نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره2، پاییز و زمستان1398، صفحه 102-89

بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری آلیاژ AZ31 جوشکاری شده به روش TIG و TIG پالسی

سیده زهرا انوری[1*]، محمدرضا الهی[2]

1- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی 19395-3697، تهران

2- موسسه دانش پژوهان پیشرو، اصفهان

(دریافت مقاله: 1397/07/18 ؛ پذیرش مقاله: 1397/11/27)

چکیده

آلیاژهای منیزیم به دلیل داشتن خواصی مانند استحکام ویژه مناسب، وزن کم و خواص مکانیکی مطلوب کاربردهای زیادی را به خود اختصاص داده‌اند. آلیاژ AZ31 از نظر جوش پذیری نسبت به سایر آلیاژهای منیزیم وضعیت مناسب تری دارد، بنابراین کاربرد بیشتری نسبت به سایر آلیاژهای منیزیم دارد. در این بررسی از روش جوشکاری TIGو TIGپالسی به منظور جوشکاری و اتصال آلیاژ AZ31 استفاده شد و در نهایت ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون کشش و میکروسختی سنجی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در ناحیه جوش رسوبات β-$Mg_{17}Al_{12}$ تشکیل شده است و گرمای ورودی اندازه دانه ها را تحت تاثیر قرار داده و منجر به تغییر در خواص مکانیکی شده است. نمونه جوشکاری به روش TIGبا جریان A 50 و فرکانس Hz 60 بیشترین استحکام(226MPa) را در میان نمونه های جوشکاری شده به روش TIGو TIGپالسی داشت. در میان نمونه های جوشکاری شده به روش TIG پالسی نمونه جریان پیک 75A و جریان زمینه 35A بیشترین استحکام(109MPa) را داشت.

کلمات کلیدی: آلیاژ منیزیم AZ31، جوشکاری قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ، خواص مکانیکی.

Evolution of microstructures and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy weldment with TIG and Pulsed TIG process

S. Z. Anvari[1*], M. Elahi[2]

1-Department of Mechanical Engineering, Payame NoorUniversity (PNU), P.O. Box, 19395-3697, Tehran, Iran,

2-Daneshpajoohan Institute of Higher Education, Isfahan, Iran

(Received 10 October 2018 ; Accepted 16 February 2019)

Abstract

Magnesium alloys are very attractive materials owing to their properties of low density, high specific strength and stiffness, good castability, and weldability. AZ31 magnesium alloys in terms of weldability has better situation than the other, so it has more applications than other magnesium alloys. In this study, TIG and pulsed TIG welding method was

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: szaanvari@gmail.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

used to welding the AZ31 alloy and finally microstructure and mechanical properties of welds were investigated by using optical microscopy,, scanning electron microscopy (SEM), tensile test, and micro-hardness test. The results showed that the welded joint consisted of β-$Mg_{17}Al_{12}$ precipitates. The heat input affected the size of grains that are leading to changes in mechanical properties. The optimal mechanical property will be obtained when I_m=50A and f=60Hz, which ultimate tensile strength is 226 MPa. It was observed that with increasing frequency in TIG welding, strength was reduced. Despite the same I_P and I_B, higher frequency has created a stronger weld. Among pulsed TIG samples, the sample with I_b=35A and I_p=75A had higher tensile strength (109 MPa).

Keywords: AZ31 magnesium alloy, TIG, Mechanical properties.

1- مقدمه

منیزیم در گستره وسیعی از کاربرد ها از جمله صنایع استخراج فلزات، شیمیایی، الکتروشیمیایی و حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرد. نسبت استحکام به وزن بالای آلیاژهای منیزیم سبب گرایش وسیع صنعت حمل و نقل به استفاده از آن در وسایل حمل و نقل شده است. علاوه بر سبکی، خواص دیگری همچون مقاومت به خوردگی جوی، استحکام خستگی مناسب (نسبت استحکام خستگی به وزن بالا) پایداری ابعادی و نفوذ پذیری بسیار پایین آن در برابر امواج الکترومغناطیس سبب استفاده از آلیاژهای منیزیم در سازه‌ها بویژه در سازه‌های متحرک و نظامی شده است.یکی از مهم‌ترین مصارف آلیاژهای منیزیم در صنایع نظامی و هوایی است. استفاده از منیزیم در چهار چوب بدنه هواپیماها، موشک‌ها، تانک‌ها و اتومبیل‌ها به عنوان پوسته‌های خارجی کلاهک، بدنه‌ی موتور جت، بدنه‌ی خودرو و مخازن سوخت از موارد کاربرد رایج در این صنایع است [1-3].

منیزیم و آلیاژهای آن با توجه به خواص منحصر به فردی که دارند در صنعت کاربرد فراوانی دارند. چگالی کم و استحکام ویژه‌ی زیاد، آن‌ها را به یک جایگزین نویدبخش برای دیگر مواد سنگین‌تر مثل فولاد، چدن و حتی آلومینیم تبدیل کرده است. بنابراین روش های اتصال آلیاژهای منیزیم اهمیت زیادی داشته و در سال های اخیر توجهات زیادی به خود اختصاص داده است. روش‌های اتصال مؤثر نقش مهمی در بهبود کاربرد آلیاژ منیزیم ایفا می‌کنند. تنوعی از روش‌های جوشکاری مختلف مانند جوشکاری TIG، جوشکاری اصطکاکی (FSW)، جوشکاری اشعه لیزر (LBW) و جوشکاری دوگانه برای آلیاژ منیزیم بکار رفته‌اند [4-8].

جوش پذیری آلیاژهای منیزیم را می توان بر حسب فاکتورهای گوناگون بررسی کرد. مهم‌ترین فاکتوری که جوش پذیری آلیاژهای منیزیم را بر آن اساس می‌سنجند، میزان حساسیت آلیاژ جوشکاری شده در برابر ترک‌ها است. هر چند پارامترهای مهم دیگری نظیر مقدار سوختن و تبخیر منیزیم در اثرجوشکاری، سیالیت مذاب و مسایل اقتصادی و ایمنی تاثیرگذار است. عموما از روشهای TIG و MIG برای جوشکاری این آلیاژ استفاده می‌شود که مهم‌ترین پارامتر برای انتخاب فلز پر کننده، هماهنگی ترکیب شیمیایی فلز پر کننده با فلز پایه است [9 و10].

آلیاژ AZ31از نظر جوش پذیری نسبت به سایر آلیاژ های منیزیم وضعیت مناسب تری دارد و همین عامل سبب استفاده وسیع از آن در کاربردهایی شده است که سایر آلیاژهای منیزیم به دلیل محدودیت جوشکاری قابلیت استفاده ندارند. با این وجود مشکلات عمومی مربوط به جوشکاری آلیاژهای منیزیم همچون ایجاد تخلخل و لایه های اکسیدی محبوس در جوش همچنان باقی می باشد [11].

اخیرا تحقیقات مربوط به فرایندهای جوشکاری آلیاژهای منیزیم به سرعت زیاد شده اند. یانهایی سو و همکارانش [12] در سال 2011 بر روی اثرمیدان مغناطیسی بر ریزساختار و خواص آلیاژ منیزیم جوش داده شده توسط فرایند جوشکاری قوسی تنگستن گاز تحقیق به عمل آوردند. در این تحقیق تاثیر میدان مغناطیسی بر روی ریزساختار و خواص آلیاژ منیزیم AZ31 که به ضخامت 5 میلی‌متر با روش جوشکاری تیگ جوش داده شده بود مورد بررسی قرار گرفت.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول 1- ترکیب شیمیایی نمونه‌های AZ31.

Alloy	%Al	%Zn	%Mn	%Cu	%Si	%Ni	%Fe	%Mg
AZ31	۳/۰۲۳	۱/۱۱۷	۰/۳۷۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	باقیمانده
ترکیب شیمیایی استاندارد	۳/۵-۲/۵	۱/۴-۰/۶	۱-۰/۲	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	باقیمانده

جدول2- ترکیب شیمیایی فلز پرکننده ER AZ92A.

