

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

سیده زهرا انوری^{1*}، محمدرضا الهی²

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 TIG و TIG پالسی به منظور جوشکاری و اتصال آلیاژ AZ31 استفاده شد و در نهایت ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون کشش و میکروسختی سنجی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در ناحیه جوش رسوبات β -Mg₁₇Al₁₂ تشکیل شده است و گرمای ورودی اندازه دانه‌ها را تحت تاثیر قرار داده و منجر به تغییر در خواص مکانیکی شده است. نمونه جوشکاری به روش TIG با جریان 50 A و فرکانس 60 Hz بیشترین استحکام (226MPa) را در میان نمونه‌های جوشکاری شده به روش TIG و TIG پالسی داشت. در میان نمونه‌های 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. Elahi²

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

2-Daneshpajooan 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: szanvari@gmail.com

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 -Mg₁₇Al₁₂ 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

دوگانه برای آلیاژ منیزیم بکار رفته اند [4-8].

جوش پذیری آلیاژهای منیزیم را می توان بر حسب فاکتورهای گوناگون بررسی کرد. مهم ترین فاکتوری که جوش پذیری آلیاژهای منیزیم را بر آن اساس می سنجند، میزان حساسیت آلیاژ جوشکاری شده در برابر ترکها است. هر چند پارامترهای مهم دیگری نظیر مقدار سوختن و تبخیر منیزیم در اثر جوشکاری، سیالیت مذاب و مسایل اقتصادی و ایمنی تاثیرگذار است. عموماً از روشهای TIG و MIG برای جوشکاری این آلیاژ استفاده می شود که مهم ترین پارامتر برای انتخاب فلز پر کننده، هماهنگی ترکیب شیمیایی فلز پر کننده با فلز پایه است [9 و 10].

آلیاژ AZ31 از نظر جوش پذیری نسبت به سایر آلیاژهای 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].

اخیراً تحقیقات مربوط به فرایندهای جوشکاری آلیاژهای منیزیم به سرعت زیاد شده اند. یانهایی سو و همکارانش [12] در سال 2011 بر روی اثر میدان 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 میلی متر با روش جوشکاری تیگ جوش داده شده بود مورد بررسی قرار گرفت.

منیزیم در گستره وسیعی از کاربرد ها از جمله صنایع استخراج فلزات، شیمیایی، الکترو شیمیایی و حمل و نقل مورد استفاده قرار می گیرد. 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 سازه ها بویژه در سازه های متحرک و نظامی شده است. یکی از مهم ترین مصارف آلیاژهای منیزیم در صنایع نظامی و هوایی است. استفاده از منیزیم در چهار چوب بدنه هواپیماها، موشکها، تانکها و اتومبیلها به عنوان پوسته های خارجی کلاهک، بدنه ی موتور جت، بدنه ی 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 ویژه ی زیاد، آن ها را به یک جایگزین نویدبخش برای دیگر مواد سنگین تر 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. روش های اتصال مؤثر نقش مهمی در بهبود کاربرد آلیاژ منیزیم ایفا می کنند. تنوعی از روش های جوشکاری مختلف مانند جوشکاری TIG، جوشکاری اصطکاکی (FSW)، جوشکاری اشعه لیزر (LBW) و جوشکاری

جدول 1- ترکیب شیمیایی نمونه‌های AZ31.

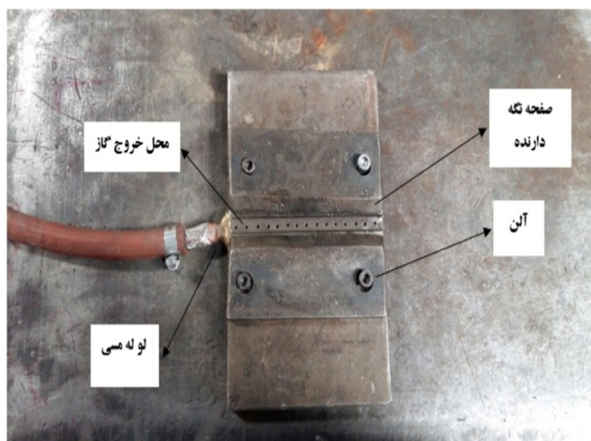
Alloy	%Al	%Zn	%Mn	%Cu	%Si	%Ni	%Fe	%Mg
AZ31	۳/۰۲۳	۱/۱۱۷	۰/۳۷۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	باقیمانده
ترکیب شیمیایی استاندارد	۳/۵-۲/۵	۱/۴-۰/۶	۱-۰/۲	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	باقیمانده

جدول 2- 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

استاندارد [2] در جدول (1) و ترکیب شیمیایی فلز پرکننده در جدول (2) مشخص شده است. با توجه ترکیب شیمیایی استاندارد AZ31 مشاهده می‌شود که ترکیب شیمیایی نمونه‌ها از نوع آلیاژ AZ31 است.

