



## بررسی تأثیر شکل هندسه پین ابزار بر خواص مکانیکی و ریزساختاری منطقه جوش در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب $AlMg_6$

مهدي مهري<sup>1</sup>، محمد رضا خانزاده<sup>2\*</sup>، حميد بختياري<sup>3</sup>

1- کارشناس ارشد مهندسی مواد - جوشکاری، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

2- استادیار مرکز تحقیقات مهندسی پیشرفته، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

3- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، پژوهشگاه مواد و انرژی، دانشکده مواد، کرج، ایران

\* اصفهان، صندوق پستی 8631656451، khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 6 دی 1397

پذیرش: 20 خرداد 1398

ارائه در سایت: بهمن 1398

### کلیدواژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

آلومینیوم Gost 4784-97

هندسه پین

خواص مکانیکی

### چکیده

در این تحقیق تأثیر شکل هندسه پین ابزار بر تغییرات خواص مکانیکی و ریزساختاری منطقه جوش و نزدیک به آن در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب آلایز آلومینیوم Gost 4784-97 با استفاده از دو نوع پین ابزار مخروطی رزوه دار و استوانه‌ای بررسی شد. جهت مطالعه ریزساختاری از آزمون متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترون روبشی و برای بررسی اثر چرخش پین بر خواص مکانیکی اتصال، از آزمون کششی و ریز سختی سنجی استفاده شد. نتایج آزمون متالوگرافی نمایانگر سطح ظاهری صاف و صیقلی نمونه‌های جوشکاری شده با پین استوانه‌ای رزوه ریز است. آنالیز EDS نشان‌دهنده رسوبات آلومینیوم، منیزیم، منگنز و آهن به رنگ روشن و رسوبات اکسیژن، منیزیم، آلومینیوم و سیلیسیم به رنگ تیره در تصاویر بوده است. آزمون ریز سختی سنجی نشان داده که بیشترین میزان سختی در منطقه جوش توسط ابزار استوانه‌ای رزوه درشت حاصل شده و دلیل آن کار مکانیکی شدید و دمای بالا حین فرایند جوشکاری بوده که باعث تشکیل دانه‌های بسیار ریز در منطقه اغتشاش، به وسیله مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی بوده است. استحکام کششی همه نمونه‌های جوشکاری شده از استحکام کششی فلز پایه بیشتر بوده و این موضوع بیانگر عدم وجود عیوب در جوش‌ها و همچنین بیانگر به دست آمدن ریزساختار مناسب در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بوده که باعث بهبود خواص مکانیکی در منطقه جوش شده است.

## Study of the effect of instrument pin geometry on mechanical and microstructural properties of the welding region in the process of friction stir butt welding of $AlMg_6$

Mehdi Mehri<sup>1</sup>, Mohammad Reza Khanzadeh<sup>2\*</sup>, Hamid Bakhtiari<sup>3</sup>

1- Faculty of Material Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2- Center for Advanced Engineering Research, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

3- Materials and Energy Research Center, Materials Department, Karaj, Iran.

\* P.O.B. 8631656451, Isfahan, Iran, khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received 27 December 2018

Accepted 10 June 2019

Available February 2020

### Keywords:

Friction stir welding

Gost, 4784-97 Aluminum alloy

Pin geometry

Mechanical properties

### Abstract

In this study, the effect of tool pin geometry on the mechanical and microstructural changes in the weld region and near it was investigated in the Friction Stir Welding process of butt joint of GOST 4784-97 aluminum alloy, using two types of threaded conical and cylindrical tool pins. To study the microstructure, a metallographic analysis using optical microscope and scanning electron microscope was used, and a tensile and micro hardness tests were used to investigate the effect of pin rotation on the mechanical properties of the joint. The results of the metallographic survey show a smooth and polished surface of the welded specimens with fine threaded cylindrical pin. The EDS analysis indicates the precipitates of aluminum, magnesium, manganese and iron in bright colors and the precipitates of oxygen, magnesium, aluminum, and silicon in the dark colors in the images. The micro-hardness analysis has shown that the highest degree of hardness in the weld region is obtained by coarse threaded cylindrical tool; and its reason was hard mechanical work and high temperature during the welding process, which led to the formation of very fine grains by the dynamic recrystallization mechanism, in the stir region. The tensile strength of all welded specimens was greater than the tensile strength of the base metal; and indicates that there are no imperfections in the welds, as well as an appropriate microstructure in frictional stir welding that improves the mechanical properties of the welded area.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Mehri, M. R. Khanzadeh, H. Bakhtiari, Study of the effect of instrument pin geometry on mechanical and microstructural properties of the welding region in the process of friction stir butt welding of  $AlMg_6$ , Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 9, pp. 25- 36, 2019 (in Persian)

**1- مقدمه**

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روشی نوین برای جوشکاری فلزات در حالت جامد است که به دلیل تغییر شکل شدید همراه با گرمای ناشی از اصطکاک در منطقه جوش، ریزساختاری حاصل می‌شود که در مقایسه با دیگر فرایندهای جوشکاری از خواص مکانیکی برتری برخوردار است. ابزار دوار غیر مصرفی با طراحی مخصوصی از پین و شانه، وارد درز دو لبه قطعه مجاور هم شده و در طول درز جوش حرکت می‌کند [1].

ابزار در این فرایند مهم‌ترین نقش یعنی ایجاد یک جوش سالم و قابل قبول را بر عهده دارد. هندسه ابزار نقش بحرانی در جریان مواد و کنترل سرعت جوشکاری ایفا می‌نماید. ابزار چرخان از شانه و یک پین تشکیل شده است، شانه و پین می‌توانند دارای شیارها و رزوه‌هایی با شکل‌های گوناگون باشند. ابزار دو وظیفه دارد، یکی گرم کردن موضعی و دیگری ایجاد جریان مواد است. در اولین مرحله فرورفتن ابزار در اثر اصطکاک بین پین و قطعه کار، حرارت ایجاد شده و مقداری گرما هم در اثر تغییر شکل پلاستیک مواد اضافه می‌شود. ابزار تا زمانی که شانه با قطعه کار تماس پیدا می‌کند، به فرورفتن خود در قطعه کار ادامه می‌دهد. تماس و اصطکاک به وجود آمده بین شانه و قطعه کار بیشترین گرما را تولید می‌نماید. وظیفه دوم ابزار، ایجاد حرکت و چرخش در مواد است. یکنواختی ساختار و خواص و همچنین نیروهای فرایند با طراحی ابزار چرخان کنترل و هدایت می‌شود. هندسه ابزار مؤثرترین پارامتر در توسعه فرایند است که با ایجاد رزوه و شکل‌های پیچیده روی آن نیروی لازم برای جریان مواد و اختلاط کاهش یافته به طوری که در شکل مارپیچی، حجم جابجا شونده ماده تا 60٪ و در شکل سه شیار تا 70٪ کاهش یافته است [2].

در سال‌های اخیر موارد مطالعاتی متعددی در مورد تأثیر هندسه ابزار بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است. فوجی و همکاران [3] تأثیر شکل پین بر خواص مکانیکی و ریزساختار فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم 1050 به 5083 را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند اگر مقاومت مواد در برابر تغییر شکل زیاد باشد، شکل ابزار در سرعت‌های چرخشی بالا به طور چشمگیر، بر قابلیت جوشکاری اثر گذاشته است. اسکالیپی و همکاران [4] تأثیر ابزار با هندسه‌های شانه متفاوت را بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 6082 بررسی کردند. آن‌ها پیشنهاد کردند که شانه مقعر اتصال خوبی برای ورق‌های نازک ایجاد می‌نماید. ژاوو و همکاران [5] اثر هندسه

پین را بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار آلومینیوم 2014 بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داده که پین بر جریان پلاستیکی مواد به شدت تأثیر گذاشته و بهترین کیفیت جوش با استفاده از ابزار مخروطی رزوه دار به دست آمده است. بوز و همکاران [6] اثر هندسه پین بر روی خواص مکانیکی و خمشی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ 1080 را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ابزار با گام بالا مانند مته عمل نموده و باعث می‌شود فلز جوشکاری به شکل براده به سمت بیرون حرکت کند، آن‌ها همچنین بیان نمودند بهترین پیوند با ابزار رزوه‌ای با گام پایین ایجاد شده است.

مرد علی زاده و همکاران [7] به بررسی تجربی سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر میکرو سختی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 5456 در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی سبب افزایش حرارت ورودی، افزایش سیلان عمودی، بزرگی اندازه دانه و کاهش سختی می‌شود.

