ماەنامە علمى پژوھشى

مهندسی ساخت و تولید ایران www.smeir.org

بررسی تأثیر شکل هندسه پین ابزار بر خواص مکانیکی و ریزساختاری منطقه جوش در

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لببهلب AIMg₆ مهدی مهری¹، محمد رضا خانزاده^{2*}، حمید بختیاری³

۲ 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 khanzadeh@iaumajlesi.ac.ir ،8631656451

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 6 دی 1397 پذیرش: 20 خرداد 1398 ارائه در سایت: بهمن 1398	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 لببهلب آلیاژ آلومینیومGost 4784-977 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 پیز بر خواص مکانیکی اتصال، از آزمون کششی و ریز سختی سنجی استفاده شد. نتایج آزمون متالوگرافی نمایانگر سطح ظاهری صاف
کلیدواژگان: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم Gost 4784-97 هندسه پین خواص مکانیکی	صیقلی نمونههای جوشکاری شده با پین استوانهای رزوه ریز است. آنالیز EDS نشان دهنده رسوبات آلومینیوم، منیزیم، منگنز و آهن ب رنگ روشن و رسوبات اکسیژن، منیزیم، آلومینیوم و سیلیسیوم به رنگ تیره در تصاویر بوده است. آزمون ریز سختی سنجی نشان داده ک 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، بهوسیله 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 جوش و همچنین بیانگر بهدست آمدن ریز ساختار مناسب در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بوده که باعث بهبود خواص مکانیکی در منطق 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 Mehri¹, Mohammad Reza Khanzadeh^{2*}, Hamid Bakhtiari³

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	Abstract
Original Research Paper Received 27 December 2018 Accepted 10 June 2019 Available February 2020	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
Keywords: Friction stir welding Gost, 4784-97 Aluminum alloy Pin geometry Mechanical properties	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:

Archive of SID

1– مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روشی نوین برای جوشکاری فلزات در حالتجامد است که به دلیل تغییر شکل شدید همراه با گرمای ناشی از اصطکاک در منطقه جوش، ریزساختاری حاصل میشود که در مقایسه با دیگر فرایند های 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 قابلقبول 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 می توانند 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 ایجادشده و مقداری گرما هم در اثر تغییر شکل پلاستیک مواد اضافه می شود. ابزار تا زمانی که شانه با قطعه کار تماس پیدا می کند، به فرورفتن خود در قطعه کار ادامه می دهد. 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 می شود. هندسه ابزار مؤثرترین پارامتر در توسعه فرایند است که با ایجاد رزوه و شکلهای پیچیده روی آن نیروی لازم برای جریان مواد و اختلاط کاهشیافته بهطوری که در شکل مارپیچی، حجم جابجا شونده ماده تا 60٪ و در شکل سه شیاری تا 70٪ كاهش يافته است [2].

در سالهای اخیر موارد مطالعاتی متعددی در مورد تأثیر هندسه ابزار بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انجامشده 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 بهطور چشمگیر، بر قابلیت جوشکاری اثر گذاشته است. اسکیالپی و همکاران [4] تأثیر ابزار با هندسههای شانه متفاوت را بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 6082 برسی خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 6082 برسی وروزهای نازک ایجاد مینماید. ژاوو و همکاران [5] اثر هندسه

پین را بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار آلومینیم 2014 بررسی کردند. نتایج آنها نشان داده که پین بر جریان پلاستیکی مواد بهشدت تأثیر گذاشته و بهترین کیفیت جوش با استفاده از ابزار مخروطی رزوه دار بهدست 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 می شود فلز جوشکاری به شکل براده به سمت بیرون حرکت کند، آنها همچنین بیان نمودند بهترین پیوند با ابزار رزوهای با گام پایین ایجادشده است.

مرد علیزاده 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 می شود.

سالاری و همکاران [8] به بررسی اثر هندسی ابزار و سرعت چرخش ابزار بر روی خواص مکانیکی و شکل گیری عیوب در جوش اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم 5456 پرداختند. آنها از چهار ابزار با هندسه مخروطی (T₁)، استوانهای مخروطی (T₂), مخروطی پلهای (T₃) و یک ابزار سه شیاره (T₄) 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 بررسی تاثیر 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 مکانیکم از پین ابزار مخروطی رزوه دار و استوانه ای پرداخت شده است.