در این پژوهش از دو فرایند جوشکاری TIG و TIG پالسی استفاده شد. نمونه‌ها در نگه دارنده قرار گرفتند (شکل 1) و آماده جوشکاری شدند. در شکل (1) قسمت‌های 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 پستی است.



شکل 1- آماده سازی نمونه‌ها جهت انجام عملیات جوشکاری.

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

نتایج آن تحقیق نشان می‌دهد که خواص اتصال جوش داده شده با اعمال میدان مغناطیسی نسبت به حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی بهتر است.

با فرکانس و جریان مناسب میدان مغناطیسی می‌توان با شکستن دانه‌ها و کریستال‌ها باعث اصلاح دانه‌های 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 آلیاژ منیزیم AZ31B قطعات به هم جوش خورده به روش تیگ با شاراکسید فعال مورد بحث قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شد که استفاده از روان ساز فعال تاثیر زیادی بر جوشکاری ورق منیزیم دارد.

از مهمترین روش‌های جوشکاری این آلیاژهای منیزیم می‌توان به روش TIG و TIG پالسی 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 TIG انتخاب شد و مقایسه بین جوشکاری با روش‌های TIG و TIG پالسی بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 صورت گرفت.

2- روش انجام آزمایش

در این تحقیق از ورق‌های آلیاژ منیزیم AZ31 با ابعاد 15×5cm، پرکننده AZ92 به قطر 1/6 mm و الکتروود تنگستنی با قطر 1/6 mm استفاده شد. ترکیب شیمیایی نمونه‌ها با استفاده از روش انتشار طیفسنجی اتمی به دست آمد. ترکیب شیمیایی به دست آمده از آنالیز نمونه‌ها و ترکیب شیمیایی

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-XMU ساخت 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، نمونه‌ها از بخش میانی اتصال جوش‌ها 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

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 آلودگی‌های سطحی (نظیر چربی‌ها و لایه اکسیدی) سطح نمونه‌ها با استون مورد شستشو قرار گرفت و سپس توسط برس فولاد زنگ نزن برس‌کاری شدند. جوشکاری نمونه‌ها توسط دستگاه گام الکترونیک مدل PSA400A (با آب خنک) صورت گرفت. فرایند جوشکاری TIG و TIG پالسی 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 نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. برای بررسی ترکیب

جدول 3- شرایط کلی جوشکاری نمونه‌ها.

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

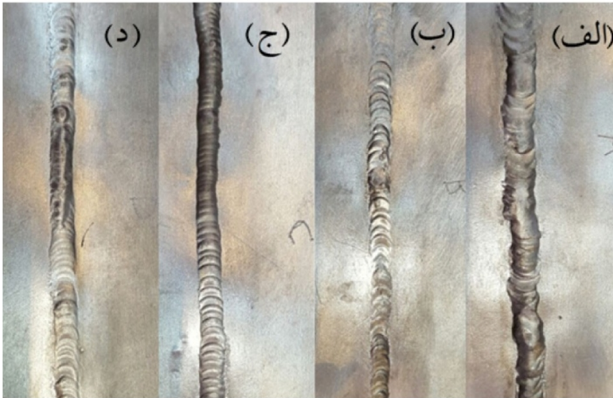
جدول 4- شرایط جوشکاری نمونه‌های جوش داده شده به روش TIG.

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

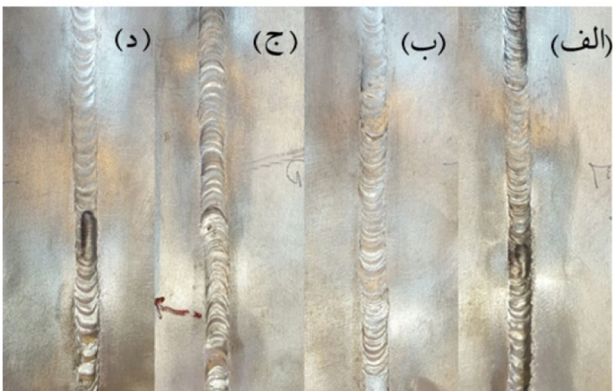
جدول 5- شرایط جوشکاری نمونه‌های جوش داده شده به روش TIG پالسی.

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

(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.



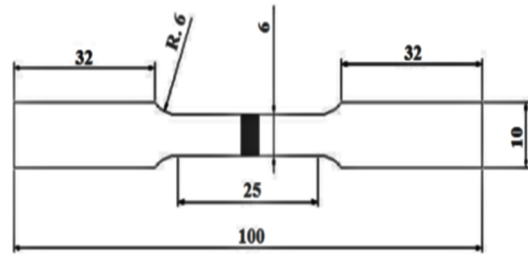
شکل 3-الف) نمونه جوشکاری شده با کد T1، (ب) نمونه جوشکاری شده با کد T2، (ج) نمونه جوشکاری شده با کد T3، (د) نمونه جوشکاری شده با کد T4.