سالاری و همکاران [8] به بررسی اثر هندسی ابزار و سرعت چرخش ابزار بر روی خواص مکانیکی و شکل‌گیری عیوب در جوش اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم 5456 پرداختند. آن‌ها از چهار ابزار با هندسه مخروطی ( $T_1$ )، استوانه‌ای مخروطی ( $T_2$ )، مخروطی پله‌ای ( $T_3$ ) و یک ابزار سه شیاره ( $T_4$ ) استفاده کردند. نتایج آنان نشان داد که هندسه ابزار عامل مؤثری در جابجایی و جریان مواد و کنترل خواص مکانیکی جوش اصطکاکی اغتشاشی است. همچنین نشان دادند بهترین جریان مواد و اتصال در جوش به وسیله‌ی پین مخروطی پله‌ای انجام گرفته است. در این تحقیق به بررسی تأثیر شکل هندسه پین ابزار بر تغییرات خواص مکانیکی و ریز ساختاری منطقه جوش و منطقه نزدیک به آن در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب به لب آلومینیوم AIMg6 با استفاده از پین ابزار مخروطی رزوه دار و استوانه‌ای پرداخت شده است.

**2- روش آزمون****2-1- مواد اولیه**

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق‌های آلومینیوم (Gost 4784-97) با ضخامت 3 میلی‌متر انجام گرفته است. جدول‌های 1 و 2 به ترتیب ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فلز پایه را نشان داده است. دو صفحه آلومینیومی با ابعاد  $3 \times 125 \times 250$  میلی‌متر روی یک صفحه فولادی مسطح قرار گرفته است. زاویه انحراف ابزار 1/5 درجه انتخاب شده است.

سانتی‌گراد و سپس به مدت 3 ساعت در دمای 570 درجه سانتی‌گراد تمپر شده و در هوا سرد گردیدند که سختی 58 راکول سی حاصل شد. پس از آن پین‌ها و شانه ابزار فرچه زنی و پولیش شده و هرگونه ناصافی در آنها برطرف گردید تا به هنگام ایجاد اصطکاک در سیلان مواد اختلالی ایجاد ننمایند.

#### 4-2- روند انجام جوشکاری

برای انجام جوشکاری از دستگاه فرز عمودی نمونه اونیورسال به‌عنوان تأمین‌کننده سرعت‌های دورانی و پیشروی استفاده شده است. برای انجام جوشکاری، ابزار ضمن چرخش از بالا وارد درز اتصال بین دو ورق شده و پس از یک توقف 30-15 ثانیه‌ای جهت پیش گرم کردن قطعه، شروع به حرکت پیشروی در طول اتصال نموده و در انتهای عملیات جوشکاری از قطعه خارج می‌شود. چرخش پین 900 دور در دقیقه، جهت چرخش به‌صورت ساعت‌گرد و سرعت پیشروی نیز 16 و 32 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

#### 5-2- آزمون‌ها

به‌منظور مطالعه و بررسی ریزساختار بوجود آمده، روش متالوگرافی نوری استفاده شده است. برای این منظور نمونه‌هایی با ابعاد 3\*25 میلی‌متر از سطح مقطع جوش بریده، مانت و توسط سنباده‌های کاربرد سیلیسیم از شماره 80 تا 2800 سنباده‌زنی شدند. در مرحله بعد نمونه‌ها توسط پودر آلومینا پرداخت و با الکل شسته و خشک شدند. برای اچ کردن نمونه‌ها از روش الکترو اچ استفاده شده است. ریز ساختار مناطق مختلف قطعات جوشکاری شده توسط میکروسکوپ نوری (JENOPTAK) مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. آزمون کشش مطابق با استاندارد (ASTM-E8M) با استفاده از دستگاه تایوانی مدل (GOTH) انجام شده است [9].

همچنین آزمون ریز سختی سنجی نیز بر اساس استاندارد (ASTM E 384-05 a) و توسط دستگاه (Koop) مدل (MH1) انجام شد. سختی سنجی نمونه‌ها در راستای عرضی جوش با روش ویکزر و فرورونده هرم الماس با نیروی اعمالی 100 گرم در زمان 10 ثانیه انجام شده است [10]. در مجموع مقادیر سختی 15 نقطه بصورت متقارن نسبت به مرکز اتصال اندازه‌گیری شده است.

بررسی دقیق‌تر فصل مشترک‌های اتصال نمونه‌ها به کمک آنالیزهای الکترون بازگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط دستگاه میکروسکپ مدل Leo-vp435 صورت گرفت که مجهز

#### جدول 1 ترکیب شیمیایی فلز پایه

**Table 1** Base metal chemical composition

آلیاژ	Al	Si	Mn	Mg	Zn	Ti	Cu	Fe
Al	92/4	0/105	0/58	6/46	0/055	0/42	0/018	0/175

#### جدول 2 خواص مکانیکی فلز پایه

**Table 2** Mechanical properties of base metal

آلیاژ	استحکام کششی نهایی (Mpa)	استحکام تسلیم (Mpa)	درصد تغییر طول نسبی	سختی (HV)
آلومینیوم	352	156	24	96

#### 2-2- آماده‌سازی نمونه‌ها و ساخت ابزار

اتصال دهی ورق‌های آلومینیوم به ضخامت 3 میلی‌متر، با طرح اتصال لب‌به‌لب انجام شده است. اکسید آلومینیوم با استفاده از ترکیب اسید هیدروفلوریدریک و اسید نیتریک از سطح قطعات پاک شد. قطعات آلوده به چربی باید با استفاده از پارچه آغشته به الکل تمیز شوند. ترکیب شیمیایی ابزارها از جنس فولاد گرم کار 2344 (سازمان DIN) در جدول 3 نشان داده شده است. در این تحقیق از ابزار با هندسه‌های مخروطی ساده، استوانه‌ای با رزوه درشت و استوانه‌ای با رزوه ریز استفاده شده است. نوک پین‌های استوانه‌ای با زاویه 10 درجه‌ای طراحی شدند. مشخصات هندسه ابزارهای مورد استفاده در جدول 4 نشان داده شده است.

#### جدول 3 ترکیب شیمیایی فولاد گرم کار 2344

**Table 3** Chemical composition of hot steel working 2344

Cr	Mo	Si	V	Mn	C
1/5	1/3	1	1	0/4	0/39

#### جدول 4 خصوصیات هندسه ابزارهای مورد استفاده

**Table 4** Characteristics of the geometry of the tools used

ردیف	هندسه ابزار	گام ابزار (mm)	ارتفاع پین (mm)	قطر پین (mm)	قطر شانه (mm)
1	استوانه‌ای رزوه درشت	1/5	2/7	3	9
2	استوانه‌ای رزوه ریز	1	2/7	3	9
3	مخروطی ساده	-	2/7	3	9

#### 2-3- عملیات حرارتی ابزار

ابزارهای ساخته‌شده با فولاد گرم کار 2344 (استاندارد DIN) تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. در این عملیات حرارتی پین‌ها ابتدا به مدت سی دقیقه در دمای 1040 درجه

به سیستم آنالیز EDS است.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- کیفیت ظاهری سطح جوش

اولین عیب قابل تشخیص در اتصالات جوشکاری شده کیفیت سطح جوش است. هندسه‌های مختلف پین ابزار با تولید گرما در منطقه اغتشاش، گرمای منطقه جوش را بالا برده و در نتیجه این عمل، مواد در منطقه اغتشاش به شدت نرم شده و در اثر نیرویی که از سوی پیشانی ابزار وارد شده این مواد از اطراف جوش بیرون می‌زنند و پس از سرد شدن به صورت پلیسه‌هایی در لبه‌های جوش ظاهر شده است [11]. جدا از متغیر هندسه پین، عامل فشار عمودی نیز از متغیرهای تأثیرگذار بر روی کیفیت ظاهری سطح جوش و پلیسه‌های ایجاد شده در لبه‌ی قطعه کار است. وقتی فشار عمودی کم باشد و پین تا انتها پایین برده نشود، در قسمت تحتانی ورق اختلاط مواد کاهش می‌یابد. در نتیجه شانه ابزار تماس واقعی با سطح قطعات نداشته و باعث ایجاد حرارت اصطکاکی نشده و از بیرون زدن ماده هم زده از موضع جوش جلوگیری نمی‌کند و این امر باعث ایجاد حفره‌های داخلی یا شیار می‌شود. افزایش بیش از حد عمق نفوذ پین، سبب ایجاد پلیسه‌های زیاد در دو سمت جوش و نیز کم شدن ضخامت ناحیه جوش شده است. این عامل بیشترین تأثیر را در ایجاد پلیسه‌ها در لبه قطعات جوش داده شده را داشته است [12].

