

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<sup>1\*</sup>، محمدرضا الهی<sup>2</sup> 1- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی 19395-3697، تهران 2- موسسه دانش پژوهان پیشرو، اصفهان (دریافت مقاله: 1397/07/18؛ یذیرش مقاله: 1397/11/27)

#### چکیدہ

آلیاژهای منیزیم به دلیل داشتن خواصی مانند استحکام ویژه مناسب، وزن کم و خواص مکانیکی مطلوب کاربردهای زیادی را به خود اختصاص داده اند. 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 TIGو TIGپالسی به منظور جوشکاری و اتصال آلیاژ AZ31 استفاده شد و در نهایت ریز ساختار 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<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 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 GTGبا جریان A 02 و فرکانس TH 20 بیشترین سنجکام (226MPa) را در میان نمونه های جوشکاری شده است. نمونه جوشکاری به روش GTGبا جریان A 05 و فرکانس TH 20 بیشترین استحکام (226MPa) را در میان نمونه های جوشکاری شده به روش GTG و TG میان نمونه های جوشکاری شده به روش GTG

كلمات كليدى: آلياژ منيزيم AZ31، جوشكارى قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ، خواص مكانيكى.

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

### S. Z. Anvari<sup>1\*</sup>, M. Elahi<sup>2</sup>

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

<sup>\*</sup> نويسنده مسئول، پست الكترونيكي: <u>szaanvari@gmail.com</u>

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  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 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<sub>m</sub>=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<sub>P</sub> and I<sub>B</sub>, higher frequency has created a stronger weld. Among pulsed TIG samples, the sample with I<sub>b</sub>=35A and I<sub>p</sub>=75A had higher tensile strength (109 MPa).

Keywords: AZ31 magnesium alloy, TIG, Mechanical properties.

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 متحرک و نظامی شده است.یکی از مهمترین مصارف آلیاژهای منیزیم در صنایع نظامی و هوایی است. استفاده از منیزیم در 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 (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 می سنجند، 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 تاثیرگذار است. عموما از روشهای TIG و MIG برای انتخاب فلز پر کننده، هماهنگی ترکیب شیمیایی فلز پر کننده با فلز یابه است [9 و 10].

آلیاژ AZ31ز 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. 1- مقدمه

Alloy	%Al	%Zn	%Mn	%Cu	%Si	%Ni	%Fe	%Mg
AZ31	۳/۰۲۳	1/111	·/٣٧۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	باقيمانده
تركيب شيميايي	۳/۵-۲/۵	1/4-•/9	۲/۰-۱	•/•۴	·/1	۰/۰۰۵	•/••۵	باقيمانده
استاندارد								

جدول 1- تركيب شيميايي نمونه هاي AZ31.

جدول2- تركيب شيميايي فلز پركننده ER AZ92A.

A	Alloy type	%Al	%Zn	%Mn	%Cu	%Si	%Fe	%Mg
	درصد وزنی فلز پرکننده ER AZ92A	۸/۳	١/٧	•/10	•/•۵	•/•۵	•/••۵	باقيمانده

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 آلیاژمنیزیم AZ31B 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 GTIG وTIGپالسی 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 GITانتخاب شد و مقایسه بین جوشکاری با روش های GITو TIGپالسی بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 صورت گرفت.

#### 2-روش انجام آزمایش

در این تحقیق از ورق های آلیاژ منیزیمAZ31 با ابعاد 15×5cm به قطر MM 1/6 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 می شود که ترکیب شیمیایی نمونهها از نوع آلیاژ AZ31است.

در این پژوهش از دو فرایند جوشکاری TIG و 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 می شود. در وسط گیره نگه دارنده قطعه ماشین کاری شده قرار دارد. پشت بند استفاده شده فولاد J16L است. در وسط نگه دارنده تعدادی سوراخ به قطر 1/5 میلی متر وجود دارد که محل خروج گاز پشتی است.



شكل1- آماده سازي نمونهها جهت انجام عمليات جوشكاري.