شکل 4-الف) نمونه جوشکاری شده با کد TP1، (ب) نمونه جوشکاری شده با کد TP2، (ج) نمونه جوشکاری شده با کد TP3، (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 TIG پالسی هستند، دیده می‌شود. شکل (4-الف) نمونه جوشکاری شده به روش TIG پالسی با شرایط جریان پیک 75 آمپر، جریان زمینه 35 آمپر و فرکانس 80 هرتز را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود ظاهر جوش قابل قبول است و این شرایط جوش مناسبی ایجاد می‌کند.

آزمون کشش، شیاری به عمق 1 میلی‌متر 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 نمونه‌های جوشکاری شده

نمونه‌های جوشکاری شده طبق جدول (4 و 5) پس از انجام عملیات جوشکاری TIG و TIG پالسی مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (3-الف) نمونه جوشکاری شده به روش TIG را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود کیفیت ظاهری جوش مورد نظر خوب نیست و در این 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 TIG با جریان 55 آمپر و فرکانس 60 هرتز را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود ظاهر جوش نسبت به نمونه قبلی مناسب‌تر 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 T1 می‌توان نتیجه گرفت جریان و فرکانس مناسب‌تر است. شکل (3-ج) نمونه جوشکاری شده به روش TIG با 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

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

اندازه دانه MZ (μm)	اندازه دانه HAZ (μm)	اندازه دانه BM (μm)	کد نمونه
7/2	6	4/4	T1
5/8	4/9	3/4	T2
6/5	5/3	7	T3
5/9	5/3	4/6	T4

جوش بالاتر است. فواید متالورژیکی جریان پالسی شامل ریزدانه‌گی ناحیه ذوب، کاهش عرض منطقه متأثر از حرارت، کنترل جدایش ها، کاهش اعوجاج و حرارت ورودی و ... که در تحقیقات ذکر شده است [14 و 15].

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 T1 نسبت 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 می‌رود که با حرارت ورودی کمتر اندازه دانه کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته باشد اما مشاهده می‌شود اندازه ی دانه های T1 بیش تر است، علت این امر را می‌توان افزایش تشکیل رسوب $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ نسبت به سایر نمونه‌ها 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 می‌توان نتیجه گرفت که با

شکل (4-ب) نمونه جوشکاری شده به روش TIG پالسی با شرایط جریان پیک 70 آمپر، جریان زمینه 30 آمپر و 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 می‌شود که 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 مهم‌ترین مزیت آن می‌توان 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 می‌شود. 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

جدول 7- اندازه دانه به روش جوشکاری TIG پالسی.

کد نمونه	اندازه دانه BM (μm)	اندازه دانه HAZ (μm)	اندازه دانه MZ (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

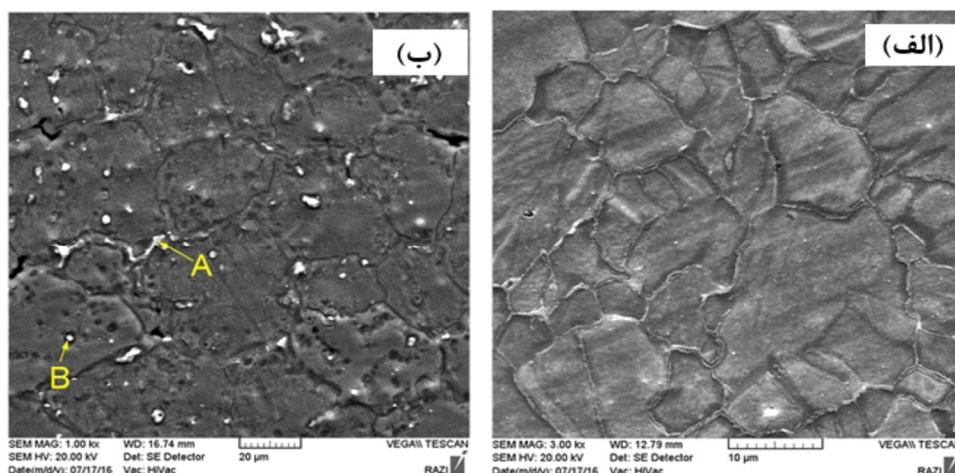
جدول (7) اندازه دانه مناطق مختلف نمونه های جوشکاری به روش TIG پالسی را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود اندازه دانه در ناحیه جوش نمونه TP1، به علت حرارت ورودی بیشتر نسبت به سایر نمونه ها، بیشتر است. پس از آن نمونه TP4 با اختلاف ناچیزی نسبت به TP2 اندازه دانه بزرگتری دارد و TP3 با داشتن کمترین فرکانس و در نتیجه کمترین حرارت ورودی کوچکترین اندازه دانه را دارا است. در بررسی مقایسه بین TIG و TIG پالسی در ناحیه ی ذوب، اندازه دانه ها در روش جوشکاری TIG پالسی کمتر از اندازه ی دانه در روش TIG است.