الانگوان و همکاران به بررسی تأثیر هندسه پین بر خصوصیات جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ 6061 پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در نیروی محوری بالاتر، اختلاط ماده بهتر است اما

افزایش زیاد آن سبب تشکیل لبه و پلیسه با ارتفاع زیاد روی هر دو وجه پیش‌رونده و پس‌رونده شده و باعث نازک شدن بیش از حد فلز جوش شده که می‌تواند باعث کاهش خواص مکانیکی اتصال شود [13]. یکی دیگر از پارامتر مهم زاویه قرار گرفتن پین با سطح قطعه می‌باشد که برای همه نمونه‌ها 1/5 درجه ثابت در نظر گرفته شد.

#### 3-2- آزمون کشش

از نمونه‌های جوشکاری شده با سه نوع پین مخروطی ساده (پین 1 و 4) پین استوانه‌ای رزوه ریز (پین 2 و 3) و پین رزوه درشت (پین 5 و 6) نمونه‌های کشش تهیه و تحت آزمون قرار گرفت. سرعت پیشروی دو سرعت 16 و 32 میلی‌متر و سرعت چرخش ابزار 900 دور بر دقیقه برای هر سه پین ثابت در نظر گرفته شده است. جزئیات نتایج این آزمون در جدول 5 نشان داده شده است. برای بررسی و مقایسه خواص مکانیکی فلز پایه با نمونه‌های جوشکاری شده یک نمونه از فلز پایه تحت آزمون کشش قرار گرفت که نتایج آن در جدول 6 نشان داده شده است.

با مقایسه استحکام کششی فلز پایه و قطعات جوشکاری شده مشاهده می‌شود که استحکام کششی همه‌ی نمونه‌ها از استحکام کششی فلز پایه بیشتر بوده و این موضوع بیانگر عدم وجود عیوب در جوش‌های انجام شده است. این مطلب همچنین بیانگر به دست آمدن ریزساختار مناسب در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بوده که باعث بهبود خواص مکانیکی در منطقه جوش شده است.

جدول 5 نتایج آزمون کشش نمونه‌ها

Table 5 Tensile test results

سرعت پیشروی (mm/min)	پهنا (mm <sup>2</sup> )	درصد تغییر طول	تنش تسلیم (N/mm <sup>2</sup> )	تنش نهایی (N/mm <sup>2</sup> )	محل شکست نمونه	نوع پین
16	19/16	23/4	167	364	فلز پایه	پین استوانه‌ای
32	19/14	22/7	162	361	فلز پایه	رزوه ریز
16	19/10	20/7	173	359	فلز پایه	پین استوانه‌ای
32	19/14	20/2	156	356	فلز پایه	رزوه درشت
16	19/11	25/9	162	365	فلز پایه	پین مخروطی
32	19/19	24/4	159	364	فلز پایه	ساده

جدول 6 نتایج آزمون کشش فلز پایه

Table 6 Basic metal tensile test results

مشخصه نمونه	تنش نهایی	تنش تسلیم	درصد تغییر طول	پهنا	ضخامت
فلز پایه	352	156	24/8	19/16	2/95

اندازه دانه را دارا بوده است. ناحیه ترمومکانیکی نیز دارای دانه‌های کشیده‌ای است که ناشی از کار مکانیکی ابزار و تغییر شکل پلاستیکی حین فرایند بوده است.

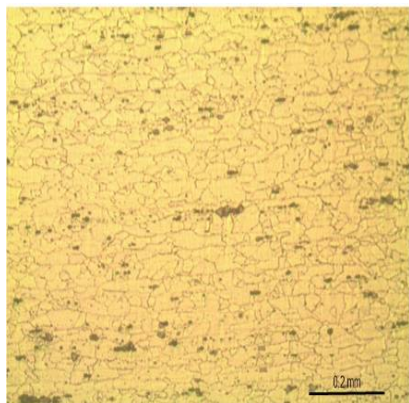


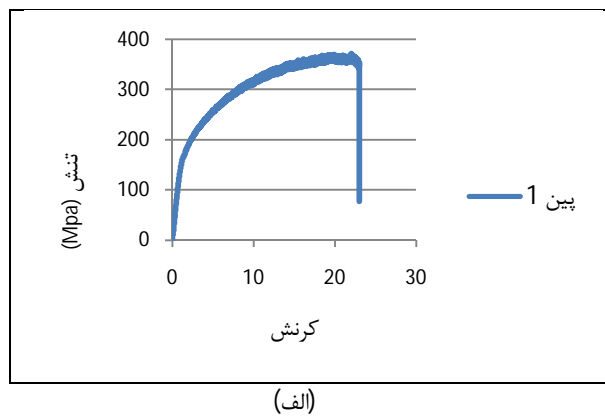
Fig. 2 Base metal microstructure

شکل 2 ریزساختار فلز پایه

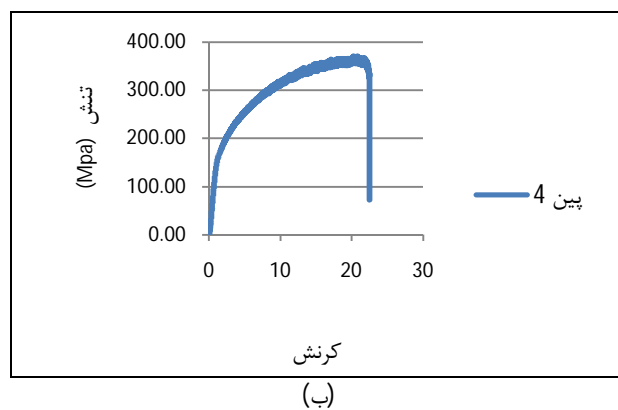
در همه نمونه‌ها ناحیه دکمه جوش دارای ریزترین دانه در منطقه اتصال به علت تغییر شکل پلاستیکی شدید حین فرایند بوده است. در واقع حضور دانه‌های ریز در این ناحیه بیانگر بروز پدیده تبلور مجدد دینامیکی است که در اثر تغییر شکل شدید ناشی از فرایند رخ داده و بافاصله گرفتن از مرکز جوش اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر شده تا اینکه در منطقه متأثر از حرارت درشت‌ترین دانه‌ها مشاهده شده است. در ناحیه ترمومکانیکی دمای بالا و تغییر شکل موجود در این ناحیه باعث ایجاد دانه‌های کشیده شده در آن شده است [14]. ریزساختار منطقه جوش مربوط به نمونه‌های جوش داده شده با پین استوانه‌ای رزوه ریز (پین 2 و 3)، استوانه‌ای رزوه درشت (پین 5 و 6) و پین مخروطی ساده (پین 1 و 4) در شکل 3 آورده شده است.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی در یک سرعت دوران و زاویه انحراف ثابت اندازه دانه‌ها کاهش یافته است، در حقیقت چون گرمای ورودی فرایند در دکمه جوش کمتر است، در حین فرایند تبلور مجدد مکانیکی، پدیده رشد دانه‌ها با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد. کری و همکاران بیان نموده‌اند که اندازه دانه در دکمه جوش اصطکاکی اغتشاشی، از ناحیه‌های دیگر جوش کوچک‌تر است [15]. اندازه دانه‌ها در مناطق مختلف جوش با استفاده از روش خطی و طبق استاندارد (ASTM-E112) از رابطه‌ی (1) به‌دست آمده و در جدول 7 آورده شده است که تأییدکننده مطالب بالا است.

همچنین با مشاهده نتایج به‌دست آمده از آزمایش کشش، مشخص شد که شکست نمونه‌های مورد آزمایش از فلز پایه صورت گرفته و به دلیل پایین‌تر بودن استحکام کششی فلز پایه از منطقه جوش امکان تجزیه و تحلیل استحکام جوش وجود ندارد. نمودار حاصل از آزمون کشش جوش انجام شده توسط پین مخروطی در سرعت پیشروی 16 و 32 میلی‌متر بر دقیقه به‌عنوان نمونه در شکل 1 آورده شده است.