2- روش آزمون 2-1- مواد اوليه

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

جدول 1 ترکیب شیمیایی فلز پایه

Table 1 Base metal chemical composition								
آلياژ	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 مكانيكي فلز پايه

Table 2 Mechanical properties of base metal						
سختی (HV)	درصد	استحكام	استحكام			
	تغيير طول	تسليم	کششی نہایی	آلياژ		
	نسبى	(Mpa)	(Mpa)			
96	24	156	352	آلومينيوم		

2-2- آمادهسازی نمونهها و ساخت ابزار

اتصال دهی ورق های آلومینیوم به ضخامت 3 میلیمتر، با طرح اتصال لب به لب 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 هندسه های مخروطی ساده، استوانه ای با رزوه درشت و استوانه ای با رزوه ریز استفاده شده است. نوک پین های استوانه ای با زاویه 10 در جه ای طراحی شدند. مشخصات هندسه ابزاره ای مورداستفاده 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	С
1/5	1/3	1	1	0/4	0/39

جدول 4 خصوصیات هندسه ابزارهای مورداستفاده

Table 4 Characteristics of the geometry of the tools used							
قطر شانه (mm)	قطر پين (mm)	ارتفاع پین (mm)	گام ابزار (mm)	هندسه ابزار	رديف		
9	3	2/7	1/5	استوانهای رزوه درشت	1		
9	3	2/7	1	استوانهای رزوه ریز	2		
9	3	2/7	-	مخروطي ساده	3		

2-3- عمليات حرارتي 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

میند سی ساخت و تولید ایران، اسفند 1398، دوره 6 شماره 9

سانتی گراد و سپس به مدت 3 ساعت در دمای 570 درجه سانتی گراد 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 جوشكارى

برای انجام جوشکاری از دستگاه فرز عمودی نمونه اونیورسال بهعنوان تأمین کننده 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 ثانیه ای جهت پیش گرم کردن قطعه، شروع به حرکت پیشروی در طول اتصال نموده و در انتهای عملیات جوشکاری از قطعه خارج می شود. چرخش پین 900 دور در دقیقه، جهت چرخش به صورت ساعت گرد و سرعت پیشروی نیز 16 و 32 میلی متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

5-2- آزمونها

به منظور مطالعه و بررسی ریز ساختار بوجود آمده، روش متالو گرافی نوری استفاده شده است. برای این منظور نمونه هایی با ابعاد 3*25 میلی متر از سطح مقطع جوش بریده، مانت و توسط سنباده های کاربید سیلیسیم از شماره 80 تا 2800 سنباده زنی شدند. در مرحله بعد نمونه ها توسط پودر آلومینا پرداخت و با الکل شسته و خشک شدند. برای اچ کردن نمونه ها از روش الکترو اچ استفاده شده است. ریز ساختار مناطق مختلف قطعات جوشکاری شده توسط میکروسکوپ نوری 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 (MH1) و توسط دستگاه (Koopa) مدل (MH1) انجام شد. سختی سنجی نمونه ها 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 اندازه گیری 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

به سیستم آنالیز EDS است.