در نمونه TP1 ناحیه HAZ دارای اندازه دانه بزرگ تری نسبت به BM است و اندازه دانه ها در ناحیه MZ تقریباً با ناحیه HAZ برابر است. علت این امر را می توان بیشتر بودن حرارت ورودی در ناحیه HAZ نسبت به ناحیه MZ است که منجر به افزایش بیشتر اندازه دانه می شود. ناحیه HAZ در نمونه TP2 دارای اندازه دانه های درشت تری نسبت به BM است و اندازه دانه ها در ناحیه MZ تقریباً با ناحیه HAZ برابر است. اندازه دانه ها در ناحیه HAZ و MZ نسبت به ناحیه HAZ و 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 MZ کاهش می یابد. کاهش شدت جریان و کاهش گرمای ورودی باعث می شود 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 رشد دارد و در نهایت منجر به رشد دانه ها

افزایش حرارت ورودی در ناحیه HAZ، اغلب منجر به تبلور مجدد و رشد دانه ها می شود [16] پس از نمونه T1، نمونه T3 بیشترین اندازه دانه را دارد. زیرا در مقایسه با نمونه های T2 و T4 فرکانس بیشتر و در نتیجه حرارت ورودی بیشتری دارد و بنابراین اندازه دانه افزایش می یابد. مشاهده می شود که نمونه T4 با داشتن فرکانس بیشتر و در نتیجه حرارت ورودی بیشتر نسبت به T2 اندازه دانه بیشتری دارد.

در ناحیه HAZ نمونه T3 دانه ها نسبت به BM (فلز پایه) درشت تر هستند و اندازه دانه ها 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 می توان 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 می شود و بنابراین اندازه ی دانه ها افزایش می یابد [17].

ناحیه HAZ نمونه T4 به علت تبلور مجدد و رشد دانه ها، دارای اندازه دانه بیشتر نسبت به فلز پایه است. همچنین اندازه دانه در ناحیه MZ نسبت به ناحیه HAZ کاهش یافته است که البته این کاهش نسبت به نمونه T3 چندان زیاد نیست، زیرا در جوشکاری این نمونه از فرکانس 70 هرتز استفاده شده است بنابراین حرارت ورودی در این نمونه نسبت به نمونه T3 کمتر است که همین امر موجب کاهش رشد دانه ها در ناحیه HAZ نسبت به نمونه قبلی شده است.



شکل 5- (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه HAZ، (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه جوش نمونه T2.

همان‌طور که در شکل مشخص است اندازه دانه ها در ناحیه HAZ نسبت به فلز پایه افزایش یافته است. شکل (7-ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه جوش نمونه T2 را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که اندازه دانه در ناحیه جوش نسبت به ناحیه HAZ کاهش 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 می شود که رسوباتی در ناحیه جوش تشکیل شده است. این رسوبات به صورت محدود در برخی نواحی ناحیه HAZ نیز مشاهده می شود (شکل 5-الف).

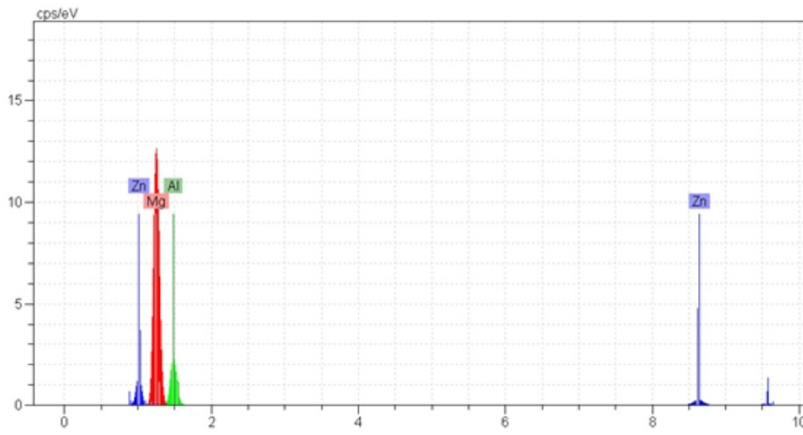
شکل (6) آنالیز EDS رسوب نقطه A را نشان می دهد. همان‌طور که دیده می شود در ترکیب شیمیایی این نقطه عناصر Mg, Al, Zn وجود دارد که با توجه به ترکیب AZ31 منطقی به نظر می رسد. منیزیم دارای بیشترین غلظت و پس از آن روی و آلومینیم بیشترین غلظت را دارند. شکل (7) آنالیز EDS رسوب B را نشان می دهد. در این نقطه نیز دیده می شود که غلظت منیزیم دارای بیشترین غلظت است و پس از آن روی و آلومینیم