Alloy type	%Al	%Zn	%Mn	%Cu	%Si	%Fe	%Mg
درصد وزنی فلز پرکننده ER AZ92A	۸/۳	۱/۷	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۰۵	باقیمانده

نتایج آن تحقیق نشان می دهد که خواص اتصال جوش داده شده با اعمال میدان مغناطیسی نسبت به حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی بهتراست.

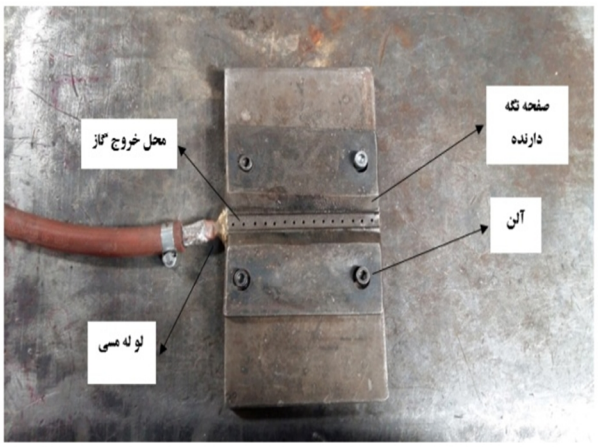
با فرکانس و جریان مناسب میدان مغناطیسی می توان با شکستن دانه ها و کریستال ها باعث اصلاح دانه های کریستال شد و خواص آلیاژ مورد جوشکاری را بهبود بخشید. چون مینگ- لین و همکارانش [13] در سال 2011 بر روی تکامل ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژمنیزیمAZ31B قطعات به‌هم جوش خورده به روش تیگ با شاراکسید فعال مورد بحث قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شدکه استفاده از روان ساز فعال تاثیر زیادی بر جوشکاری ورق منیزیم دارد.

از مهمترین روش های جوشکاری این آلیاژهای منیزیم می‌توان به روش TIGو TIGپالسی اشاره کرد. بنابراین در این پژوهش با در نظر گرفتن مشکلات حاد جوشکاری ذوبی آلیاژهای منیزیم بدلیل واکنش پذیری شدید این آلیاژها در حالت مذاب و مزایای کیفی و اقتصادی در بین جوشکاری‌های ذوبی، جوشکاری به روش TIGانتخاب شد و مقایسه بین جوشکاری با روش های TIGو TIGپالسی بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 صورت گرفت.

2-روش انجام آزمایش

در این تحقیق از ورق های آلیاژ منیزیمAZ31 با ابعاد 15×5cm، پر کننده AZ92 به قطر 1/6 mm و الکترود تنگستنی با قطر 1/6 mm استفاده شد. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها با استفاده از روش انتشار طیف سنجی اتمی به دست آمد. ترکیب شیمیایی به دست آمده از آنالیز نمونه‌ها و ترکیب شیمیایی استاندارد [2] در جدول(1) و ترکیب شیمیایی فلز پر کننده در جدول(2) مشخص شده است. با توجه ترکیب شیمیایی استاندارد AZ31 مشاهده می‌شود که ترکیب شیمیایی نمونه‌ها از نوع آلیاژ AZ31است.

در این پژوهش از دو فرایند جوشکاری TIGو TIGپالسی استفاده شد. نمونه‌ها در نگه دارنده قرار گرفتند(شکل 1) و آماده جوشکاری شدند. در شکل(1) قسمت های اصلی گیره نگه دارنده مشاهده می‌شود. در وسط گیره نگه دارنده قطعه ماشین‌کاری شده قرار دارد. پشت بند استفاده شده فولاد 316L است. در وسط نگه دارنده تعدادی سوراخ به قطر 1/5 میلی‌متر وجود دارد که محل خروج گاز پشتی است.



شکل1- آماده سازی نمونه‌ها جهت انجام عملیات جوشکاری.

هنگام جوشکاری باید طوری قطعه مورد نظر تنظیم کرد که سوراخ ها درست در محل جوشکاری شده بر روی قطعه کار باشد. در دو سمت نگه دارنده آلن هایی وجود دارد که در هنگام جوشکاری با قرار گرفتن بر روی قطعه کار، باعث جلوگیری از تغییر شکل شدن قطعه کار می‌شود. نمونه‌ها

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

همگی در یک پاس جوشکاری شدند. به منظور انجام جوشکاری شرایط جدول(3) برای تمامی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شدند. قبل از انجام جوشکاری به منظور جلوگیری از اثرات منفی آلودگی های سطحی (نظیر چربی ها و لایه اکسیدی) سطح نمونه ها با استون مورد شستشو قرا گرفت و سپس توسط برس فولاد زنگ نزن برس کاری شدند. جوشکاری نمونه ها توسط دستگاه گام الکتریک مدل PSA400A (با آب خنک) صورت گرفت. فرایند جوشکاری TIGو TIGپالسی مطابق شرایط جدول(4 و 5) انجام شد.

از میکروسکوپ نوری به منظور مطالعه میکروسکوپی ویژگی‌های ساختاری نمونه‌های جوشکاری شده استفاده شد. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر ساختار نمونه ها از میکروسکوپ الکترونی(SEM) استفاده شد. برای بررسی ترکیب شیمیایی و عناصر موجود در قسمت‌های مختلف اتصال از آنالیز طیف سنجی پراش پرتوی ایکس (EDS) استفاده شد. این تکنیک روشی برای مشخص کردن ترکیب عنصری یک نمونه یا بخشی از یک نمونه است. دستگاه مورد استفاده در این پژوهش، VEGA -XMUساخت شرکت TESCAN است. برای بررسی سختی از روش سختی سنجی ویکرز استفاده شد. در سختی سنجی عمق فرورفتگی تحت بار ثابت به عنوان مقیاسی برای سختی استفاده شد. دستگاه مورد استفاده در این پژوهش،کوپا هارش مدل KM3 بود. به منظور انجام آزمون کشش، نمونه ها از بخش میانی اتصال جوش ها تهیه و مطابق با استاندارد ASTM E8، برش‌کاری شدند. هندسه نمونه‌های آزمون کشش در شکل(2) آورده شده است. برای اطمینان از وقوع شکست در فلز جوش در نمونه‌های

جدول 3- شرایط کلی جوشکاری نمونه‌ها.

خلوص گاز آرگون برای گاز محافظ و پشت کار	٪۹۹
زمان خروج گاز قبل از شروع قوس	۵ ثانیه
زمان خروج گاز بعد از اتمام قوس	۱۲ ثانیه
فشار گاز در هنگام جوشکاری	۱۰lit/min
فشار گاز در نگه دارنده(پشت کار)	۱۲lit/min
ولتاژ جوشکاری	۱۱-۱۰/۲ ولت
سرعت جوشکاری	۱۲-۱۳ cm/min

جدول4- شرایط جوشکاری نمونه های جوش داده شده به روش TIG.

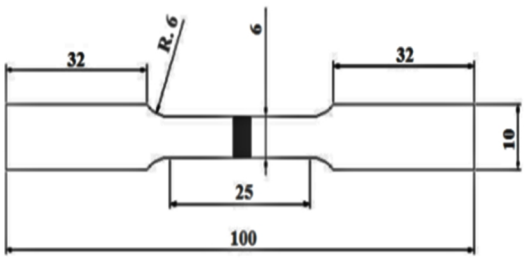
کد نمونه	جریان جوشکاری (A)	فرکانس جوشکاری (Hz)
T1	۵۰	۶۰
T2	۵۵	۶۰
T3	۵۵	۸۰
T4	۵۵	۷۰

جدول 5- شرایط جوشکاری نمونه های جوش داده شده به روش TIGپالسی.

کد نمونه	حداکثر جریان (I_P)	حداقل جریان (I_B)	فرکانس جوشکاری (Hz)
TP1	۷۵	۳۵	۸۰
TP2	۷۰	۳۰	۶۰
TP3	۷۵	۳۵	۶۰
TP4	۷۵	۳۵	۷۰

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

آزمون کشش، شیاری به عمق 1میلی متر در فلز جوش تعبیه شد. آزمون کشش با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال با سرعت فک برابر با 0/5 mm/min انجام شد.