(الف)



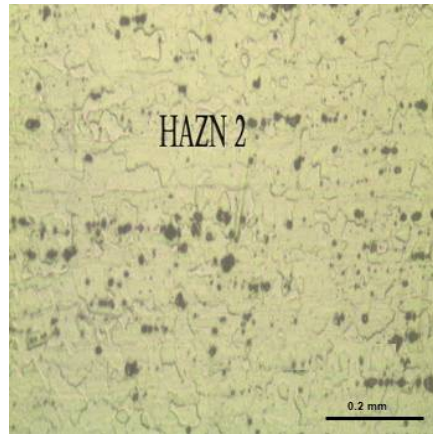
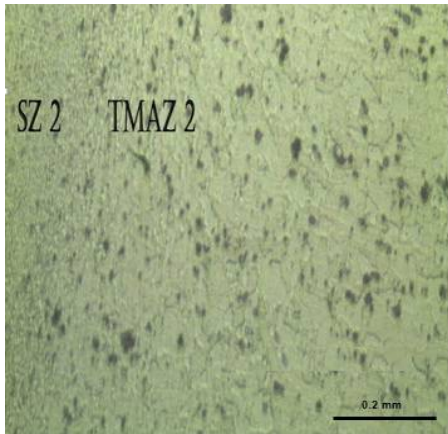
(ب)

Fig. 1 The diagram of the weld tensile test performed by the cone pin: A - the velocity of 16 mm / min B- the velocity of 32 mm / min

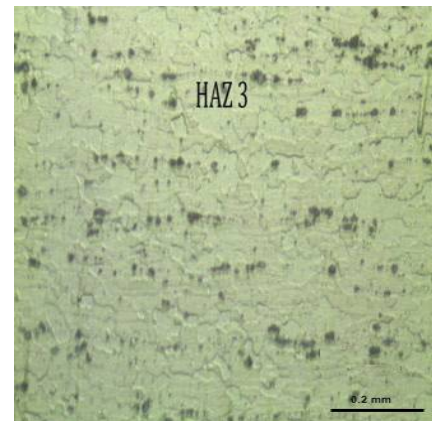
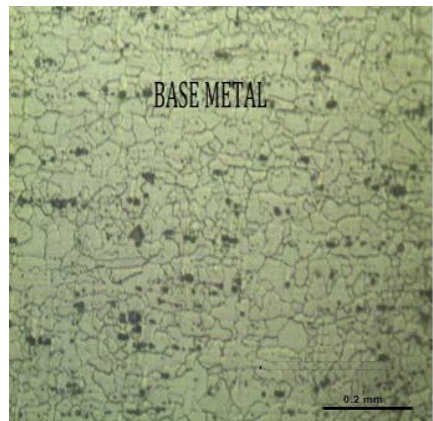
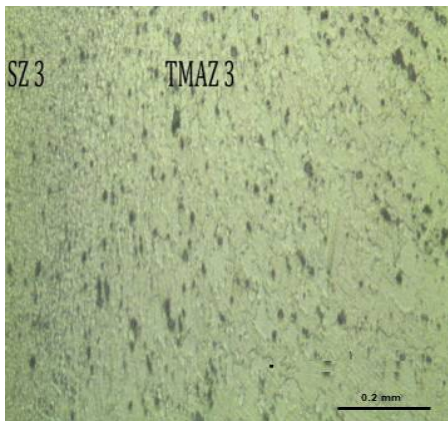
شکل 1 نمودار حاصل از تست کشش جوش انجام شده توسط پین مخروطی الف- سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه ب- سرعت پیشروی 32 میلی‌متر بر دقیقه

### 3-3- متالوگرافی نوری

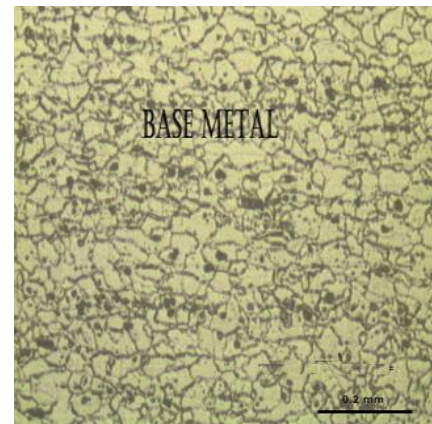
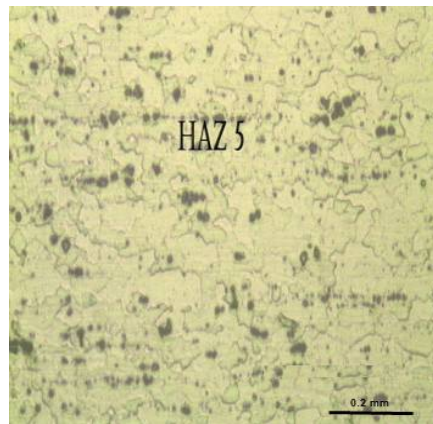
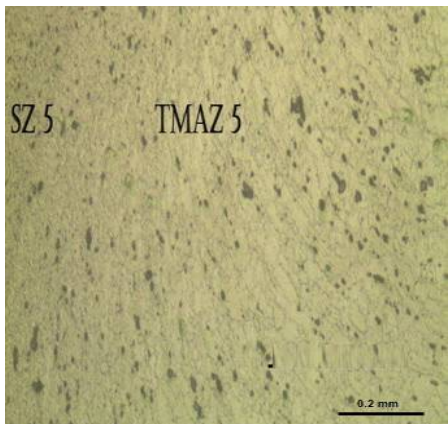
در شکل 2 ریزساختار فلز پایه و همچنین ریزساختار منطقه جوش مربوط به نمونه‌های جوش داده شده با پین استوانه‌ای رزوه ریز، استوانه‌ای رزوه درشت و پین مخروطی ساده با سرعت پیشروی 16 و 32 میلی‌متر بر دقیقه در شکل 3 نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمامی نمونه‌ها ناحیه دکمه جوش ریزترین دانه و ناحیه تحت تأثیر حرارت درشت‌ترین



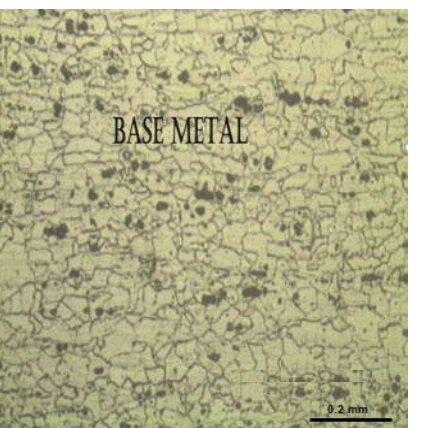
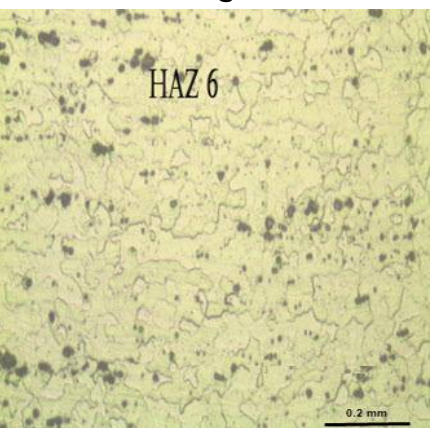
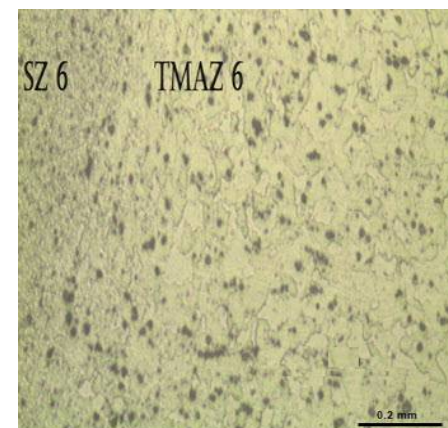
(الف)



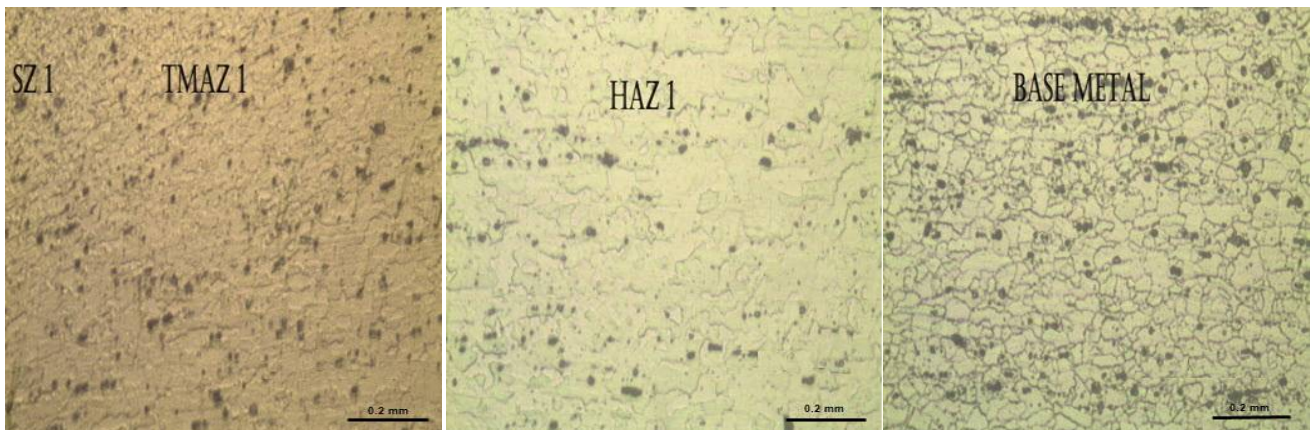
(ب)