در این منطقه در حین انجماد می شوند [16]. در نمونه TP3 ناحیه HAZ دارای اندازه دانه های درشت تری نسبت به BM است و اندازه دانه ها در ناحیه MZ نسبت به اندازه دانه ها در ناحیه HAZ کاهش یافته است. در نمونه TP4 اندازه دانه ها در ناحیه MZ تقریباً با ناحیه HAZ برابر است. علت این امر را می توان افزایش حرارت ورودی نسبت به نمونه TP3 دانست. در مقایسه اندازه دانه محاسبه شده برای نمونه های جوشکاری شده به روش TIG پالسی (جدول 7) ملاحظه می شود که با افزایش جریان در فرکانس ثابت، اندازه دانه افزایش می یابد.

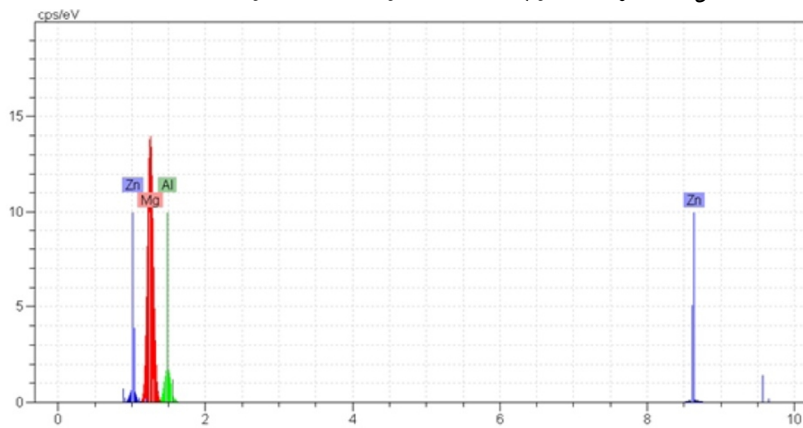
در بررسی صورت گرفته توسط نظر پور و همکارانش [16] در خصوص جوشکاری پالسی آلیاژ آلومینیم نیز مشاهده شده است که با افزایش جریان پالس اندازه دانه ها درشت تر شده است. همچنین افزایش اندازه دانه در ناحیه HAZ نسبت به فلز پایه و ناحیه جوش که در تمامی نمونه ها مشاهده شده است. افزایش اندازه دانه ها در ناحیه HAZ نسبت به ناحیه MZ به دلیل افزایش درجه حرارت و افزایش گرادیان حرارتی می باشد 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

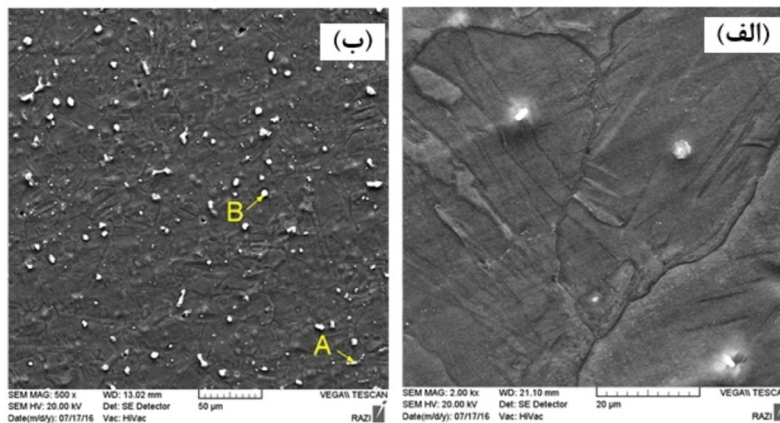
شکل (5) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه HAZ نمونه T2 را نشان می دهد.



شکل 6- آنالیز EDS سوب A در ناحیه جوشکاری شده نمونه T2.