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 می شود. نمونهها 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 یژوهش، 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 كشش، نمونه ها از بخش مياني اتصال جوش ها

تهیه و مطابق با استاندارد ASTM E8، برش کاری شدند.

هندسه نمونه های 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 نمونه ها 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 DITو DITپالسی 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

ى تمونەھا.	جدول 5- سرايط کلي جو سکار
7.99	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
v∙lit/min	فشار گاز در هنگام جوشکاری
۱۲lit/min	فشار گاز در نگه دارنده(پشت کار)
۱۱–۲/۲۰۱ ولت	ولتاژ جوشکاری
۲–۱۳ cm/min	سرعت جوشکاري

جدول 3- شرایط کلی جوشکاری نمونهها.

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

فرکانس جو شکاری (Hz)	جریان جوشکاری (A)	كدنمونه
۶.	۵۰	T1
۶.	۵۵	T2
٨٠	۵۵	Т3
٧.	۵۵	T4

روش TIGپالسى.	جوش داده شده به	جوشکاری نمونه های .	جدول 5- شرايط
---------------	-----------------	---------------------	---------------

		5 6 5	<b>3</b> .
فرکانس جو شکاری (Hz)	$(I_{\mathrm{B}})$ حداقل جريان	حداکثر جریان (Ip)	كد نمونه
۸۰	۳۵	۷۵	TP1
۶.	۳.	٧.	TP2
۶.	۳۵	۷۵	TP3
٧.	۳۵	٧۵	TP4

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/minانجام شد.



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

3-نتايج و بحث

3-1- بررسی کیفیت ظاہری نمونه های جوشکاری شدہ نمونه های 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 می شود کیفیت ظاهری جوش مورد نظر خوب نیست و دراین شکل انباشتگی بیش از حد گرده جوش دیده می شود که علت این امر را می توان 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 T1می توان 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 می شود 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 می شود این نمونه نسبت به سایر نمونه های جو شکاری شده قبلی به روش TIG ظاهر بهتری دارد، که نشان می دهد که ولتاژ و جریان انتخاب شده بهتر از دیگر نمونه هاست.



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 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 GTTپالسی هستند، دیده میشود. شکل(4-الف) نمونه جوشکاری شده به روش GTTپالسی 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.

كدنمونه	اندازه دانه BM(µm)	اندازه دانهHAZ(µm)	اندازه دانه µm)MZ)
T1	۴/۴	9	٧/٢
T2	٣/۴	۴/۹	۵/۸
T3	v	۵/۳	۶/۵
T4	۴/۶	۵/۳	۵/۹

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

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 [14و1].

## 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. همان طور که دیده می شود 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 كمترى نسبت به ساير نمونه ها داشته باشد اما مشاهده مي شود اندازه ی دانه های T1بیش تر است، علت این امر را می توان افزایش تشکیل رسوب β-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> نسبت به سایر نمونه ها در مناطق ذوب دانست که منجر به کاهش درشت شدن اندازه دانه می شود. با توجه به جدول(6) ملاحظه می شود که در نمونه T2 ناحیه HAZ دارای اندازه دانه های درشت تری است. همچنین ملاحظه می شود 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 مى توان گفت كه افزايش جريان موجب مى شود كه 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

شکل (4-ب) نمونه جوشکاری شده به روش TIG یالسی با شرايط جريان پيک 70 آمپر، جريان زمينه 30 آمپرو فركانس 60 هرتز را نشان میدهد. این شرایط نیز جوش خوبی را ایجاد می کند. 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 می شودکه می توان علت آن را فرکانس پایین دانست. بنابراین این شرایط برای جوشکاری چندان مطلوب نيست. شكل (4-د) نمونه جوشكاري شده به روش TIG پالسي با شرايط جريان پيک 75 آمپر، جريان زمينه 35 آمپر و فركانس 70 هرتز را نشان میدهد. از نظر بازرسی چشمی در ابتدای نمونه بریدگی کناری جوش مشاهده می شود 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 کاهـش می یابد، منطقـه ذوب دانـه ریـزتـر و کیفیت

كد نمونه	اندازه دانه BM(µm)	اندازه دانهHAZ)	اندازه دانه µm)MZ(
TP1	۵/۲	۵/۹	۶/۴
TP2	۶⁄۸	۶/۴	۵/۱
TP3	۵/۸	٩/۴	٣/۴
TP4	۴/۲	٧/١	۵/۲

جدول7- اندازه دانه به روش جو شکاري TIG پالسي.

