاد باشد، با وجود اینکه میزان بیشتری از فـویل

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

جدول۴- ترکیب شیمیایی حاصل از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس در نواحی مشخص‌شده در شکل ۴.

ناحیه	منیزیم	آلومینیوم	روی	فاز محتمل
۱	۵۹/۱۸	۳۴/۲۱	۵/۶۳	$Al_{12}Mg_{17}$
۲	۶۳/۲۶	۵/۸۶	۳۰/۳۱	α (Mg) + $MgZn_2$
۳	۶۰/۵۶	۳۲/۴۲	۶/۰۹	$Al_{12}Mg_{17}$
۴	۶۵/۵۳	۳/۹۷	۲۹/۷۲	α (Mg) + $MgZn_2$
۵	۶۲/۷۸	۳۵/۸۳	۰/۵۷	$Al_{12}Mg_{17}$



شکل۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست نمونه:

(الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲، (ج) شماره ۳، (د) شماره ۴، (و) شماره ۵، (ه) شماره ۶، (ی) شماره ۷.

روی ذوب می‌شود و نفوذ اتم‌های روی به‌صورت بهتری صورت می‌گیرد، اما حجم بیشتری از دو فلز آلومینیوم و منیزیم با هم واکنش داده و مقدار بیشتری از فلز روی به بیرون پرتاب می‌شود و این شرایط احتمال تشکیل ترکیبات بین فلزی Al-Mg را بیشتر می‌کند. بر این اساس، نمونه شماره ۴ به دلیل دریافت میزان مناسبی از حرارت ورودی، ریزساختاری یکنواخت شامل ترکیبات بین فلزی Mg-Zn و Mg-Al-Zn و بدون حضور ترکیبات لایه‌ای Al-Mg را نشان می‌دهد، درحالی‌که در نمونه شماره ۷ که در شرایطی مشابه و بدون افزودن لایه واسط روی جوشکاری شده است، تشکیل ترکیبات

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

بسیارترد بین‌فلزی Al-Mg به‌وضوح قابل‌مشاهده است.

3-3-2- شکست نگاری

شکل(۸) تصاویر سطح شکست سمت منیزیم نمونه‌های آزمون کشش همراه با افزودن لایه واسط روی (شکل ۸-الف تا ۸-ی) را در مقایسه با نمونه بدون لایه واسط (شکل ۸-و) نشان می‌دهد. در مورد تمامی نمونه‌های جوشکاری شده، شکست از نزدیکی مرز ناحیه اغتشاش یافته و آلیاژ منیزیم اتفاق افتاد. همان‌طور که مشخص است در نمونه بدون لایه واسط شکست کاملاً ترد با صفحات درشت رخ برگی قابل‌مشاهده است. با توجه به پژوهش های پیشین انجام شده [۱۳و۲۸] به دلیل حضور حجم عظیمی از ترکیبات بین فلزی در این ناحیه، شکست اغلب از این محل شروع شده و گسترش می یابد. همانطور که در شکل(۴) نشان داده شده است، افزودن عنصر آلیاژی روی موجب تغییر ماهیت و مورفولوژی ترکیبات بین فلزی شکل گرفته در این ناحیه می‌شود و به طور کلی در مورد هر نمونه جوشکاری شده، هرچه جایگزینی ترکیبات بین فلزی لایه ای شکل Al-Mg با ترکیبات یوتکتیک Mg (α)+Mg-Zn به میزان بیشتری انجام شود، بهبود بیشتر خواص مکانیکی درآن اتصال را به دنبال دارد.

در مورد نمونه‌های شماره ۱ و ۲ که در سرعت دورانی ۵۵۰ میلیمتر بر دقیقه جوشکاری شده‌اند نیز شکست ترد اتفاق افتاده و صفحات صاف و پهن رخ برگی قابل‌مشاهده است. البته اندازه صفحات رخ برگی کوچک‌تر از نمونه بدون لایه واسط بوده و بافت سطحی ریز و جوانه‌زنی میکروحفره‌های بسیار کم‌عمق در سطح شکست مشهود است. این رفتار می‌تواند به دلیل حضور عیوب ریزساختاری اشاره‌شده در بخش‌های قبل و همچنین تشکیل لایه‌های ترکیبات بین فلزی Al-Mg ترد در مجاورت ناحیه فصل مشترک جوش و آلیاژ منیزیم باشد .