3- نتايج و بحث

3-1-كيفيت ظاهرى 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 بالابرده و درنتیجه این عمل، مواد در منطقه اغتشاش بهشدت نرم شده و در اثر نیرویی که از سوی پیشانی ابزار واردشده این مواد از اطراف جوش بیرون میزنند و پس از سرد شدن بهصورت پلیسه هایی در لبههای جوش ظاهرشده است [11]. جدا از متغير هندسه پين، عامل فشار عمودی نیز از متغیرهای تأثیر گذار بر روی کیفیت ظاهری سطح جوش و پلیسه های ایجادشده در لبهی قطعه کار است. وقتی فشار عمودی کم باشد و پین تا انتها پایین برده نشود، در قسمت تحتاني ورق اختلاط مواد كاهش مي يابد. درنتيجه شانه ابزار تماس واقعى با سطح قطعات نداشته و باعث ايجاد حرارت اصطکاکی نشده و از بیرون زدن ماده هم زده از موضع جوش جلوگیری نمی کند و این امر باعث ایجاد حفرههای داخلی یا شيار مي شود. افزايش بيشازحد عمق نفوذ پين، سبب ايجاد پلیسه های زیاد در دو سمت جوش و نیز کم شدن ضخامت ناحیه جوش شده است. این عامل بیشترین تأثیر را در ایجاد یلیسهها در لبه قطعات جوش داده شده را داشته است [12]. الانگوان و همکاران به بررسی تأثیر هندسه پین بر خصوصیات جوش اصطكاكي اغتشاشي آلياژ 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 بیشازحد فلز جوش شده که میتواند باعث کاهش خواص مکانیکی اتصال شود [13]. یکی دیگر از پارامتر مهم زاویه قرار گرفتن پین با سطح قطعه می باشد که برای همه نمونه ها 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 می شود 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 ریز ساختار مناسب در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بوده که باعث بهبود خواص مکانیکی در منطقه جوش شده است.

جدول 5 نتايج آزمون كشش نمونهها

Table 5 Tensile test results							
سرعت پیشروی (mm/min)	پهنا (mm²)	درصد تغيير طول	تنش تسلیم (N/mm²)	تنش نهایی (N/mm ²)	محل شکست نمونه	نوع پين	
16	19/16	23/4	167	364	فلز پايه	پين استوانهاي	
32	19/14	22/7	162	361	فلز پايه	رزوه ريز	
16	19/10	20/7	173	359	فلز پايه	پين استوانهاي	
32	19/14	20/2	156	356	فلز پايه	رزوه درشت	
16	19/11	25/9	162	365	فلز پايه	پين مخروطي	
32	19/19	24/4	159	364	فلز پايه	سادہ	

جدول 6 نتايج آزمون كشش فلز پايه

Table 6 Basic metal tensile test results

ضخامت	لنهي	درصد تغيير طول	تنش تسليم	تنش نهایی	مشخصه نمونه
2/95	19/16	24/8	156	352	فلز پايه

همچنین با مشاهده نتایج بهدست آمده از آزمایش کشش، مشخص شد که شکست نمونههای مورد آزمایش از فلز پایه صورت گرفته و به دلیل پایین تر بودن استحکام کششی فلز پایه از منطقه جوش امکان تجزیهوتحلیل 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.





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 شكل 1 نمودار حاصل از تست كشش جوش انجام شده توسط پين مخروطی 10 الف - سرعت پيشروی 16 ميلیمتر بر دقيقه ب - سرعت پيشروی 22 ميلیمتر بر دقيقه

3-3- متالوگرافی نوری

در شکل 2 ریزساختار فلز پایه و همچنین ریزساختار منطقه جوش مربوط به نمونههای جوش دادهشده 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. همان طور که ملاحظه می شود در تمامی نمونهها ناحیه دکمه جوش ریزترین دانه و ناحیه تحت تأثیر حرارت درشتترین

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. درواقع حضور دانههای ریز در این ناحیه بیانگر بروز پدیده تبلور مجدد دینامیکی است که در اثر تغییر شکل شدید ناشی از فرایند رخداده و بافاصله گرفتن از مرکز جوش اندازه دانهها بزرگتر شده تا اینکه در منطقه متاثر از حرارت درشتترین دانهها مشاهدهشده 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 دادهشده 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.

همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود با افزایش سرعت پیشروی در یک سرعت دوران و زاویه انحراف ثابت اندازه دانه ها کاهش یافته است، در حقیقت چون گرمای ورودی فرایند در دکمه جوش کمتر است، در حین فرایند تبلور مجدد مکانیکی، پدیده رشد دانه ها با سرعت کمتری اتفاق می افتد. کری و همکاران بیان نموده اند که اندازه دانه در دکمه جوش اصطکاکی اغتشاشی، از ناحیه های دیگر جوش کوچک تر است [15]. اندازه دانه ها در مناطق مختلف جوش با استفاده از روش خطی و طبق استاندارد (ASTM-E112) از رابطهی (1) به دست آمده و در جدول 7 آورده شده است که تأیید کننده مطالب بالا است.