افزایش حرارت ورودی در ناحیه HAZ، اغلب منجر به تبلور مجدد و رشد دانه ها می شود [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 می یابد. مشاهده می شود که نمونه T4با داشتن فرکانس بیشتر و در نتیجه حرارت ورودی بیشتر نسبت به T2ندازه 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 آلیاژهای منیزیم منیزیم سری AZ دانست. دمای تبلور مجدد آلیاژهای منیزیم به بالاتر از این دما موجب تبلور مجدد دانه ها می شود و بنا براین اندازه ی دانه ها افزایش می یابد[17].

ناحیه HAZ نمونه HTبه 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 وTITپالسی در ناحیه ی ذوب، اندازه دانه ها در روش جوشکاری TIGپالسی کمتر از اندازه ی دانه در روش TIGست.

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 می شود. ناحیه HAZ در نمونه TP2 دارای اندازه دانههای درشت تری نسیت به BMست و اندازه دانه ها در ناحیه MZ تقریبا با ناحیه HAZبرابر است. اندازه دانه ها در ناحیه HAZ و MZنسبت به ناحیه HAZ در نمونه TP1 كاهش يافته است. علت اين امر را مي توان كاهش جریان دانست. با کاهش جریان پیک، حرارت ورودی کاهش یافته و در نتیجه اندازه دانه های مناطق HAZ و MZکاهش 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 دانهها



شكل5-(الف)تصوير ميكروسكوپي الكتروني ناحيه HAZ، (ب) تصوير ميكروسكوپي الكتروني ناحيه جوش نمونه T2.

در این منطقه در حین انجماد می شوند [16]. درنمونه TP3 ناحیه HAZدارای 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 تقریبا 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 GITپالسی (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 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 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 میدهد.

همان طور 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 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 EDSرسوب نقطه A را نشان میدهد. همانطور که دیده می شود در ترکیب شیمیایی این نقطه عناصر Al Mg، 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 Bرا نشان می دهد. در این نقطه نیز دیده می شود که غلظت منیزیم دارای بیشترین غلظت است و پس از آن روی و آلومینیم



شكل 8- (الف)تصوير ميكروسكوپي الكتروني ناحيه HAZ، (ب) تصوير ميكروسكوپي الكتروني ناحيه 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



شكل 10- آناليز EDS رسوب B در ناحيه جوشكاري 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 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 نقطه نیز منیزیم، روی و آلومینیم به ترتیب بیشترین غلظت را دارند که نسبت به نقطه A این غلظت ها به مقدار ناچیزی دارند راست.

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.

شكل (11-ب) تصویر میكروسكوپی الكترونی ناحیه جوش نمونه TP4 را نشان می دهد. این شكل نشان می دهد كه اندازه دانه در ناحیه MZ تقریبا با ناحیه HAZ برابر است. شكل (12) نمودار آنالیز EDS رسوب نقطه A مربوط به نمونه شكل (12) نمودار آنالیز EDS رسوب نقطه C مربوط به نمونه بیشترین آلومینیم، روی و اكسیژن غلظت را دارند. شكل (13) نمودار EDS نقطه Bرا نشان می دهد. در این نمودار دیده می شود كه آلومینیم، منگنز، منیزیم و اكسیژن 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 فلزپایه رخ می دهد. با این حال مکانیز مهای