در سطح شکست نمونه‌های شماره ۵ و ۶ که در سرعت دورانی ۶۵۰ دور بر دقیقه جوشکاری شد، صفحات بزرگ رخ برگی دیده نمی‌شوند و سطح شکست در مقایسه با نمونه‌های شماره ۱ و ۲ بافت ریزتر و حفره‌های عمیق‌تری را نشان می‌دهد. با توجه به بالا بودن سرعت دورانی، این نمونه‌ها در معرض حرارت ورودی بالایی قرار داشته و از همین رو درصد حضور ترکیبات بین فلزی در آن بیشتر می‌باشد و این موضوع می‌تواند تردتر شدن اتصال را در پی داشته باشد.

در مورد نمونه‌های شماره ۳ و ۴ که در سرعت دورانی ۶۰۰ دور بر دقیقه جوشکاری شده و در معرض حرارت ورودی متوسطی قرار داشت، سطح شکست نسبت به نمونه‌های قبل دارای پستی و بلندی بیشتری بوده و حفره‌ها به تعداد بیشتر و به‌صورت عمیق‌تر بر روی سطح شکست ظاهر شده‌اند. این مشاهدات مؤید آن است که در این نمونه حالت شکست از ماهیت کاملاً ترد به سمت شکست نرم متمایل شده و تغییر شکل پلاستیک قابل‌توجهی قبل از شکست اتفاق افتاده است.

نتایج نشان داد که داکتیلیته بدست آمده برای نمونه‌های مختلف با تصاویر سطوح شکست همخوانی کامل دارد. حضور صفحات رخ برگی بزرگ و مسطح در نمونه‌های شماره ۱، ۲، ۵ و ۷، درصد ازدیاد طول پایین این نمونه‌ها را نشان می‌دهد درحالی‌که مشاهده پستی و بلندی سطح شکست در کنار حضور حفره‌های کم‌عمق در کنار بافت ریزساختار سطح شکست در نمونه شماره ۳ و ۶ نشان از بالاتر رفتن داکتیلیته اتصال دارد. ریز شدن بافت سطح شکست در نمونه‌های با لایه واسط روی توسط لیو و همکارن [۲۹] نیز گزارش شده است. از سوی دیگر شکل‌گیری حفره‌های عمیق‌تر و فرم یافته تر در کنار مشاهده ناهمواری‌های سطحی قابل‌توجه در سطح شکست نمونه شماره ۴ مؤید بالا بودن درصد ازدیاد طول این نمونه است که با نتایج به‌دست‌آمده در بخش‌های قبل همخوانی دارد .

درواقع انتخاب ترکیبی مناسب از سرعت پیشروی و دورانی، میزان مناسبی از حرارت ورودی برای مخلوط کردن ماده و ذوب لایه واسط فراهم می‌کند که درنتیجه آن شرایط لازم برای جایگزینی ترکیبات مرجح Mg-Zn و Mg-Al-Zn و جلوگیری از ایجاد ترکیبات بین فلزی لایه‌ای Al-Mg فراهم می‌شود.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جوشکاری اتصالات نامشابه آلومینیوم ۶۰۶۱ و منیزیم AZ31 همراه با افزودن لایه واسط روی به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام و ترکیبی از سه سرعت دورانی و دو سرعت پیشروی به کار گرفته شد. بر اساس انجام مطالعات ریزساختاری و ارزیابی خواص مکانیکی نتایج زیر به دست آمد:

- بر اساس مطالعات ریزساختاری و آزمایش‌های مکانیکی انجام‌شده، سرعت دورانی و پیشروی بهینه به ترتیب ۶۰۰ دور بر دقیقه و ۳۵ میلیمتر بر دقیقه به دست آمد که طی آن استحکام کششی نهایی به میزان ۲۴ درصد بیشتر از نمونه بدون لایه واسط بدست آمد و درصد ازدیاد طول آن حدود ۲/۵ برابر بهبود یافت .

- ناحیه اغتشاش یافته نمونه‌های جوشکاری شده با لایه واسط روی، شامل ترکیب یوتکتیکMg-Zn ، ترکیبات بین فلزی Mg-Al-Zn، محلول جامد آلومینیوم و نواحی غنی از روی باقیمانده بود، این در حالی است که اتصال بدون لایه واسط با تشکیل ترکیبات بین فلزی Al-Mg همراه است. کاهش بیش از حد یا افزایش بیش از حد میزان حرارت ورودی فرایند هرکدام به نحوی باعث فقدان حضور مؤثر عناصر روی در ناحیه اغتشاش یافته شده و حضور مجدد ترکیبات بین فلزی لایه‌ای شکل Al-Mg را به همراه خواهد داشت.