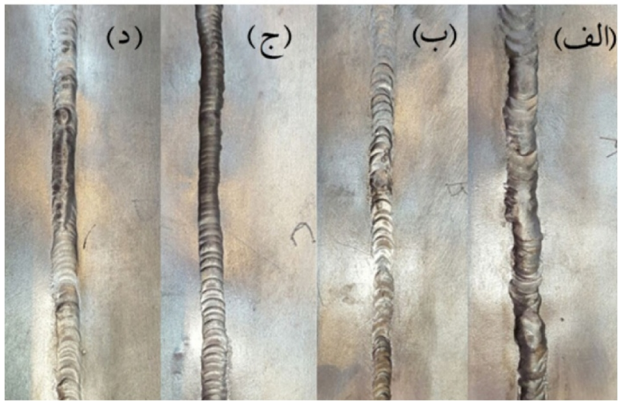


شکل 2- شکل و ابعاد نمونه کشش بر اساس استاندارد ASTM.

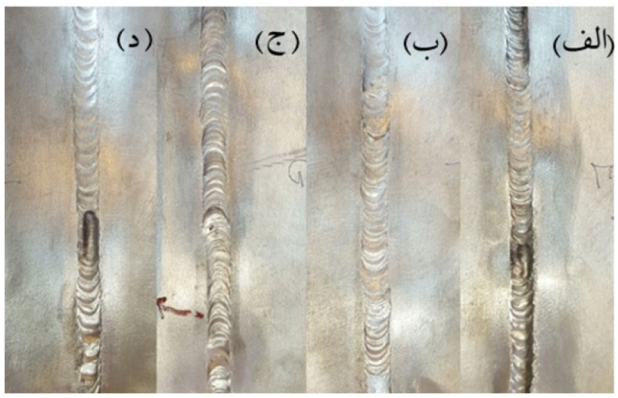
3-نتایج و بحث

3-1- بررسی کیفیت ظاهری نمونه های جوشکاری شده

نمونه‌های جوشکاری شده طبق جدول(4 و5) پس از انجام عملیات جوشکاری TIGو TIGپالسی مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (3-الف) نمونه جوشکاری شده به روش TIGرا نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود کیفیت ظاهری جوش مورد نظر خوب نیست و دراین شکل انباشتگی بیش از حد گرده جوش دیده می‌شود که علت این امر را می‌توان میزان آمپر و یا در واقع جریان پایین جوشکاری دانست(50A). شکل(3-ب) نمونه جوشکاری شده به روش TIGبا جریان 55 آمپر و فرکانس 60 هرتز را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود ظاهر جوش نسبت به نمونه قبلی مناسب تر است، ولی در بعضی از نقاط جوشکاری شده عدم تشکیل زاویه ی آلفا بین گرده جوش و سطح قطعه دیده می‌شود و حتی در بعضی نقاط عدم نفوذ جوش به قطعه کار وجود دارد. البته در مقایسه با نمونه T1می‌توان نتیجه گرفت جریان و فرکانس مناسب‌تر است. شکل(3-ج) نمونه جوشکاری شده به روش TIGبا جریان 55 آمپر و فرکانس 80 هرتز را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود در بعضی از نقاط گرده بیش از حد جوش و در بعضی نقاط عدم تشکیل گرده کافی دیده می‌شود که می‌توان نتیجه گرفت فرکانس انتخاب شده برای جوشکاری این نمونه نامناسب بوده است. بنابراین نمونه بعدی با فرکانس کمتر جوشکاری شد (شکل 3-د). چنانچه در این شکل دیده می‌شود این نمونه نسبت به سایر نمونه‌های جوشکاری شده قبلی به روش TIG ظاهر بهتری دارد، که نشان می‌دهد که ولتاژ و جریان انتخاب شده بهتر از دیگر نمونه‌هاست.



شکل 3-الف) نمونه جوشکاری شده با کدT1، ب) نمونه جوشکاری شده با کدT2، ج) نمونه جوشکاری شده با کدT3، د) نمونه جوشکاری شده با کدT4.



شکل 4-الف) نمونه جوشکاری شده با کدTP1، ب) نمونه جوشکاری شده با کد TP2، ج) نمونه جوشکاری شده با کدTP3، د) نمونه جوشکاری شده با کد TP4.

در روش قوس پالسی جریان جوشکاری به سرعت از یک مقدار حداکثر به مقدار حداقل زمینه تغییر می‌کند که این کار سبب ایجاد نقطه جوش‌های روی هم قرار گرفته می‌شود. این موضوع به خوبی در شکل(4) که مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده به روش TIGپالسی هستند، دیده می‌شود. شکل(4-الف) نمونه جوشکاری شده به روش TIGپالسی با شرایط جریان پیک 75 آمپر، جریان زمینه 35 آمپرو فرکانس 80 هرتز را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود ظاهر جوش قابل قبول است و این شرایط جوش مناسبی ایجاد می‌کند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول 6- اندازه دانه مناطق مختلف نمونه های جوشکاری شده به روش جوشکاری TIG.

کد نمونه	اندازه دانه BM(µm)	اندازه دانهHAZ(µm)	اندازه دانهMZ(µm)
T1	۴/۴	۶	۷/۲
T2	۳/۴	۴/۹	۵/۸
T3	۷	۵/۳	۶/۵
T4	۴/۶	۵/۳	۵/۹

شکل(4-ب) نمونه جوشکاری شده به روش TIG پالسی با شرایط جریان پیک 70 آمپر، جریان زمینه 30 آمپرو فرکانس 60 هرتز را نشان می‌دهد. این شرایط نیز جوش خوبی را ایجاد می‌کند. شکل (4-ج) نمونه جوشکاری شده به روش TIG پالسی با شرایط جریان پیک 75 آمپر، جریان زمینه 35 آمپر و فرکانس 60 هرتز را نشان می‌دهد. در این نمونه بریدگی کنار جوش دیده می‌شودکه می‌توان علت آن را فرکانس پایین دانست. بنابراین این شرایط برای جوشکاری چندان مطلوب نیست. شکل(4-د) نمونه جوشکاری شده به روش TIG پالسی با شرایط جریان پیک 75 آمپر، جریان زمینه 35 آمپر و فرکانس 70 هرتز را نشان می‌دهد. از نظر بازرسی چشمی در ابتدای نمونه بریدگی کناری جوش مشاهده می‌شود که این مربوط به اپراتور است، ولی این نمونه نسبت به سایر نمونه‌های جوشکاری شده به روش پالسی بهتر است که می‌توان نتیجه گرفت شرایط آن مطلوب‌تر است. استفاده از جریان متناوب برای آلیاژهای منیزیم دارای مزایای متعددی است. از مهم ترین مزیت آن می توان به تمیزکاری کاتدی حین جوشکاری به علت خاصیت اکسیداسیون بالای منیزیم اشاره کرد. همچنین جریان متناوب باعث کاهش حرارت ورودی به قطعه کار و تولید جوش های باریک‌تر به خصوص حین استفاده از گاز آرگون به‌عنوان گاز محافظ می شود. برخلاف جوشکاری با جریان ثابت، در جوشکاری TIG پالسی انرژی حرارتی فقط در حین برقراری جریان حداکثر در فلز پایه فراهم می‌شود و در زمان جریان زمینه پراکنده می‌شود و انجماد صورت می‌گیرد. جریان حداکثر، رسوب مناسب و شکل دانه جوشکاری را کنترل می‌کند. با توجه به اینکه در این تکنیک گرمای ورودی به فلز پایه کاهش می‌یابد، منطقه ذوب دانه ریزتر و کیفیت جوش بالاتر است. فواید متالورژیکی جریان پالسی شامل ریزدانگی ناحیه ذوب، کاهش عرض منطقه متاثر از حرارت، کنترل جدایش ها، کاهش اعوجاج و حرارت ورودی و .... که درتحقیقات ذکر شده است [14و15].