شكل 11-(الف) تصوير ميكروسكوپي الكتروني ناحيه HAZ، (ب) تصوير ميكروسكوپي الكتروني ناحيه 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<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>-β مکانهای جوانهزنی زیادی برای تبلور مجدد دینامیک تولید میکند [19]. نتایج EDS نشان میدهد که، ناحیه مذاب عمدتا از زمینه Mg-αو β-1<sub>12</sub>Al<sub>12</sub> 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، ریزساختار ناحیه ماذاب و ناحیه متاثر از حرارات بیشتر با

فلز پایه هماهنگی پیدا میکند سپس فازهای سخت Mg<sub>17</sub>AI<sub>12</sub>-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<sub>17</sub>AI<sub>12</sub>

4-3- آزمون کشش نتایج آزمون کشش نمونه های جوشکاری شده با روش TIGدر جدول(8) نشان داده شده است.

100

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

کد نمو نه	تنشر MPa)UTS)	آزَدياد طول (%)
بلمدن حيث	TAEN	۸/۶
بلون جوش T1	10//1	
	TTO/V	۲/۴
T2	144/4	١/٣
T3	۵۱/۳	٠/۴
T4	۷۶/۸	۰ /٣

در مورد نمونههای جوشکاری شده به روش TIGدیده می شود 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 فركانس، با افزایش فركانس استحكام كاهش يافته است. با توجه به اينكه نمونه T1 نسبت به ساير 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 دانه ها 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 كلى مشاهده مىشود كه استحكام تمامى نمونهها از نمونه بدون جوش كمتر 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 توجیه است. این رابطه 1 به صورت زیر است [16]:

 $\sigma = \sigma_{\circ} + kd^{-1/2} \tag{1}$ 

که <sub>o</sub>o و k مقادیر ثابت و d میانگین اندازه دانه است. همانطور که مشاهده می شود 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.

كد نمونه	تنش MPa)UTS)	ازدياد طول(%)
TP1	۲۰/۵	• /٢
TP2	٨٨/١	• /۴
TP3	٩./۶	• /۴
TP4	۱۰۸/۷	• /٧

در مورد نمونه های جوشکاری شده به روش TIG پالسی، مشاهده می شود که نمونه TP4دارای بیشترین استحکام است و بعد از آن نمونههای TP3، TP3و TP1 به ترتیب بیشترین استحکام را دارند. با مقایسه نمونههای TP3و TP4 می توان 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 می شود 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 مكانيكي با افزايش فركانس پالس اشاره شده است. اين پژوهشگران ادعا کردهاند که افزایش فرکانس پالس منجر به ایجاد اختلال بیشتر گرمایی و مکانیکی می شود، به گونهای که پیامد شکل گیری دانههای ریزتر و هممحورتر در فلز جوش خواهد بود [14]. در مورد نمونه های TP1و TP2مشاهده 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 بیش ترین تاثیر را بر استحکام کششی نهایی اتصال دارند. این رفتار را می توان چنین تحلیل کرد که حین جوشکاری، منیزیم



شكل 13- آناليز EDS رسوب B در ناحيه جوشكاري شده نمونه TP4.

و روی در دمای بالا، به دلیل داشتن نقاط ذوب و جوش پایین ر و فشار بخار بالاتر نسبت به آلومینیم به راحتی تبخیر می شوند. تاثیر استحکام دهی روی در آلیاژ های Mg-Al-Zn 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 می شود و در حقیقت، تبخیر روی درجریان بیشینه بیشتر می شود و در تیچه، گرمای ورودی بالاتر منجر به کاهش تأثیر استحکام دهی محلول جامد آلومینیم و روی در اتصالات می شود. افزون بر این، افزایش سختی را می توان به ریز بودن می شود. افزون بر این، افزایش سختی را می توان به ریز بودن دانه ها در گرمای ورودی کمتر، به دلیل جریان بیشینه کمتر (ترازنخست) و تأثیر استحکام دهی فاز سخت و پراکنده (ترازنجست).

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-نتيجه گيرى

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 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-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 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 HZ 60 و جریان A 50 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 دارند. زیرا جریان کمتر

 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، 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 postweld 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-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> از بین میرود و دانه های β-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 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",