- تمامی نمونه‌ها از مجاورت فصل مشترک ناحیه اغتشاش یافته و آلیاژ منیزیم شکسته شدند. در صورت شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی لایه‌ای شکل Al-Mg در مجاورت فصل مشترک، نمونه‌ها با ماهیتی ترد دچار شکست می‌شوند و این در حالی است که در صورت شکل‌گیری ترکیب یوتکتیک Mg-Zn در آن ناحیه مسیر رشد ترک سخت‌تر بوده و ماهیت شکست به سمت شکست نرم گرایش پیدا می‌کند.

منابع

1-Ji, S., Huang, R., Meng, X., Zhang, L., and Huang, Y., "Enhancing friction stir weldability of 6061-T6 Al and AZ31B Mg alloys assisted by external non-rotational shoulder," J. Mater. Eng. Perform., vol. 26, no. 5, pp. 2359–2367, 2017.

2-Abdolahzadeh, A., Omidvar, H., Safarkhanian, M. A., and Bahrami, M., "Studying microstructure and mechanical properties of SiC-incorporated AZ31 joints fabricated through FSW: the effects of rotational and traveling speeds," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 75, no. 5–8, pp. 1189–1196, 2014.

3-Mohammadi, J., Behnamian, Y., Mostafaei, A., Izadi, H., Saeid, T., Kokabi, A. H., and Gerlich, A. P., "Friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys: Microstructure studies and mechanical characterizations," Mater. Charact., vol. 101, pp. 189–207, 2015.

4- Rao, H. M., Ghaffari, B., Yuan, W., Jordon, J. B., and Badarinarayan, H., "Effect of process parameters on microstructure and mechanical behaviors of friction stir linear welded aluminum to magnesium," Mater. Sci. Eng. A, vol. 651, pp. 27–36, 2016.

5- Abbasi, M., Abdollahzadeh, A., Bagheri, B., and Omidvar, H., "The Effect of SiC Particle Addition During FSW on Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy," J. Mater. Eng. Perform., vol. 24, no. 12, pp. 5037–5045, 2015.

6- Rafiei, R., Moghaddam, A. O., Hatami, M. R., Khodabakhshi, F., Abdolahzadeh, A., and Shokuhfar, A., "Microstructural characteristics and mechanical properties of the dissimilar friction-stir butt welds between an Al–Mg alloy and A316L stainless steel," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 90, no. 9–12, pp. 2785–2801, 2017.

7- Fallahi, A. A., Shokuhfar, A., Moghaddam, A. O., and Abdolahzadeh, A. "Analysis of SiC nano-powder effects on friction stir welding of dissimilar Al-Mg alloy to A316L stainless steel," J. Manuf. Process., vol. 30, pp. 418–430, 2017.

8- Plaine, A. H., Gonzalez, A. R., Suhuddin, U. F. H., Dos Santos, J. F., and Alcântara, N. G., "The optimization of friction spot welding process parameters in AA6181-T4 and Ti6Al4V dissimilar joints," Mater. Des., vol. 83, pp. 36–41, 2015.

9- Sahu, P. K., Pal, S., Pal, S. K., and Jain, R., "Influence of plate position, tool offset and tool rotational speed on mechanical properties and microstructures of dissimilar Al/Cu friction stir welding joints," J. Mater. Process. Technol., vol. 235, pp. 55–67, 2016.

10-Zhao, Y., Lu, Z., Yan, K., and Huang, L., "Microstructural characterizations and mechanical properties in underwater friction stir welding of

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

aluminum and magnesium dissimilar alloys," Mater. Des., vol. 65, pp. 675–681, 2015.

11-Buffa, G., Baffari, D., Di Caro, A., and Fratini, L., "Friction stir welding of dissimilar aluminium–magnesium joints: sheet mutual position effects," Sci. Technol. Weld. Join., vol. 20, no. 4, pp. 271–279, 2015.

12-Fu, B., Qin, G., Li, F., Meng, X., Zhang, J., and Wu, C., "Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061-T6 aluminum alloy to AZ31B magnesium alloy," J. Mater. Process. Technol., vol. 218, pp. 38–47, 2015.