3-2-بررسی اندازه دانه های به دست آمده از تصاویر میکروسکوپی نوری

در جدول(6) اندازه دانه مناطق مختلف نمونه های جوشکاری به روش TIG نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود اندازه دانه‌ها در ناحیه جوش نمونه T1نسبت به سایر نمونه‌ها بزرگ‌تر است. با توجه به اینکه میزان فرکانس و جریان در جوشکاری این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر است بنابراین انتظار می رود که با حرارت ورودی کمتر اندازه دانه کمتری نسبت به سایر نمونه ها داشته باشد اما مشاهده می شود اندازه ی دانه های T1بیش تر است، علت این امر را می توان افزایش تشکیل رسوب β-$Mg_{17}Al_{12}$ نسبت به سایر نمونه ها در مناطق ذوب دانست که منجر به کاهش درشت شدن اندازه دانه می‌شود. با توجه به جدول(6) ملاحظه می‌شود که در نمونه T2 ناحیه HAZ دارای اندازه دانه های درشت تری است. همچنین ملاحظه می‌شود که اندازه دانه ها در ناحیه MZ (منطقه ذوب) نسبت به فلز پایه افزایش یافته است، اما نسبت به ناحیه HAZ تفاوت چندانی ندارد. از آن‌جا که در جوشکاری این نمونه نسبت به نمونه T1 جریان تغییر کرده می‌توان گفت که افزایش جریان موجب می‌شود که اختلاف بین اندازه دانه در ناحیه MZ و ناحیه HAZ کمتر شود. علت این امر را می‌توان افزایش حرارت ورودی جوشکاری بر اثر افزایش جریان دانست. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول7- اندازه دانه به روش جوشکاری TIG پالسی.

کد نمونه	اندازه دانه BM(μm)	اندازه دانهHAZ(μm)	اندازه دانهMZ(μm)
TP1	۵/۲	۵/۹	۶/۴
TP2	۶/۸	۶/۴	۵/۱
TP3	۵/۸	۹/۴	۳/۴
TP4	۴/۲	۷/۱	۵/۲

افزایش حرارت ورودی در نـاحیـه HAZ، اغلب منجر به تبلور مجدد و رشد دانه ها می‌شود[16].پس از نمونه T1، نمونه T3بیشترین اندازه دانه را دارد. زیرا در مقایسه با نمونه های T2و T4فرکانس بیشتر و در نتیجه حرارت ورودی بیشتری دارد و بنابراین اندازه دانه افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که نمونه T4با داشتن فرکانس بیشتر و در نتیجه حرارت ورودی بیشتر نسبت به T2اندازه دانه بیشتری دارد.

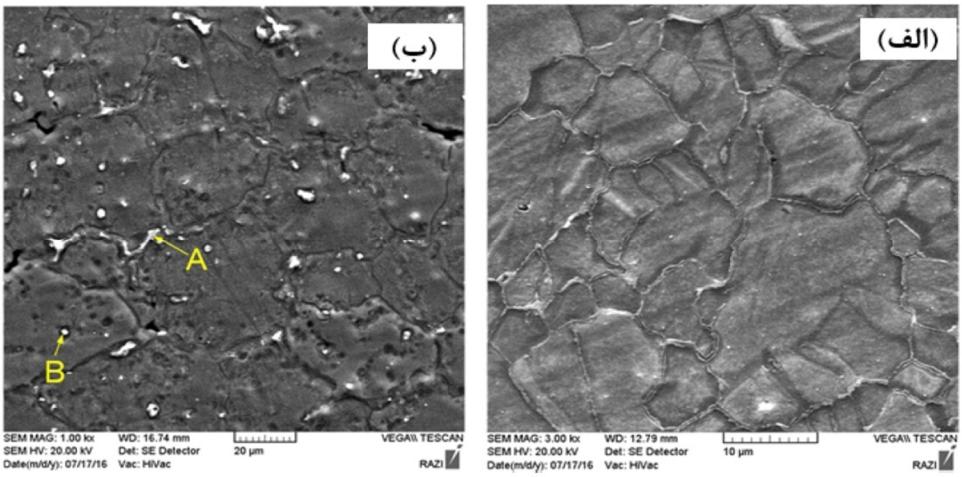
در ناحیه HAZ نمونه T3 دانه‌ها نسبت به BM (فلز پایه) درشت‌تر هستند و اندازه دانه‌ها در ناحیه MZ نسبت به ناحیه HAZ کاهش یافته است. بنابراین با توجه به نمونه T2 افزایش فرکانس از 60 هرتز به 80 هرتز موجب می شود که حرارت ورودی افزایش بیابد و در نتیجه اندازه دانه در ناحیه HAZ نسبت به ناحیه MZ، به علت افزایش زیاد حرارت ورودی در ناحیه HAZ، افزایش یابد. علت این امر را می‌توان افزایش دمای این منطقه به بالاتر از دمای تبلور مجدد در آلیاژهای منیزیم سری AZ دانست. دمای تبلور مجدد آلیاژهای منیزیم سری AZ حدود 205 درجه سانتی گراد است که افزایش دما به بالاتر از این دما موجب تبلور مجدد دانه ها می‌شود و بنابراین اندازه ی دانه ها افزایش می یابد[17].

ناحیه HAZ نمونه T4به علت تبلور مجدد و رشد دانه ها، دارای اندازه دانه بیشتر نسبت به فلز پایه است. همچنین اندازه دانه در ناحیه MZنسبت به ناحیه HAZکاهش یافته است که البته این کاهش نسبت به نمونه T3چندان زیاد نیست، زیرا در جوشکاری این نمونه از فرکانس 70 هرتز استفاده شده است بنابراین حرارت ورودی در این نمونه نسبت به نمونه T3کمتر است که همین امر موجب کاهش رشد دانه ها در ناحیه HAZ نسبت به نمونه قبلی شده است.

جدول(7) اندازه دانه مناطق مختلف نمونه های جوشکاری به روش TIGپالسی را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود اندازه دانه در ناحیه جوش نمونه TP1، به علت حرارت ورودی بیشتر نسبت به سایر نمونه‌ها، بیشتر است. پس از آن نمونه TP4با اختلاف ناچیزی نسبت به TP2اندازه دانه بزرگتری دارد و TP3با داشتن کمترین فرکانس و در نتیجه کم‌ترین حرارت ورودی کوچک‌ترین اندازه دانه را دارا است. در بررسی مقایسه بین TIG وTIGپالسی در ناحیه ی ذوب، اندازه دانه ها در روش جوشکاری TIGپالسی کمتر از اندازه ی دانه در روش TIGاست.

در نمونهTP1 ناحیه HAZدارای اندازه دانه بزرگ تری نسبت به BMاست و اندازه دانه ها در ناحیه MZ تقریباً با ناحیه HAZبرابر است. علت این امر را می توان بیشتر بودن حرارت ورودی در ناحیه HAZنسبت به ناحیه MZاست که منجر به افزایش بیشتر اندازه دانه می‌شود. ناحیه HAZ در نمونه TP2 دارای اندازه دانه‌های درشت تری نسیت به BMاست و اندازه دانه‌ها در ناحیه MZ تقریبا با ناحیه HAZبرابر است. اندازه دانه‌ها در ناحیه HAZ و MZنسبت به ناحیه HAZو MZ در نمونه TP1 کاهش یافته است. علت این امر را می توان کاهش جریان دانست. با کاهش جریان پیک، حرارت ورودی کاهش یافته و در نتیجه اندازه دانه های مناطق HAZ و MZکاهش می‌یابد. کاهش شدت جریان و کاهش گرمای ورودی باعث می‌شود که دانه ها در حین انجماد کمتر اجازه رشد پیدا کنند و ساختار نهایی جوش ناشی از انجماد در منطقه جوش به سمت ریز شدن پیش می رود اما در منطقه HAZ به دلیل افزایش درجه حرارت و افزایش گرادیان حرارتی دانه ها زمان بیشتری را برای رشـد دارد و در نهـایت منجـر به رشـد دانـه‌ها

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل5-(الف)تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه HAZ، (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه جوش نمونه T2.

در این منطقه در حین انجماد می شوند [16]. درنمونه TP3 ناحیه HAZدارای اندازه دانه های درشت‌تری نسبت به BM است و اندازه دانه ها در ناحیه MZ نسبت به اندازه دانه ها در ناحیه HAZ کاهش یافته است. در نمونهTP4 اندازه دانه ها در ناحیه MZ تقریبا با ناحیه HAZ برابر است. علت این امر را می‌توان افزایش حرارت ورودی نسبت به نمونه TP3 دانست. در مقایسه اندازه دانه محاسبه شده برای نمونه های جوشکاری شده به روش TIGپالسی (جدول 7) ملاحظه می‌شود که با افزایش جریان در فرکانس ثابت، اندازه دانه افزایش می‌یابد.