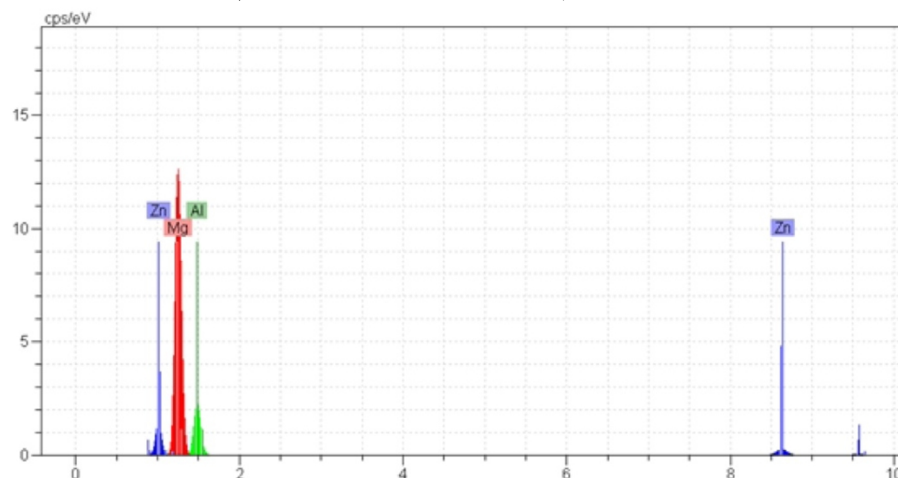
شکل 7- آنالیز EDS سوب B در ناحیه جوشکاری شده نمونه T2.



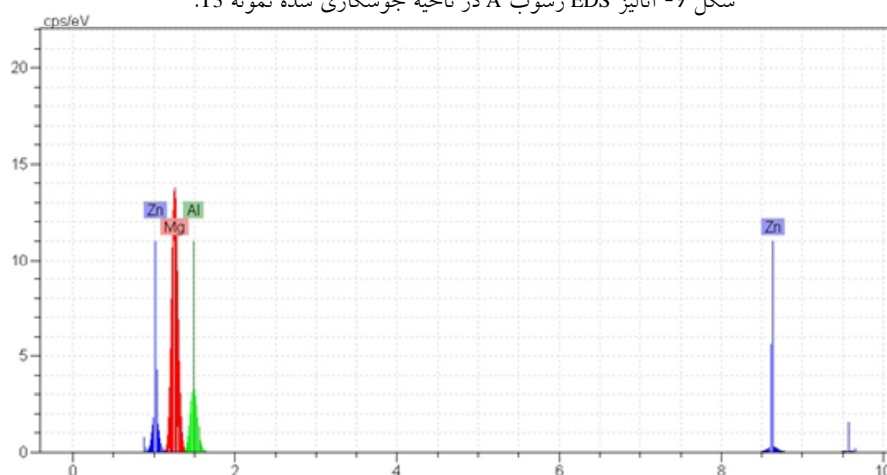
شکل 8- (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه HAZ، (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی ناحیه جوش نمونه T3.

شکل (8-ب) تصویر میکروسکوپی 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 آن‌ها بر روی شکل نشان داده شده است. همچنین این رسوبات به

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



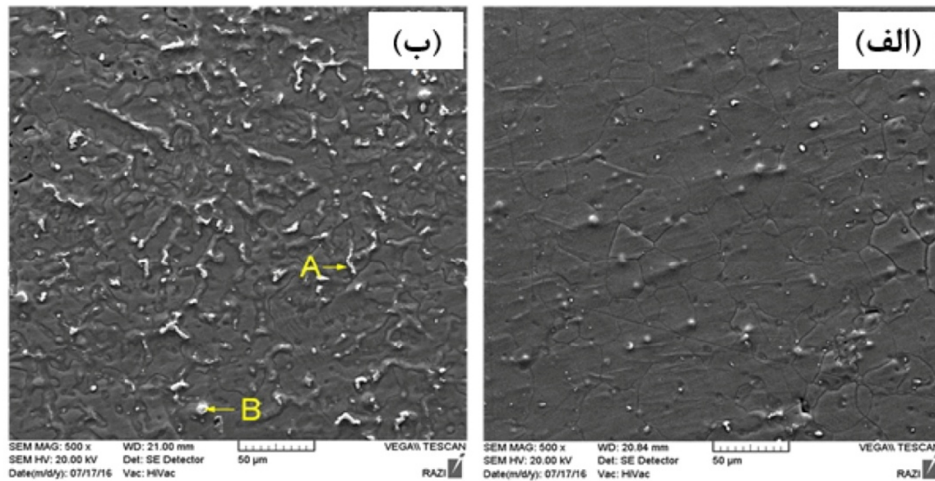
شکل 10- آنالیز EDS رسوب B در ناحیه جوشکاری شده نمونه T3.

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 تقریباً با ناحیه HAZ برابر است. شکل (12) نمودار آنالیز EDS رسوب نقطه A مربوط به نمونه TP4 را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود منیزیم بیشترین آلومینیم، روی و اکسیژن غلظت را دارند. شکل (13) نمودار EDS نقطه B را نشان می دهد. در این نمودار دیده می شود که آلومینیم، منگنز، منیزیم و اکسیژن بیشترین غلظت را دارند.