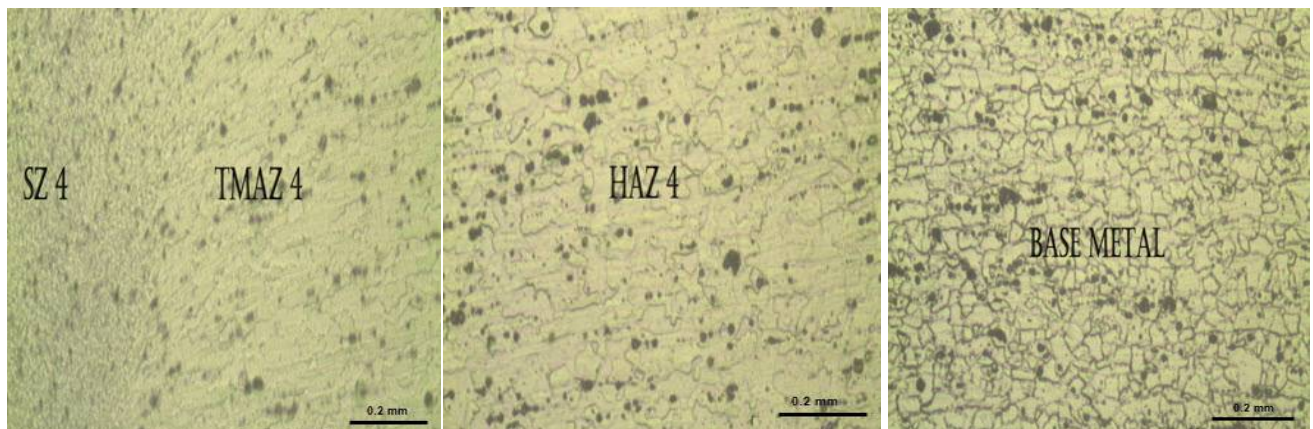
(ج)



(د)



(د)



(ز)

**Fig. 3** Microstructure of the welded sample: A- With a forward speed of 16 mm / min (pin 2) B- A forward speed of 32 mm / min (pin 3) C- Speed of 16 mm / min (pin 5) D- 32 mm / min (pin 6) E- speed 16 mm / min (pin 1) F-speed 32 mm / min (pin 4)

**شکل 3** ریز ساختار نمونه جوشکاری شده: الف- با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه (پین 2) ب- با سرعت پیشروی 32 میلی‌متر بر دقیقه (پین 3) ج- سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه (پین 5) د- سرعت پیشروی 32 میلی‌متر بر دقیقه (پین 6) ر- سرعت 16 میلی‌متر بر دقیقه (پین 1) ز- سرعت 32 میلی‌متر بر دقیقه (پین 4)

**جدول 7** میانگین اندازه دانه در مناطق مختلف جوش برحسب میکرومتر  
**Table 7** Average grain size in different welding regions in micrometers

میانگین اندازه میانگین اندازه	میانگین اندازه	میانگین اندازه	میانگین اندازه	نوع و شماره پین
دانه فلز پایه	دانه HAZ	دانه TMAZ	دانه SZ	
(میکرومتر)	(میکرومتر)	(میکرومتر)	(میکرومتر)	
24	35	21	8	مخروطی (1)
25	33	19	7	پین استوانه‌ای رزوه ریز (2)
24	30	18	5	پین استوانه‌ای رزوه ریز (3)
24	34	20	7	پین مخروطی (4)
24	31	18	5	پین استوانه‌ای رزوه درشت (5)
25	29	17	4	پین استوانه‌ای رزوه درشت (6)

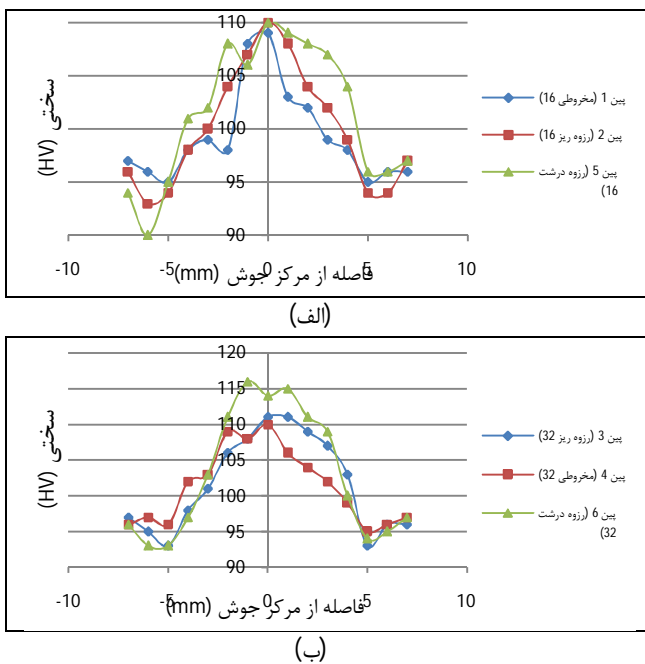
در رابطه (1)،  $L$  طول خطوط موازی،  $P$  تعداد خطوط موازی،  $Z$  تعداد کل دانه‌های قطع شده توسط خطوط،  $V$  بزرگنمایی و  $G$  اندازه دانه در استاندارد (ASTM-E 112) است.  
(1)

### 3-4- ریز سختی سنجی

کاهش اندازه دانه در ناحیه تحت فرایند جوشکاری نسبت به فلز پایه، می‌تواند باعث افزایش سختی در ناحیه جوش شود. در شکل 4 نمودار توزیع سختی مربوط به نمونه‌های جوش داده شده با پین استوانه‌ای رزوه ریز، استوانه‌ای رزوه درشت و پین مخروطی ساده با سرعت پیشروی 16 و 32 میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. در همه نمونه‌ها سختی دکمه جوش بیشترین مقدار را نسبت به فلز پایه داشته و با فاصله گرفتن از مرکز جوش به تدریج از میزان آن کاسته شده است.

اندک سختی در ناحیه متأثر از حرارت را می‌توان به بزرگ شدن دانه‌ها در این ناحیه در اثر گرمای ورودی فرایند جوشکاری نسبت داد. مقدار سختی در منطقه متأثر از ترمومکانیکال افزایش یافته و در نهایت در منطقه دکمه جوش بیشترین سختی مشاهده می‌شود [13]. با مقایسه‌ی نتایج سختی به‌دست‌آمده در شکل 5 مشخص شد که بیشترین سختی در منطقه جوش، توسط ابزار استوانه‌ای رزوه درشت و سختی به‌دست‌آمده از جوش توسط ابزار استوانه‌ای رزوه ریز دارای مقدار کمتر و همچنین کمترین مقدار آن مربوط به جوش حاصل از ابزار مخروطی بوده است.

این موضوع می‌تواند ناشی از اختلاط و سیلان بیشتر مواد باشد که در پین‌های دارای رزوه بهتر صورت می‌گیرد [16]. در حقیقت به دلیل کار مکانیکی شدید و دمای بالا حین فرایند جوشکاری، دانه‌های بسیار ریز در منطقه اختلاط با مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی تشکیل می‌شوند. [15].