در بررسی صورت گرفته توسط نظر پور و همکارانش[16] در خصوص جوشکاری پالسی آلیاژ آلومینیم نیز مشاهده شده است که با افزایش جریان پالس اندازه دانه ها درشت تر شده است. همچنین افزایش اندازه دانه در ناحیه HAZنسبت به فلز پایه و ناحیه جوش که در تمامی نمونه ها مشاهده شده است. افزایش اندازه دانه ها در ناحیه HAZنسبت به ناحیه MZ به دلیل افزایش درجه حرارت و افزایش گرادیان حرارتی می‌باشد که منجر می شود این ناحیه زمان بیشتری برای رشد دانه ها داشته و در نهایت باعث رشد دانه ها در حین انجماد می شود.

3-3- بررسی تصاویر میکروسکوپی الکترونی

شکل(5) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه HAZ نمونه T2 را نشان می‌دهد.

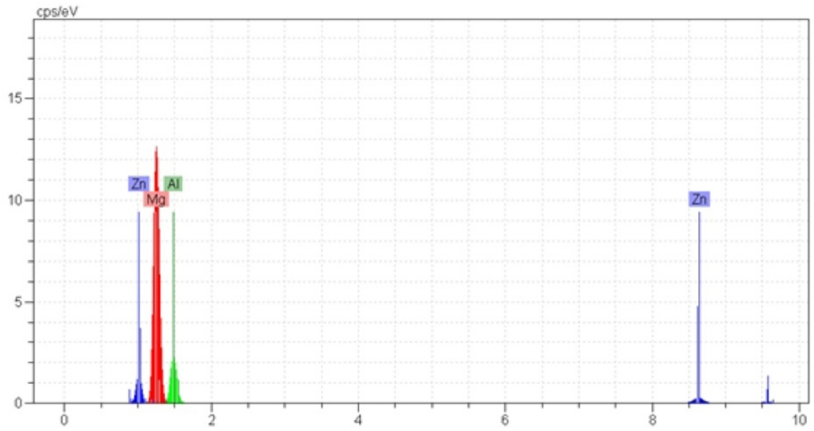
همان‌طور که در شکل مشخص است اندازه دانه ها در ناحیه HAZ نسبت به فلز پایه افزایش یافته است. شکل(7-ب) تصویرمیکروسکوپی الکترونی ناحیه جوش نمونه T2 را نشان می دهد. این شکل نشان می‌دهد که اندازه دانه در ناحیه جوش نسبت به ناحیه HAZکاهش یافته است.

یکی از علل این امر را می توان رسوبات تشکیل شده در ناحیه MZ دانست. سرعت سرمایش زیاد که ناشی از رسانایی حرارتی خوب و ظرفیت گرمایی کم منیزیم است، باعث کاهش رشد دانه ها در منطقه ی جوش می شود. رسانایی حرارتی خوب منیزیم منجر به سرد شدن سریع در ناحیه MZ می شود. بنابراین فرصت لازم برای رشد دانه ها کمتر است و در نتیجه دانه ها افزایش کمتری دارند [18].

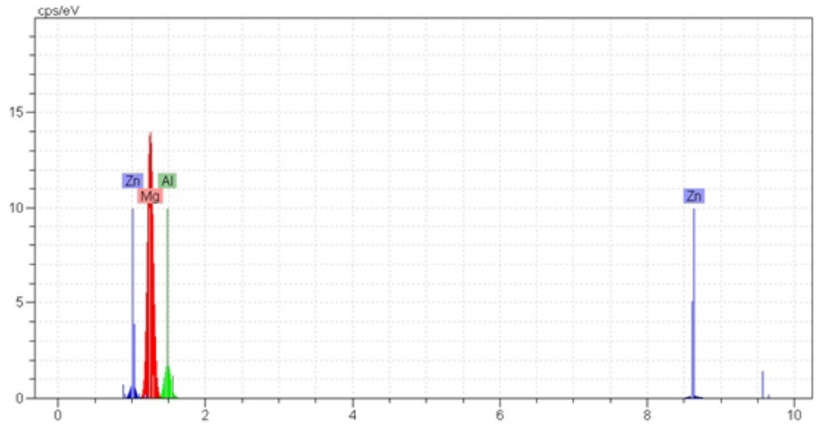
با توجه به شکل(5-ب) مشاهده می‌شود که رسوباتی در ناحیه جوش تشکیل شده است. این رسوبات به صورت محدود در برخی نواحی ناحیه HAZ نیز مشاهده می‌شود (شکل 5-الف).

شکل(6) آنالیز EDSرسوب نقطه A را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود در ترکیب شیمیایی این نقطه عناصر Al، Mg، Zn وجود دارد که با توجه به ترکیب AZ31 منطقی به نظر می‌رسد. منیزیم دارای بیشترین غلظت و پس از آن روی و آلومینیم بیشترین غلظت را دارند. شکل(7) آنالیز EDS رسوب Bرا نشان می‌دهد. در این نقطه نیز دیده می‌شود که غلظت منیزیم‌دارای بیشترین غلظت‌است و پس از آن روی و آلومینیم

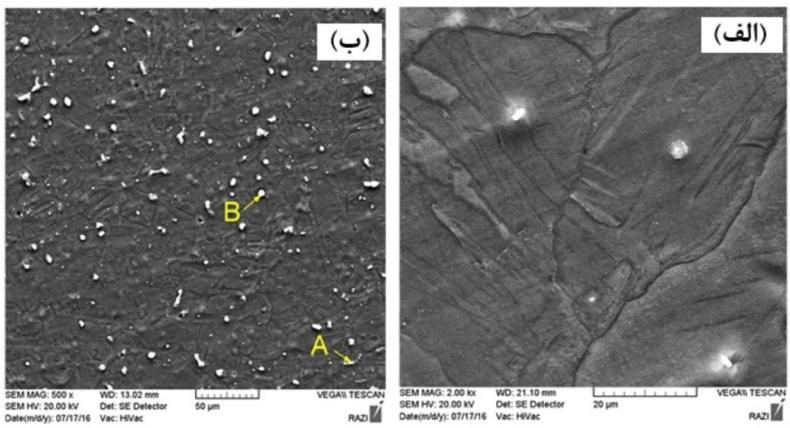
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 6- آنالیز EDSرسوب A در ناحیه جوشکاری شده نمونهT2.



شکل7- آنالیز EDSرسوب B در ناحیه جوشکاری شده نمونهT2.

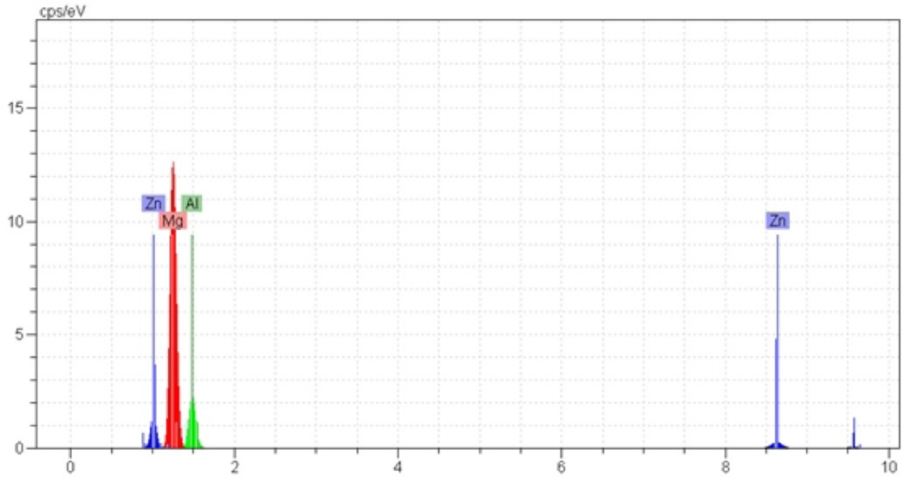


شکل 8- (الف)تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه HAZ، (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه جوش نمونه T3.