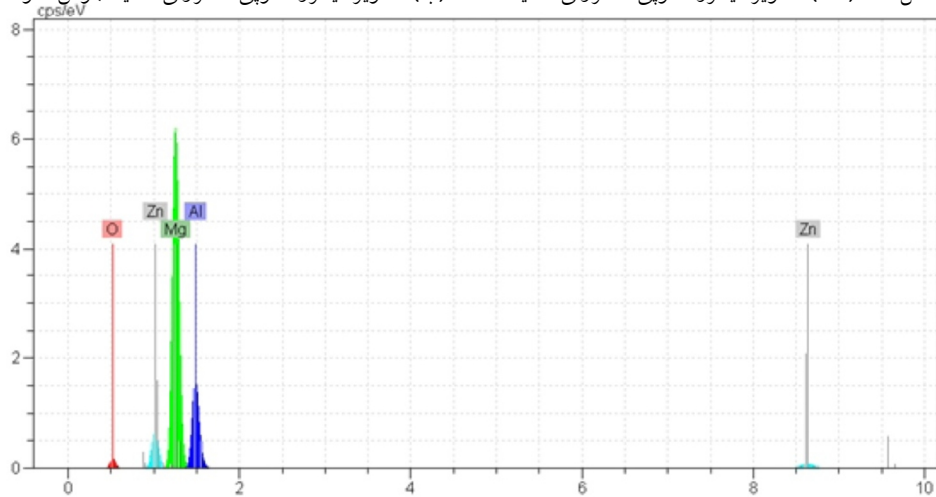
به طور کلی فرآیند تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه متأثر از جوش شامل تغییر شکل، جوانه زنی و رشد دانه پس از جوشکاری است. به طور مشابه، تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه مذاب و فلز پایه رخ می دهد. با این حال مکانیزم های

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 می دهد. 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 نمونه TP4 را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است اندازه دانه ها در ناحیه HAZ نسبت به BM افزایش یافته است.



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.

فلز پایه هماهنگی پیدا می‌کند سپس فازهای سخت $Mg_{17}Al_{12}-\beta$ در ناحیه مذاب به تدریج در حین نورد گرم حل می‌شوند. بنابراین، میانگین اندازه دانه ناحیه مذاب، ناحیه متأثر از گرما و فلز پایه تقریباً 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 می‌توان 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 TIG در جدول (8) نشان داده شده است.

جوانه‌زنی تبلور مجدد دینامیک در ناحیه مذاب، ناحیه متأثر از گرما و فلز پایه متفاوت است. برای ناحیه مذاب، ذرات $Mg_{17}Al_{12}-\beta$ مکان‌های جوانه‌زنی زیادی برای تبلور مجدد دینامیک تولید می‌کند [19]. نتایج EDS نشان می‌دهد که، ناحیه مذاب عمدتاً از زمینه $Mg-\alpha$ و $Mg_{17}Al_{12}-\beta$ 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 منیزیم AZ31 تحقیق انجام شد که نتایج نشان داد که با زیاد شدن کاهش سطح مقطع در نورد گرم، ریزساختار ناحیه مذاب و ناحیه متأثر از حرارت بیشتر با

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 نمونه های جوشکاری شده به روش TIG دیده می شود که نمونه T1 دارای استحکام بیشتری نسبت به سایر نمونه ها است و نمونه های T2، T4 و T3 نیز به ترتیب بیشترین استحکام را دارند. با توجه به این نتایج می توان گفت نمونه ای که جریان کمتری در جوشکاری آن مورد استفاده قرار گرفته است (T1) دارای استحکام بیشتری می باشد و برای نمونه های 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 نمونه ها کمتر بوده است و در بیشتر رسوبات در مرز دانه ها تشکیل شده است و در نتیجه استحکام بیشتری نسبت به سایر نمونه ها دارد. با توجه به اینکه نمونه T3 نسبت به سایر نمونه ها بیشترین فرکانس را دارد، در نتیجه بیشترین حرارت ورودی و اندازه دانه و همچنین کمترین استحکام را دارد. به طور کلی مشاهده می شود که استحکام تمامی نمونه ها از نمونه بدون جوش کمتر است.