(د)

مهندسی ساخت و تولید ایران، اسفند 1398، دوره 6 شماره 9



در رابطه (1)، L طول خطوط موازی، P تعداد خطوط موازی، Z تعداد کل دانههای قطعشده توسط خطوط، V ، موازی، Z تعداد کل 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 دادهشده است. در همه نمونهها سختی دکمه جوش بیشترین مقدار را نسبت به فلز پایه داشته و با فاصله گرفتن از مرکز جوش بهتدریج از میزان آن کاسته شده است.

Table / Aver	age grain size	in unierent v	weitung regio	iis iii iiicioiiieteis
ميانگين	ميانگين اندازه	میانگین اندازه	میانگین اندازه	ما بشب من
اندازه دانه SZ	دانه TMAZ	دانه HAZ	دانه فلز پایه	لوع و شماره
(ميكرومتر)	(ميكرومتر)	(ميكرومتر)	(ميكرومتر)	پین
8	21	35	24	مخروطی (1)
7	19	33	25	پین استوانهای رزوه ریز (2)
5	18	30	24	پین استوانهای رزوه ریز (3)
7	20	34	24	پين مخروطي (4)
5	18	31	24	پین استوانهای رزوه درشت (5)
4	17	29	25	پین استوانهای رزوه درشت (6)

جدول 7 میانگین اندازه دانه در مناطق مختلف جوش برحسب میکرومتر



 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)

 شكل 4 تاثير سرعت پيشروى ابزار بر تغييرات توزيع سختى: الف- سرعت پيشروى 16 ميلى متر بردقيقه (يين 2) و 32 ميلى متر بردقيقه (يين 3)

پیشروی ۱۵ میلی مىر بردقیقه (پین 2) و 22 میلی مىر بردقیقه (پین 3) ب سرعت پیشروی 16 میلی متر بردقیقه (پین 1) و 32 میلی متر بردقیقه (پین 4) ج- سرعت پیشروی 16 میلی متر بردقیقه (پین 5) و 32 میلی متر بردقیقه (پین 6)

همان طور که مشاهده می شود با افزایش سرعت پیشروی ابزار در سرعت دورانی ثابت، سختی ناحیه جوش افزایش می یابد. به نظر می رسد دلیل آن این است که با افزایش سرعت پیشروی ابزار، گرمای ورودی کاهش یافته و در حین فرایند تبلور مجدد مکانیکی، پدیده رشد دانه ها با سرعت کمتری اتفاق می افتد، اندازه دانه کاهش و در نتیجه سختی افزایش می یابد. همان گونه که در شکل 4 دیده می شود سختی فلز پایه حدود 96 ویکرز است که با ورود به منطقه متأثر از حرارت تا حدود 92 ویکرز کاهش می یابد. از آنجاکه قطعات آنیل شده می باشند، کاهش

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 به دست آمده در شکل 5 مشخص شد که بیشترین سختی در منطقه جوش، شکل 5 مشخص شد که بیشترین سختی در منطقه جوش، توسط ابزار استوانهای رزوه درشت و سختی به دست آمده 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 می تواند ناشی از اختلاط و سیلان بیشتر مواد باشد که در پینهای دارای رزوه بهتر صورت می گیرد [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 می شوند. [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

شكل 5 تاثير نوع پين بر تغييرات توزيع سختى آلومينيوم: الف- سرعت پيشروى 16 ميلى متر بر دقيقه ب- سرعت پيشروى 32 ميلى متر بر دقيقه

5-3- 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 اصطکاکی اغتشاشی نشان داده

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 می گیرد. به همین دلیل مواد در دکمه جوش، تحت تأثیر اختلاط ابزار متبلور می شوند که منجر به تولید دانه های ریز و هم محور می گردند [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 کشید گی دانه ها در این منطقه شده است. این موضوع باعث ایجاد در منطقهی متأثر از حرارت دیده می شود که در شکل 6- (ج) به تصویر کشیده شده است. تفاوت اندازه دانه ها و شکل دانه ها به تصویر کشیده شده است. تفاوت اندازه دانه ها و شکل دانه ها ایم مخانیکی انجام شده و سرعت پیشروی متفاوت در هر پین است [18].