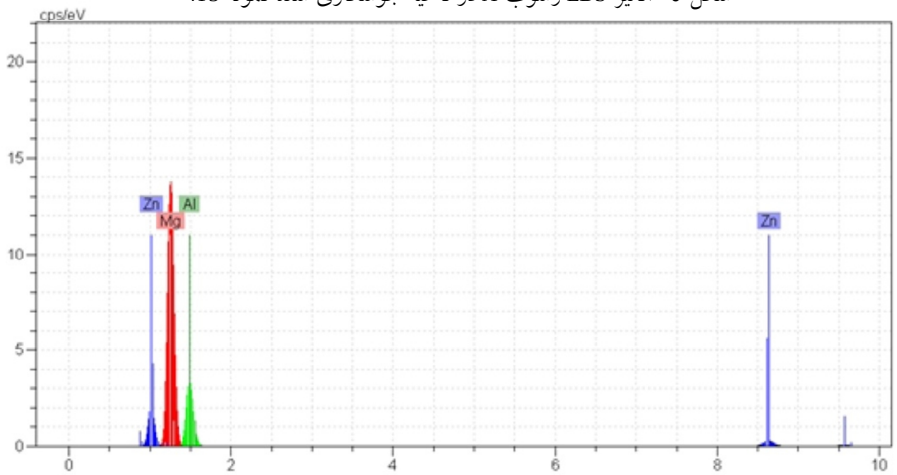
بیشترین غلظت را دارند، اما در این نقطه غلظت تمامی عناصر نسبت به نقطه A بیشتر هستند. شکل(8-الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه HAZ نمونه T3 را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است اندازه دانه‌ها در ناحیه HAZ نسبت به فلز پایه افزایش یافته است.

شکل(8-ب) تصویرمیکروسکوپی الکترونی ناحیه جوش نمونه T3 را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که اندازه دانه در ناحیه جوش نسبت به ناحیه HAZ کاهش یافته است. در این شکل نیز رسوباتی دیده می‌شود که دو نقطه از آن ها بر روی شکل نشان داده شده است. همچنین این رسوبات به

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 9- آنالیز EDS رسوب A در ناحیه جوشکاری شده نمونه T3.



شکل 10- آنالیز EDS رسوب B در ناحیه جوشکاری شده نمونه T3.

صورت محدود در ناحیه HAZ نیز وجود دارد.

شکل(9) نتایج آنالیز EDS رسوب را برای نقطه A از نمونه T3 که در شکل (8-ب) نشان داده شده است، را نشان می‌دهد. در این نقطه منیزیم بیشترین غلظت و روی و آلومینیم پس از آن به ترتیب بیشترین غلظت را دارند. شکل(10) نتایج آنالیز EDS رسوب را برای نقطه B از نمونه T3 نشان می دهد. در این نقطه نیز منیزیم، روی و آلومینیم به ترتیب بیشترین غلظت را دارند که نسبت به نقطه A این غلظت ها به مقدار ناچیزی بیشتر است.

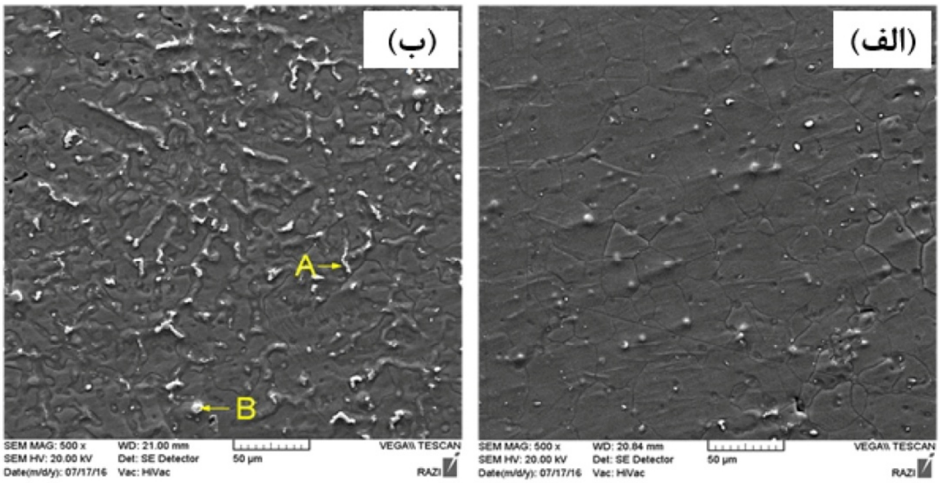
شکل(11-الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه HAZ نمونهTP4 را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است اندازه دانه‌ها در ناحیه HAZ نسبت به BM افزایش یافته است.

شکل(11-ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه جوش نمونه TP4 را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که اندازه دانه در ناحیه MZ تقریبا با ناحیه HAZ برابر است.

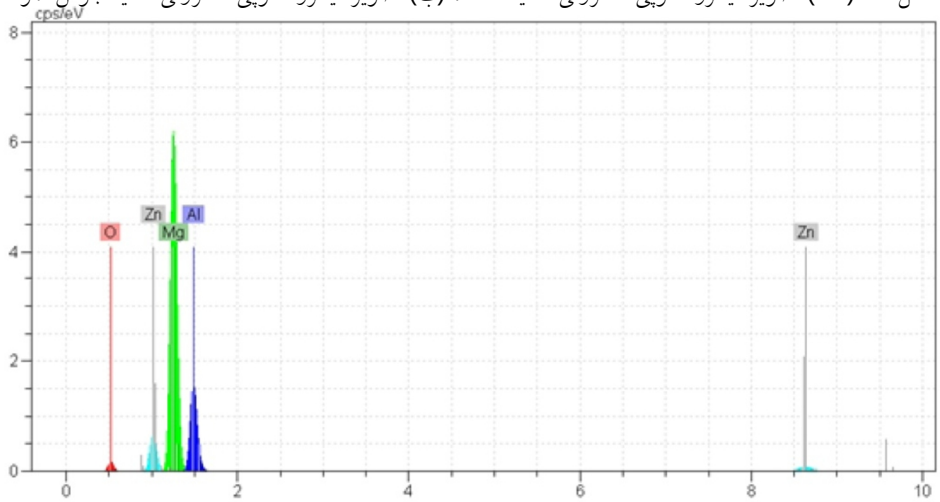
شکل(12) نمودار آنالیز EDS رسوب نقطه A مربوط به نمونه TP4 را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود منیزیم بیشترین آلومینیم، روی و اکسیژن غلظت را دارند. شکل(13) نمودار EDS نقطه Bرا نشان می دهد. در این نمودار دیده می‌شود که آلومینیم، منگنز، منیزیم و اکسیژن بیشترین غلظت را دارند.

به طور کلی فرآیند تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه متأثر از جوش شامل تغییر شکل، جوانه‌زنی و رشد دانه پس از جوشکاری است. به طور مشابه، تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه مذاب و فلزپایه‌رخ می‌دهد. با این حال مکانیزم‌های

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 11-(الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه HAZ، (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه جوش نمونه TP4.



شکل 12- آنالیز EDS رسوب A در ناحیه جوشکاری شده نمونه TP4.

جوانه‌زنی تبلور مجدد دینامیک در ناحیه‌ی مذاب، ناحیه‌ی متأثر از گرما و فلز پایه متفاوت است. برای ناحیه‌ی مذاب، ذرات $Mg_{17}Al_{12}$-β مکان‌های جوانه‌زنی زیادی برای تبلور مجدد دینامیک تولید می‌کند [19]. نتایج EDS نشان می‌دهد که، ناحیه مذاب عمدتا از زمینه Mg-αو $Mg_{17}Al_{12}$-β تشکیل شده بود که با تحقیقات قبلی هم خوانی داشت[20].