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

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

که σ_0 و k مقادیر ثابت و d میانگین اندازه دانه است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش اندازه دانه استحکام کاهش می یابد. در واقع استحکام و اندازه دانه با یکدیگر رابطه عکس

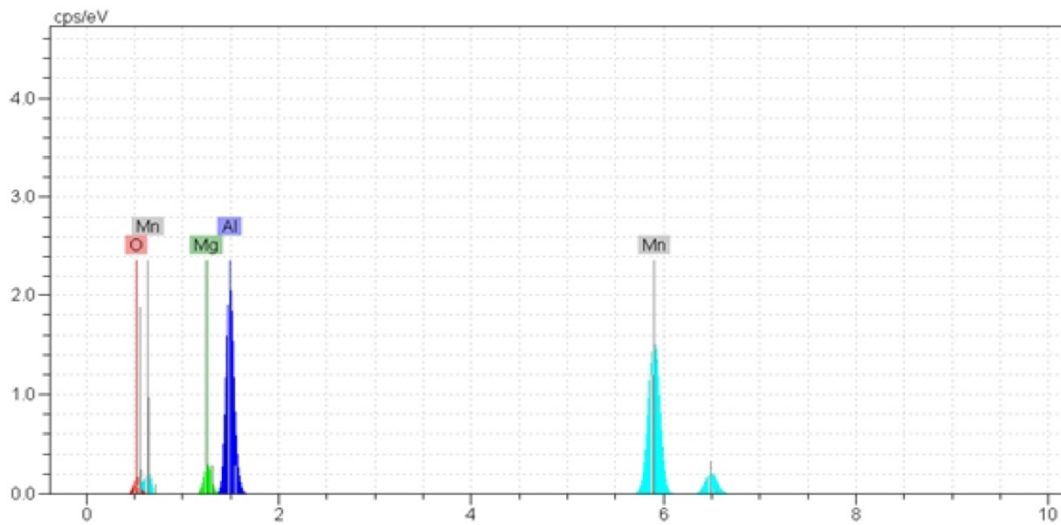
دارند. نتایج حاصل از تست کشش برای نمونه های جوشکاری شده با روش TIG پالسی در جدول (9) نشان داده شده اند.

جدول 9- تنش UTS و تغییر طول در نقطه شکست برای نمونه های جوشکاری شده به روش TIG پالسی.

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 نمونه های جوشکاری شده به روش TIG پالسی، مشاهده می شود که نمونه TP4 دارای بیشترین استحکام است و بعد از آن نمونه های TP3، TP2 و TP1 به ترتیب بیشترین استحکام را دارند. با مقایسه نمونه های TP3 و TP4 می توان به این نتیجه رسید که با وجود زمینه جریان و پیک جریان یکسان، فرکانس بیشتر، جوش قوی تری را ایجاد کرده است. در جوشکاری TIG پالسی افزایش فرکانس منجر به ریز دانه تر شدن نمونه می شود و در نتیجه استحکام افزایش یافته است [23]. از طرفی نیز در مطالعه کومار و همکاران که بر روی جوش های TIG پالسی فلزات آلومینیم و تیتانیم به بهبود خواص مکانیکی با افزایش فرکانس پالس اشاره شده است. این پژوهشگران ادعا کرده اند که افزایش فرکانس پالس منجر به ایجاد اختلال بیشتر گرمایی و مکانیکی می شود، به گونه ای که پیامد شکل گیری دانه های ریزتر و هم محورتر در فلز جوش خواهد بود [14]. در مورد نمونه های TP1 و TP2 مشاهده می شود که با وجود فرکانس برابر، نمونه های 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 بیشترین تاثیر را بر استحکام کششی نهایی اتصال دارند. این رفتار را می توان چنین تحلیل کرد که حین جوشکاری، منیزیم



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

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 می شود:

- 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 -Mg₁₇Al₁₂ 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 می شود 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 می شود و در نتیجه نمونه استحکام بیشتری دارد.

- با افزایش گرمای ورودی، استحکام کششی نهایی اتصال جوش افزایش می یابد به علت اینکه گرمای ورودی خیلی کم منجر به بروز نفوذ جزئی و ناخالصی ها می شود. با این وجود،

و روی در دمای بالا، به دلیل داشتن نقاط ذوب و جوش پایین تر 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 در جریان بیشینه بیشتر می شود و در نتیجه، گرمای ورودی بالاتر منجر به کاهش تاثیر استحکام دهی محلول جامد آلومینیم و روی در اتصالات می شود. افزون بر این، افزایش سختی را می توان به ریز بودن دانه ها در گرمای ورودی کمتر، به دلیل جریان بیشینه کمتر (تراز نخست) و تاثیر استحکام دهی فاز سخت و پراکنده β -Mg₁₇Al₁₂ مربوط دانست.

با مقایسه ی خواص کششی آورده شده در جداول (8 و 9) می توان دریافت که استحکام کششی نهایی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. می توان 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

بطور کلی هدف از پژوهش انجام شده رسیدن به بهترین خواص مکانیکی و ریزساختاری با استفاده از روش جوشکاری

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.

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 -Mg₁₇Al₁₂ از بین می‌رود و دانه های β -Mg₁₇Al₁₂ 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,Yeohung 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" ,