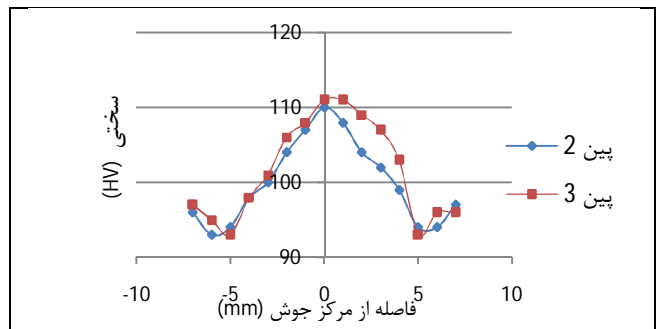
**Fig. 5** The effect of the pin type on the variations of the aluminum hardness distribution: A- The forward speed is 16 mm / min B- The forward speed is 32 mm / min

شکل 5 تأثیر نوع پین بر تغییرات توزیع سختی آلومینیوم: الف - سرعت پیشروی 16 میلی متر بر دقیقه ب - سرعت پیشروی 32 میلی متر بر دقیقه

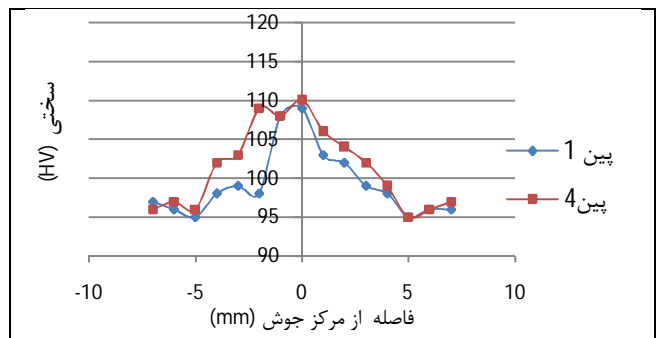
### 3-5- میکروسکوپ الکترونی روبشی

در شکل 6 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی جوش حاصل از پین مخروطی با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه آمده است.

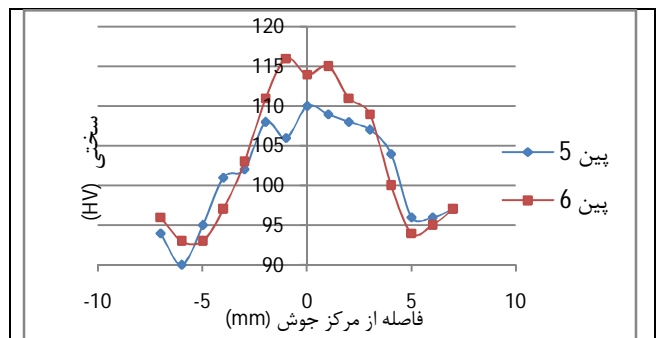
در این شکل سه منطقه جوش اصطلاحاً اگتاشاشی نشان داده



(الف)



(ب)



(ج)

**Fig. 4** The effect of the tool's velocity on the variations of the hardness distribution: A- The speed of the advance is 16 mm (pin 2) and 32 mm (pin 3) B-The speed of advance is 16 mm (pin 1) and 32 mm (pin 4) C- The speed of the advance is 16 mm (pin 5) and 32 mm (pin 6)

شکل 4 تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر تغییرات توزیع سختی: الف - سرعت پیشروی 16 میلی متر بر دقیقه (پین 2) و 32 میلی متر بر دقیقه (پین 3) ب - سرعت پیشروی 16 میلی متر بر دقیقه (پین 1) و 32 میلی متر بر دقیقه (پین 4) ج - سرعت پیشروی 16 میلی متر بر دقیقه (پین 5) و 32 میلی متر بر دقیقه (پین 6)

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی ابزار در سرعت دورانی ثابت، سختی ناحیه جوش افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد دلیل آن این است که با افزایش سرعت پیشروی ابزار، گرمای ورودی کاهش یافته و در حین فرایند تبلور مجدد مکانیکی، پدیده رشد دانه‌ها با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد، اندازه دانه کاهش و در نتیجه سختی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل 4 دیده می‌شود سختی فلز پایه حدود 96 و پیکرز است که با ورود به منطقه متأثر از حرارت تا حدود 92 و پیکرز کاهش می‌یابد. از آنجاکه قطعات آنیل شده می‌باشند، کاهش



در شکل 7 نمودار آنالیز EDS نقاط A (نمودار الف) و B (نمودار ب) مربوط به نمونه جوشکاری شده با پین مخروطی در سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود نقطه A شامل رسوباتی با درصد وزنی، منیزیم 1/88، آلومینیوم 76/28، منگنز 5/93 و آهن 10/26 درصد است.

نقطه B شامل رسوباتی با درصد وزنی، اکسیژن 38، منیزیم 3/13، آلومینیوم 35/33 و سیلیسیوم 25/7 درصد است. در شکل 8 نمودار آنالیز EDS نقاط A (نمودار الف) و B (نمودار ب) مربوط به نمونه جوشکاری شده با پین استوانه‌ای رزوه ریز در سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود نقطه A شامل رسوباتی با درصد وزنی، منیزیم 0/87، آلومینیوم 74/8، منگنز 13/01 و آهن 12/71 درصد است. همچنین نقطه B شامل رسوباتی با درصد وزنی، اکسیژن 31/91، منیزیم 3/26، آلومینیوم 42/65 و سیلیسیوم 22/51 درصد است.

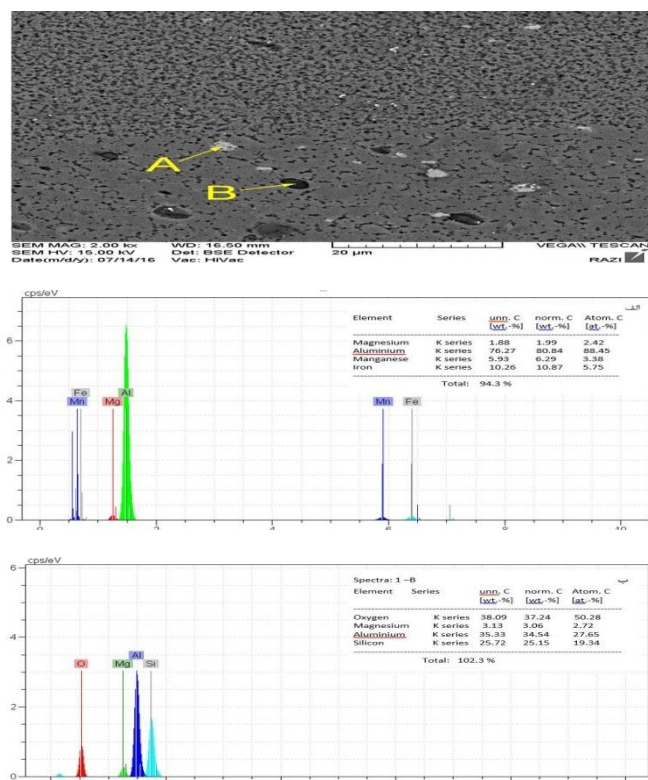


Fig. 7 An image of a scanning electron microscope with a speed of 16 mm / min on a cone pin: A-point analysis by EDS method. B-point analysis by EDSEDS method.

شکل 7 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پین مخروطی با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه: الف - آنالیز نقطه A به روش EDS - ب - آنالیز نقطه B به روش EDS

شده است. ناحیه اغتشاش جوش ، شکل 6- الف) دارای ریزترین دانه است. دکمه جوش در حین فرایند جوشکاری تحت دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد ولی کمتر از نقطه ذوب قرار می‌گیرد. به همین دلیل مواد در دکمه جوش، تحت تأثیر اختلاط ابزار متبلور می‌شوند که منجر به تولید دانه‌های ریز و هم محور می‌گردند [17]. ناحیه ترمومکانیکی در شکل 6- ب) نشان داده شده است، این ناحیه هم تحت تأثیر حرارت و هم تحت تأثیر کار مکانیکی قرار گرفته است. این موضوع باعث ایجاد کشیدگی دانه‌ها در این منطقه شده است. بزرگ‌ترین اندازه دانه در منطقه‌ی متأثر از حرارت دیده می‌شود که در شکل 6- ج) به تصویر کشیده شده است. تفاوت اندازه دانه‌ها و شکل دانه‌ها در مناطق مختلف و در پین‌های متفاوت، ناشی از تفاوت کار مکانیکی انجام‌شده و سرعت پیشروی متفاوت در هر پین است [18].

همان‌گونه که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ملاحظه می‌شود عیوب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در میکرو ساختار هیچ‌یک از نمونه‌های جوشکاری شده دیده نشده و نشان‌دهنده انتخاب پارامترها و ابزارهای مناسب جهت انجام جوشکاری است.