این نتیجه‌گیری و مشاهده شدن این نوع رسوبات در تحقیق مشابه توسط چای و همکارانش[21]، بر روی اثر نورد گرم پس از جوشکاری بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی ورق آلیاژهای منیزیوم AZ31 تحقیق انجام شد که نتایج نشان داد که با زیاد شدن کاهش سطح مقطع در نورد گرم، ریزساختـــار ناحیه مـــذاب و ناحیه متـاثر از حرارات بیشتـر با فلز پایه هماهنگی پیدا می‌کند سپس فازهای سخت $Mg_{17}Al_{12}$-β در ناحیه مذاب به تدریج در حین نورد گرم حل می‌شوند. بنابراین، میانگین اندازه دانه ناحیه مذاب، ناحیه متاثر از گرما و فلز پایه تقریبا پس از سومین پاس نورد گرم پس از جوشکاری با هم هماهنگ شده است. که با توجه به تحقیقات گزارش شده و نتایج بدست آمده می توان حدس زد که رسوبات دیده شده در آزمایش‌ها، رسوباتی سخت از نوع $Mg_{17}Al_{12}$ می‌باشند.

3-4- آزمون کشش

نتایج آزمون کشش نمونه های جوشکاری شده با روش TIGدر جدول(8) نشان داده شده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول 8- استحکام نهایی و درصد افزایش طول نمونه های جوشکاری شده به روش TIG.

کد نمونه	تنش UTS(MPa)	ازدیاد طول(%)
بدون جوش	۲۵۶/۷	۵/۶
T1	۲۲۵/۷	۲/۴
T2	۱۴۷/۲	۱/۳
T3	۵۱/۳	۰/۴
T4	۷۶/۸	۰/۳

در مورد نمونه‌های جوشکاری شده به روش TIGدیده می‌شود که نمونهT1دارای استحکام بیشتری نسبت به سایر نمونه‌هاست و نمونه‌های T2،T4 و T3 نیز به ترتیب بیشترین استحکام را دارند. با توجه به این نتایج می‌توان گفت نمونه‌ای که جریان کمتری در جوشکاری آن مورد استفاده قرار گرفته است (T1) دارای استحکام بیشتری می‌باشد و برای نمونه‌های با جریان ثابت بسته به مقدار فرکانس، با افزایش فرکانس استحکام کاهش یافته است. با توجه به اینکه نمونه T1 نسبت به سایر نمونه ها از جریان و فرکانس کمتری در جوشکاری برخوردار بوده است، در نتیجه حرارت ورودی در این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر بوده است و در بیشتر رسوبات در مرز دانه‌ها تشکیل شده است و در نتیجه استحکام بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. با توجه به اینکه نمونه T3نسبت به سایر نمونه‌ها بیش‌ترین فرکانس را دارد، در نتیجه بیش‌ترین حرارت ورودی و اندازه دانه و همچنین کم‌ترین استحکام را دارد. به‌طور کلی مشاهده می‌شود که استحکام تمامی نمونه‌ها از نمونه بدون جوش کمتر است.

رشد دانه ها در ناحیه HAZ منجر به کاهش خواص مکانیکی می‌شود[22]. به طور کلی افزایش اندازه دانه باعث کاهش استحکام می‌شود که با توجه به رابطه Hall-Petch قابل توجیه است. این رابطه 1 به صورت زیر است[16]:

$$\sigma=\sigma_{\circ}+kd^{-1/2} \quad (1)$$

که σ_o و k مقادیر ثابت و d میانگین اندازه دانه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش اندازه دانه‌ها استحکام کاهش می‌یابد. در واقع استحکام و اندازه دانه با یکدیگر رابطه عکس دارند. نتایج حاصل از تست کشش برای نمونه‌های جوشکاری شده با روش TIGپالسی در جدول(9) نشان داده شده‌اند.

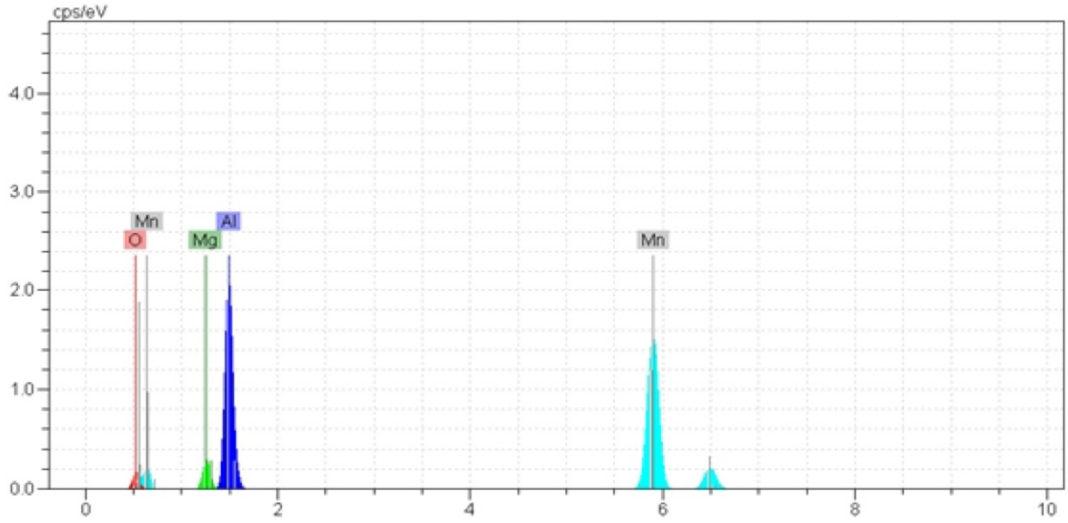
جدول 9- تنش UTS و تغییر طول در نقطه شکست برای نمونه‌های جوشکاری شده به روش TIGپالسی.

کد نمونه	تنش UTS(MPa)	ازدیاد طول(%)
TP1	۲۰/۵	۰/۲
TP2	۸۸/۱	۰/۴
TP3	۹۰/۶	۰/۴
TP4	۱۰۸/۷	۰/۷

در مورد نمونه‌های جوشکاری شده به روش TIG پالسی، مشاهده می‌شود که نمونه TP4دارای بیش‌ترین استحکام است و بعد از آن نمونه‌های TP3، TP2و TP1 به ترتیب بیش‌ترین استحکام را دارند. با مقایسه نمونه‌های TP3و TP4 می‌توان به این نتیجه رسید که با وجود زمینه جریان و پیک جریان یکسان، فرکانس بیشتر، جوش قوی‌تری را ایجاد کرده است. در جوشکاری TIGپالسی افزایش فرکانس منجر به ریز دانه‌تر شدن نمونه می‌شود و در نتیجه استحکام افزایش یافته است[23]. از طرفی نیز در مطالعه کومار و همکاران که بر روی جوش‌های TIGپالسی فلزات آلومینیم و تیتانیم به بهبود خواص مکانیکی با افزایش فرکانس پالس اشاره شده است. این پژوهشگران ادعا کرده‌اند که افزایش فرکانس پالس منجر به ایجاد اختلال بیشتر گرمایی و مکانیکی می‌شود، به‌گونه‌ای که پیامد شکل‌گیری دانه‌های ریزتر و هم‌محورتر در فلز جوش خواهد بود [14]. در مورد نمونه های TP1و TP2مشاهده می‌شود که با وجود فرکانس برابر، نمونه‌های جوشکاری شده با زمینه جریان و پیک جریان کمتر استحکام بیشتری دارند. زیرا جریان کمتر تاثیر کمتری بر رشد دانه خواهد داشت و در نتیجه نمونه با جریان جوشکاری کمتر استحکام بیشتری دارد.

در جوشکاری تیگ پالسی جریان بالایی پالس و فرکانس پالس بیش ترین تاثیر را بر استحکام کششی نهایی اتصال دارند. این رفتار را می توان چنین تحلیل کرد که حین جوشکاری، منیزیم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل 13- آنالیز EDS رسوب B در ناحیه جوشکاری شده نمونه TP4.

و روی در دمای بالا، به دلیل داشتن نقاط ذوب و جوش پایین‌تر و فشار بخار بالاتر نسبت به آلومینیم به راحتی تبخیر می شوند. تاثیر استحکام دهی روی در آلیاژ های Mg-Al-Zn به علت تشکیل محلول جامد و افزایش حلالیت آلومینیم است. در حقیقت، تبخیر روی درجریان بیشینه بیشتر می‌شود و درنتیجه، گرمای ورودی بالاتر منجر به کاهش تأثیر استحکام‌دهی محلول جامد آلومینیم و روی در اتصالات می‌شود. افزون بر این، افزایش سختی را می‌توان به ریز بودن دانه‌ها در گرمای ورودی کمتر، به دلیل جریان بیشینه کمتر (ترازنخست) و تأثیر استحکام‌دهی فاز سخت و پراکنده β-$Mg_{17}Al_{12}$ مربوط دانست.