13-Liang, Z., Chen, K., Wang, X., Yao, J., Yang, Q., Zhang, L., and Shan, A., "Effect of tool offset and tool rotational speed on enhancing mechanical property of Al/Mg dissimilar FSW joints," Metall. Mater. Trans. A, vol. 44, no. 8, pp. 3721–3731, 2013.

14-Dorbane, A., Mansoor, B., Ayoub, G., Shunmugasamy, V. C., and Imad, A., "Mechanical, microstructural and fracture properties of dissimilar welds produced by friction stir welding of AZ31B and Al6061," Mater. Sci. Eng. A, vol. 651, pp. 720–733, 2016.

15-Firouzdor, V., and Kou, S., "Formation of liquid and intermetallics in Al-to-Mg friction stir welding," Metall. Mater. Trans. A, vol. 41, no. 12, pp. 3238–3251, 2010.

]16-Dai, X., Zhang, H., Wang, B., Ji, A., Liu, J., and Feng, J., "Improving weld strength of arc-assisted ultrasonic seam welded Mg/Al joint with Sn interlayer," Mater. Des., vol. 98, pp. 262–271, 2016.

17-Sun, M., Niknejad, S. T., Zhang, G., Lee, M. K., Wu, L., and Zhou, Y., "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded AZ31/AA5754 using a nickel interlayer," Mater. Des., vol. 87, pp. 905–913, 2015.

18-Wang, Y., Luo, G., Zhang, J., Shen, Q., and Zhang, L., "Microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded Mg–Al joints using silver film as interlayer," Mater. Sci. Eng. A, vol. 559, pp. 868–874, 2013.

19-Shah, L. H., Gerlich, A., and Zhou, Y. H., "Design guideline for intermetallic compound mitigation in Al-Mg dissimilar welding through addition of interlayer," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 94, no. 5–8, pp. 2667–2678, 2018.

20-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," Mater. Des., vol. 30, no. 10, pp. 4548–4551, 2009.

21-Zhang, Y., Luo, Z., Li, Y., Liu, Z., and Huang, Z., "Microstructure characterization and tensile properties of Mg/Al dissimilar joints manufactured by thermo-compensated resistance spot welding with Zn interlayer," Mater. Des., vol. 75, pp. 166–173, 2015.

22-Dai, X., Zhang, H., Zhang, H., Liu, J., and Feng, J., "Arc assisted ultrasonic seam welding of Mg/Al joints with Zn interlayer," Mater. Sci. Technol., vol. 32, no. 2, pp. 164–172, 2016.

23-Gao, Q., and Wang, K., "Influence of Zn interlayer on interfacial microstructure and mechanical properties of TIG lap-welded Mg/Al joints," J. Mater. Eng. Perform., vol. 25, no. 3, pp. 756–763, 2016.

24-Yan, J., Xu, Z., Li, Z., Li, L., and Yang, S., "Microstructure characteristics and performance of dissimilar welds between magnesium alloy and aluminum formed by friction stirring," Scr. Mater., vol. 53, no. 5, pp. 585–589, 2005.

25-Masoudian, A., Tahaei, A., Shakiba, A., Sharifianjazi, F., and Mohandesi, J. A., "Microstructure and mechanical properties of friction stir weld of dissimilar AZ31-O magnesium alloy to 6061-T6 aluminum alloy," Trans. Nonferrous Met. Soc. China, vol. 24, no. 5, pp. 1317–1322, 2014.

26-Firouzdor, V., and Kou, S., "Al-to-Mg friction stir welding: effect of material position, travel speed, and rotation speed," Metall. Mater. Trans. A, vol. 41, no. 11, pp. 2914–2935, 2010.

27-Mishra, R. S., De, P. S., and Kumar, N., Friction stir welding and processing: science and engineering. Springer, 2014.

28-Shi, H., Chen, K., Liang, Z., Dong, F., Yu, T., Dong, X., Zhang, L., and Shan, A., "Intermetallic compounds in the banded structure and their effect on mechanical properties of Al/Mg dissimilar friction stir welding joints," J. Mater. Sci. Technol., vol. 33, no. 4, pp. 359–366, 2017.

29-Liu, F., Zhang, Z., and Liu, L., "Microstructure evolution of Al/Mg butt joints welded by gas tungsten arc with Zn filler metal," Mater. Charact., vol. 69, pp. 84–89, 2012.

30-Hertzberg, R. W., "Deformation and fracture mechanics of engineering materials," 1989.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]