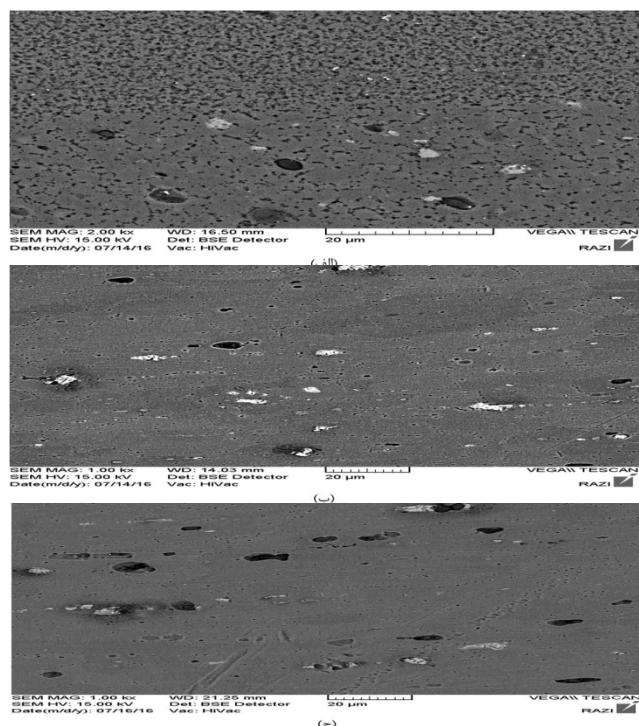
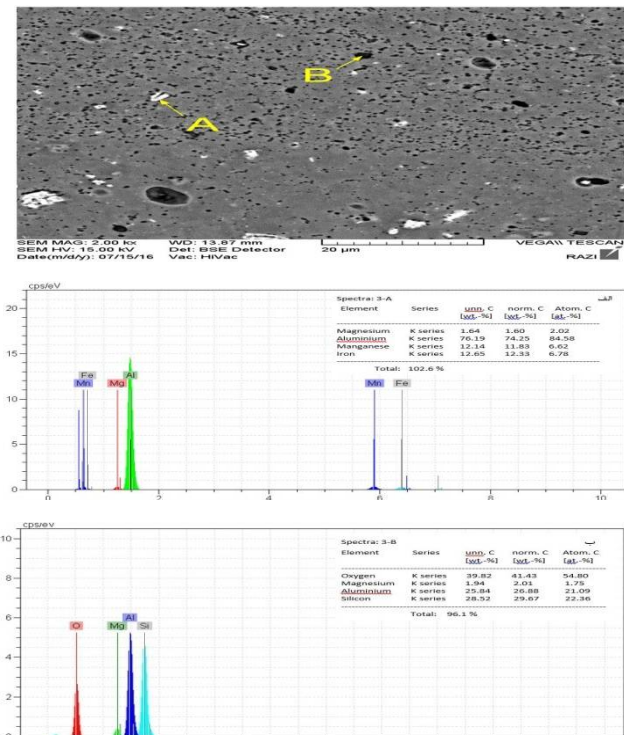


Fig. 6 Image of the scanning electron microscope Pin cone with a speed of advance of 16 mm / min: A- Welding zone (SZ) B- Heat and mechanically affected area (TMAZ) C- Heat-affected area (HAZ)

شکل 6 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پین مخروطی با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه: الف - منطقه جوش (SZ) - ب - منطقه متأثر از حرارت و مکانیک (TMAZ) - ج - منطقه متأثر از حرارت (HAZ)

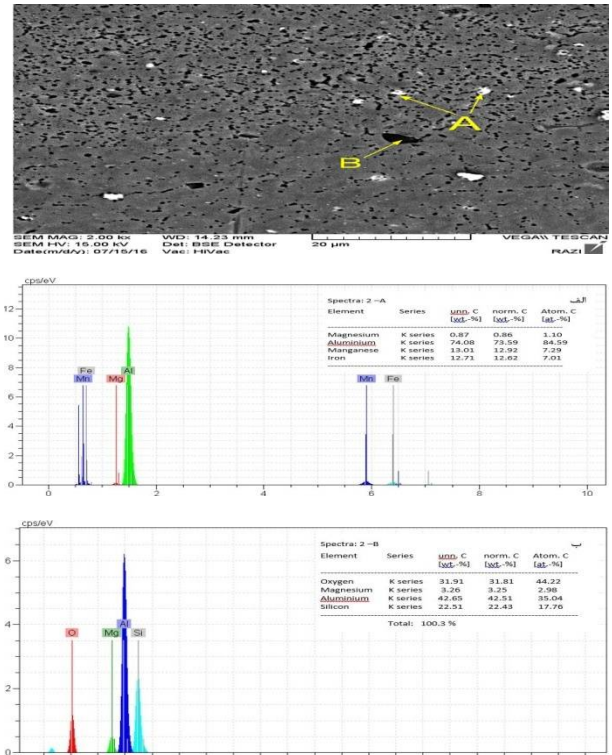
رزوه ریز در سرعت پیشروی 32 میلی‌متر بر دقیقه به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود نقطه A شامل رسوباتی با درصد وزنی، منیزیم 0/29، آلومینیوم 68/84، منگنز 12/47 و آهن 12/55 درصد است. همچنین نقطه B شامل رسوباتی با درصد وزنی، اکسیژن 42/76، منیزیم 1/99، آلومینیوم 24/52 و سیلیسیوم 20/56 درصد است.

همان‌گونه که مشاهده شد در آنالیز رسوبات در جوش حاصل از تمامی پین‌ها، نقاط روشن که با حرف A مشخص شده ترکیبات کاملاً مشابهی وجود داشته و فقط تفاوت اندکی در درصد وزنی آن‌ها مشاهده می‌شود. از آنجایی که در جوش اصطکاکی اغتشاشی دمای خیلی بالا و ذوب اتفاق نمی‌افتد فقط شکسته شدن رسوبات و جابجایی آن‌ها اتفاق افتاده است. این شکستگی در ناحیه دکمه جوش بیشتر از ناحیه‌های دیگر مشاهده شده و همچنین می‌تواند تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی داشته باشد. همچنین رسوبات نقاط B نیز دارای ترکیبات مشابهی بوده و در جوش حاصل از تمامی پین‌ها تغییراتی در آن‌ها صورت نگرفته و فقط دچار شکستگی، جابه‌جایی شده و در برخی مناطق تجمع رسوبات اتفاق افتاده است.



**Fig. 9** Scanning electron microscope Screw threaded cylindrical pin with advance speed of 32 mm / min: A-point analysis by EDS method. B-point analysis by EDS method

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پین استوانه ای رزوه ریز با سرعت پیشروی 32 میلی‌متر بر دقیقه: الف - آنالیز نقطه A به روش EDS ب - آنالیز نقطه B به روش EDS



**Fig. 8** Scanning electron microscope Screw threaded cylindrical pin with advance speed of 16 mm / min: A-point analysis by EDS method. B-point analysis by EDS method

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پین استوانه ای رزوه ریز با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه: الف - آنالیز نقطه A به روش EDS ب - آنالیز نقطه B به روش EDS

در شکل 9 نمودار آنالیز EDS نقاط A (نمودار الف) و B (نمودار ب) مربوط به نمونه جوشکاری شده با پین استوانه‌ای رزوه ریز در سرعت پیشروی 32 میلی‌متر بر دقیقه به تصویر کشیده شده است. نقطه A شامل رسوباتی با درصد وزنی، منیزیم 1/64، آلومینیوم 76/19، منگنز 12/14 و آهن 12/65 درصد است. همچنین نقطه B شامل رسوباتی با درصد وزنی، اکسیژن 39/82، منیزیم 1/94، آلومینیوم 25/84 و سیلیسیوم 28/52 درصد است.

در شکل 10 نمودار آنالیز EDS نقاط A (نمودار الف) و B (نمودار ب) مربوط به نمونه جوشکاری شده با پین استوانه‌ای رزوه درشت در سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است. نقطه A شامل رسوباتی با درصد وزنی، منیزیم 0/84، آلومینیوم 79/33، منگنز 7/83 و آهن 15/54 درصد است. همچنین نقطه B شامل رسوباتی با درصد وزنی، اکسیژن 42/92، منیزیم 1/08، آلومینیوم 16/45 و سیلیسیوم 24/44 درصد است.

در شکل 11 نمودار آنالیز EDS نقاط A (نمودار الف) و B (نمودار ب) مربوط به نمونه جوشکاری شده با پین استوانه‌ای

#### 4- نتایج

در این تحقیق نتایج زیر حاصل شد:

**1-** سطح ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده با پین استوانه‌ای رزوه ریز صاف و صیقل بوده و کمترین پلیسه را در کنار جوش ایجاد کرده است.

**2-** استحکام کششی تمامی نمونه‌های جوشکاری شده از استحکام کششی فلز پایه بیشتر بوده و این موضوع بیانگر عدم وجود عیوب در جوش‌های انجام‌شده است. این مطلب همچنین بیانگر به‌دست آمدن ریزساختار مناسب در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بوده که باعث بهبود خواص مکانیکی در منطقه جوش شده است.