با مقایسه ی خواص کششی آورده شده در جداول(8 و 9) می‌توان دریافت که استحکام کششی نهایی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. می‌توان بیان کرد که در حرارت ورودی کم به علت ایجاد برخی عیوب جوش نظیر تخلخل و نفوذ ناکافی جوش باعث کاهش استحکام کششی نهایی در اتصال می شود. با این وجود با افزایش بیشتر حرارت ورودی استحکام کششی نهایی اتصالات کمی کاهش می یابد.

4-نتیجه گیری

بطورکلی هدف از پژوهش انجام شده رسیدن به بهترین خواص مکانیکی و ریزساختاری با استفاده از روش جوشکاری TIG و TIG پالسی با استفاده از فلز پر کننده یکسان AZ92 بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 است. با توجه به نتایج بدست آمده موارد زیر به عنوان نتیجه گیری ارایه می‌شود:

- بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داد که در ناحیه جوش رسوباتی تشکیل شده است. با توجه به بررسی های پیشین صورت گرفته این رسوبات از نوع β-$Mg_{17}Al_{12}$ است. در تصاویر SEM نیز دانه ها و رسوبات به طور واضح تر قابل مشاهده هستند.
- در مقایسه ی نمونه ها در آزمون کشش نتایج نشان داد که نمونه فرکانس 60 Hz و جریان 50 A در میان کل نمونه ها بیشترین استحکام را دارد. در نمونه های جوشکاری شده به روش TIG مشاهده شده است که افزایش جریان باعث افزایش حرارت ورودی و در نتیجه کاهش استحکام می شود و از طرفی با افزایش فرکانس نیز استحکام کاهش یافته است. در میان نمونه های جوشکاری شده به روش TIG پالسی مشاهده می‌شود که نمونه های جوشکاری شده با جریان زمینه و جریان پیک کمتر استحکام بیشتری دارند. زیرا جریان کمتر منجر به افزایش کمتر در اندازه دانه ها می‌شود و در نتیجه نمونه استحکام بیشتری دارد.
- با افزایش گرمای ورودی، استحکام کششی نهایی اتصال جوش افزایش می‌یابد به علت اینکه گرمای ورودی خیلی کم منجر به بروز نفوذ جزیی و ناخالصی ها می شود. با این وجود،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

در گرمای ورودی زیاد به علت تبخیر فلز روی از آلیاژ منیزیم AZ31 منجر به کاهش استحکام نهایی مقطع اتصال جوش می‌شود.

• افزایش گرمای ورودی، منجر به درشت شدن دانه های α-Mg در منطقه ی ذوب می شود. بعلاوه با افزایش گرمای ورودی فازهای درون دانه ای و پراکنده β-$Mg_{17}Al_{12}$ از بین می‌رود و دانه های β-$Mg_{17}Al_{12}$ در منطقه ذوب به حالت درون دانه‌ای و تجمعی تغییر حالت می یابد.

منابع

[1] Kulekci. M. K ,. London D.T., "Magnesium and its alloys applications in automotive industry" ,The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 39, pp 851-865, 2008.

[2] ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys,ASM Int. ,1999.

[3] Lei Z., Jiang Bi, Peng Li, Tao Guo, YaobangZhaob, Dengming Zhang, "Analysis on welding characteristics of ultrasonic assisted laser welding of AZ31B magnesium alloy', Optics and Laser Technology 105 (2018) 15–22

[4] ShaoxingZ,YangS.,China D.T ," In Vitro Degradation, Hemolysis and MC3T3-E1 Cell Adhesion of Biodegradable Mg–Zn alloy", Materials Science and Engineering C, Vol. 29, PP. 1907-1912, 2009.

[5] Yingwei S, DayongS ., China D.T," Biodegradable Behaviors of AZ31 Magnesium Alloy in Simulated Body Fluid", Materials Science and Engineering C, Vol. 29, PP. 1039-1045, 2009.

[6] Wong H M ,Yeung K W.,China D.T," A Biodegradable Polymer-Based Coating to Control the Performance of Magnesium Alloy Orthopaedic Implants", Biomaterials, Vol. 31, PP. 2084-2096, 2010.

[7] DingchuanX,Yeoheung Y,.USA D.T, "Corrosion Protection of Biodegradable Magnesium Implants Using Anodization", Materials Science and Engineering C, Vol. 31, PP. 215- 223, 2011.

[8] Tuz. L, Kolodziejczak. P, Kolasa. A, "Structure of butt joint of as-cast magnesium alloy", Welding International, 30, pp. 43-47, 2014.

[9] Gou L., Tang A., Pan F., She J., Luo S., Ye J., Shi D., Rashad M. , " Influence of Sn addition on mechanical properties of gas tungsten arc welded AM60 Mg alloy sheets", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, vol. 26, pp. 2051-2057, 2016.

[10] Asadi, P., Elhami, A., and Kazemi-ChoobiK.Iran D.T. , Welding of magnesium alloys. INTECH Open Access Publisher, 2012.

[11] James.A .Toronto D.T ,"Localized corrosion of friction stir spot welds in mangnesium AZ31 alloy" , Materials Science and Engineering, pp.1-98, 2012.

[12] Yunhai.S, Zhengjun.L., China D.T., "Effect Of Magnetic Field on Microstructure and Properties of Magnesium Alloy Welded Joint with GTAW" ., Advanced Materials Research Vols. 189-193 pp 3507-3510, 2011.

[13] Chun M.L, ChingM.C.,ChinaD.T.,"Evolution of microstructures and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy weldment with active oxide fluxes and GTAW process", Journal of the Chinese Institute of Engineers , Vol. 34, No. 8, pp, 1013–1023, 2011.

[14]Senthil Kumar T., Balasubramanian, V., and Sanavullah, M. Y., "Effect of pulsed current TIG welding parameters on tensile properties of AA6061 aluminium alloy", Indian Welding Society. PP. 29-39, (2005).

[15] Gokhale, A. A., Tzavaras, A. A., Brody, H. D., Ecer, G. M., Abbaschian, G. J., and David, S. A.,"Grain Refinement in Castings and Welds", TMS-AIME, Warrendale, PA, p. 223, (2005).

[16] Chen, J, Liu, T, Lu, L, Zhang, China D.T. "Microstructure and mechanical property of rolled-weld magnesium alloy AZ31", Material and Design, 36, pp: 577-583, 2012.

[17] امیرخانی نجف آبادی،ع. ابراهیمی، ع." بهینه سازی متغیرهای فرایند جوشکاری TIG پالسی به منظور بهبود خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری شده در آلیاژ منیزیم AZ31"، نشریه ی مهندسی متالورژی ایران،سال بیست و چهارم، ص ص.48-55، سال 1391.

[18] Sq, S, Lj, W,.Korea D.T. "Mechanical properties of Mg alloys welded joints". Weld Technol, 33, pp: 110, 2004.

[19]M. Hakamada, A. Watazu, Japan D.T-" Dynamic recrystallization during hot compression of as-cast and homogenized noncombustible Mg–9Al–1Zn–1Ca (in mass%) alloys"- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology- Pages 7143–7146-(2010).

[20]T.C. Chang, J.Y. Wang, Taiwan D.T. "Grain refining of magnesium alloy AZ31 by rolling"- Department of Mechanical Engineering- pp 588–591-(2003).

[21] Chai S , Zhang D. China D.T. " Influence of post-weld hot rolling on the microstructure and propertis properties of AZ31 magnesium alloy sheet" MaterialsScience&EngineeringA588-208–213(2013).

[22] Cao, X., Immarigeon, J. P., Canada D.T., "A review of laser welding techniques for magnesium alloys" , Journal of Materials Processing Technology, Vol. 171, pp. 188-20, 2006.

[23] Liu, L, Dong, Ch,China D.T. "Gas tungsten-arc filler welding of AZ31 magnesium alloy", Materials Letter, 60, pp: 2194-2197, 2006.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]