**3-** در تمامی نمونه‌ها ناحیه دکمه جوش دارای ریزترین دانه در منطقه اتصال به علت تغییر شکل پلاستیکی شدید حین فرایند بوده است. بافاصله گرفتن از مرکز جوش اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر شده تا اینکه در منطقه متأثر از حرارت درشت‌ترین دانه‌ها مشاهده شده است. در منطقه ترمومکانیکی دمای بالا و تغییر شکل موجود در این ناحیه باعث ایجاد دانه‌های کشیده شده در آن شده است.

**4-** آزمون ریز سختی سنجی نشان داده که دکمه جوش بیشترین مقدار سختی را نسبت به فلز پایه داشته و بافاصله گرفتن از مرکز جوش به‌تدریج از میزان آن کاسته شده است. بیشترین میزان سختی در منطقه جوش توسط ابزار استوانه‌ای رزوه درشت حاصل شده است. در حقیقت این نتیجه به دلیل کار مکانیکی شدید و دمای بالا حین فرایند جوشکاری بوده که باعث تشکیل دانه‌های بسیار ریز در منطقه اغتشاش، به‌وسیله مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی شده است.

**5-** در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده می‌شود عیوب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در میکرو ساختار هیچ‌یک از نمونه‌های جوشکاری شده دیده نشده و نشان‌دهنده انتخاب پارامترها و ابزارهای مناسب جهت انجام جوشکاری است. آنالیز EDS نشان‌دهنده رسوبات آلومینیوم، منیزیم، منگنز و آهن به رنگ روشن و رسوبات اکسیژن، منیزیم، آلومینیوم و سیلیسیوم به رنگ تیره در تصاویر بوده است. رسوبات در اثر جوشکاری با پین‌های متفاوت دچار شکستگی و جابه‌جایی می‌شوند.

#### 5- مراجع

- [1] Z. Ma, M. Mahoney, Super plastic deformation behaviour of friction stir process 7075 Al alloy, *Acta Material*, Vol. 50, pp. 4419-4430, 2008.
- [2] R. S. Mishra, Friction stir welding and processing,

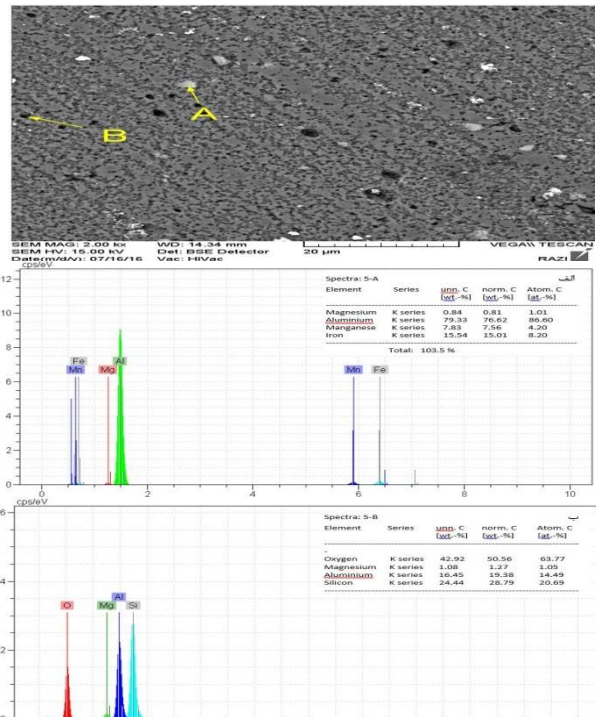


Fig. 10 Scanning electron microscope the cylindrical pin of coarse thread with a forward speed of 16 mm / min: A-point analysis by EDS method. B-point analysis by EDS method

شکل 10 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پین استوانه‌ای رزوه درشت با سرعت پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه: الف - آنالیز نقطه A به روش EDS ب - آنالیز نقطه B به روش EDS

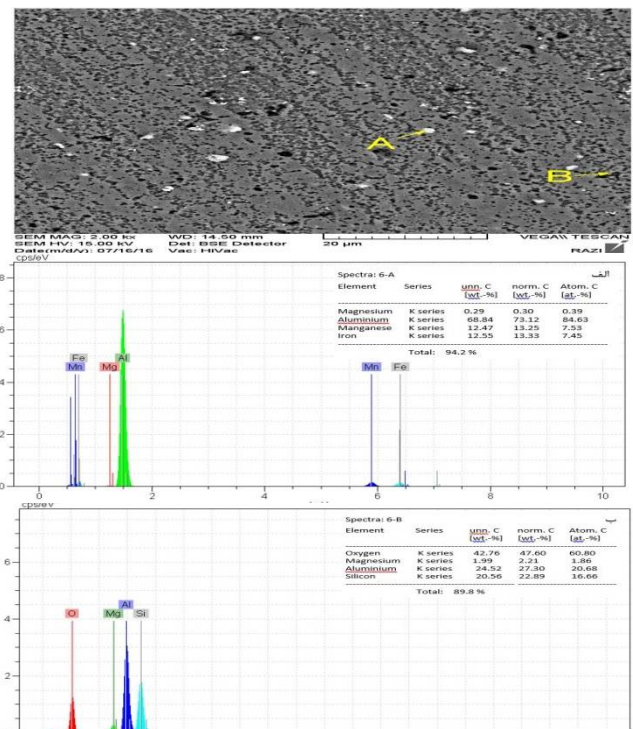


Fig. 11 Scanning electron microscope the cylindrical pin of coarse thread with a forward speed of 32 mm / min: A-point analysis by EDS method. B-point analysis by EDS method

شکل 11 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پین استوانه‌ای رزوه درشت با سرعت پیشروی 32 میلی‌متر بر دقیقه: الف - آنالیز نقطه A به روش EDS ب - آنالیز نقطه B

- [11] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, S. D. Smith, Friction stir welding-tool developments, proceedings of the TMS. Aluminum Automotive and joining sessions, 2001.
- [12] R. Nandan, T. Debroy, H. K. Bhadeshia, Review paper-recent advances friction stir welding process, weldment structure and properties, *progress in materials SCI*, Vol.53, pp.980-1023, 2008.
- [13] K. Elangovan, V. Basubramanian, in fluencies of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminum alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, pp. 285-295, 2008.
- [14] G. Mathers, The welding of aluminum and its alloys, *wood head publishing Ltd, Abington, Cambridge, UK*, Vol. 53, pp. 251-163, 2002.
- [15] P. Cerri Leo. Mechanical properties evolution during post-welding-heat treatments of double-lap Friction Stir Welded joints. *Materials and Design* 32, PP. 3465-3475, 2011.
- [16] W. M. Tomas, S. W. Lockyers, D. G. Staines, Friction stir welding -an update on recent developments, Form paper presented at imech stressed components in aluminum alloys, A.2003.
- [17] G. Lio, L. Murr, C. Niou, Micro structural aspets of the friction stir welding 7070 T 651 aluminum, *Scripta materialia*, Vol. 37, pp.355-361, 2005.
- [18] A. Kurt, M. Boz, The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process, Nstite of Science and Technology, Gazi University, Ankara Turkey, *materials & Design*, Vol.10, pp. 1016-1022, 2004.
- Materials Science and Engineering*, Vol. 50, pp.1-78, 2005.
- [3] H. Fujii, L. Cui, M. Maeda, Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys, *Materials Science and Engineering*, Vol. 419, pp. 25-31, 2006.
- [4] A. Scialpi, D. Filippis, P. Cavaliere, Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welding 6082 aluminum alloy, *Materials Letters*, Vol. 28, pp. 1124-1129, 2007
- [5] Y. Zhao, S. Lin, L. Wu, The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy, *Materials Letters*, Vol. 59, pp. 2948- 2952, 2005.
- [6] M. Boz, A. Kurt, The influence of stirrer geometry on bonding on and mechanical properties in friction stir welding process, *Materials Science and Engineering*, Vol. 25, pp. 343-347, 2004.
- [7] A. Esmaeili, M. K. Besharati Givi, A metallurgical and mechanical study on dissimilar friction stir welding of aluminum 1050 to brass (CuZn30), *Materials Science and engineering*, Vol. 528, pp. 7093-7102, 2011.
- [8] E. Salari, M. Jahazi, A. R. Khodabandeh, H. Ghasemi Nanesa, Friction stir lap welding of 5456 aluminum alloy with different sheet thickness: process optimization and microstructure evolution , *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , Vol. 82, pp. 39-48, 2016.
- [9] Standard test methods for Tensin Testing of Metallic material, New York, 2009.
- [10] Standard test methods for Koop and Vickers Hardness of Materials, New York, 2011.