همان گونه که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ملاحظه می شود 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) شكل 6 تصوير ميكروسكوپ الكتروني روبشي پين مخروطي با سرعت

پیشروی 16 میلیمتر بر دقیقه: الف- منطقه جوش (SZ) ب- منطقه متاثر از حرارت و مکانیک (TMAZ) ج- منطقه متاثر از حرارت (HAZ)

در شكل 7 نمودار آناليز EDS نقاط A (نمودار الف) و B (نمودار ب) مربوط به نمونه جوشكارى شده با پين مخروطى در سرعت پيشروى 16 ميلىمتر بر دقيقه نشان داده شده است. همان گونه كه در شكل مشاهده مىشود نقطه A شامل رسوباتى با درصد وزنى، منيزيم 1/88، آلومينيوم 26/58، 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 B 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. سرعت پیشروی 16 میلیمتر بر دقیقه نشان داده شده است. ممانگونه که در شکل مشاهده میشود نقطه A شامل رسوباتی با درصد وزنی، منیزیم 28/0، آلومینیوم 74/8، منگنز 10/13 و آهن 12/71 درصد است. همچنین نقطه B شامل رسوباتی با درصد وزنی، اکسیژن 31/91، منیزیم 32/6، آلومینیوم 42/65 و







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 میکروسکوب 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



 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

 شكل 8 تصوير ميكروسكوپ الكترونى روبشى پين استوانه اى رزوه ريز با

سرعت پیشروی 16 میلیمتر بر دقیقه: الف- آنالیز نقطه A به روشEDS ب-آنالیز نقطه B به روش EDS

در شكل 9 نمودار آناليز EDS نقاط A (نمودار الف) و B (نمودار ب) مربوط به نمونه جوشكارى شده با پين استوانهاى رزوه ريز در سرعت پيشروى 32 ميلىمتر بر دقيقه به تصوير كشيده شده است. نقطه A شامل رسوباتى با درصد وزنى، منيزيم 1/64، آلومينيوم 76/19، منگنز 12/14 و آهن 28/55 درصد است. همچنين نقطه B شامل رسوباتى با درصد وزنى، اكسيژن 39/82، منيزيم 1/94، آلومينيوم 25/84 و سيليسيوم 28/52 درصد است.

در شكل 10 نمودار آناليز EDS نقاط A (نمودار الف) و B (نمودار ب) مربوط به نمونه جوشكارى شده با پين استوانهاى رزوه درشت در سرعت پيشروى 16 ميلىمتر بر دقيقه نشان داده شده است. نقطه A شامل رسوباتى با درصد وزنى، منيزيم 0/84، آلومينيوم 79/33، منگنز 7/83 و آهن 15/54 درصد است. همچنين نقطه B شامل رسوباتى با درصد وزنى، اكسيژن 42/92، منيزيم 1/08 و سيليسيوم 16/45 و سيليسيوم 24/44

در شکل 11 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. همان گونه که در شکل مشاهده میشود نقطه A شامل رسوباتی با درصد وزنی، منیزیم 29/0، آلومینیوم 68/84، منگنز 12/47و 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. همان گونه 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

کاملاً مشابهی وجود داشته و فقط تفاوت اندکی در درصد وزنی 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 ناحیه دکمه جوش بیشتر از ناحیههای دیگر مشاهدهشده و ناحیه دکمه جوش بیشتر از ناحیههای دیگر مشاهدهشده و میتواند تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی داشته باشد. همچنین رسوبات نقاط B نیز دارای ترکیبات مشابهی بوده و در جوش را رسوبات نقاط B نیز دارای ترکیبات مشابهی بوده و در جوش دچار شکستگی، جابهجایی شده و در برخی مناطق تجمع رسوبها 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. 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 استوانه ای 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 be analysis by EDS method

4- نتايج

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 همهی 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 همهی 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 ملاحظه می شود 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 می شوند.

5- مراجع

- 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,

- [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. Baslsubramanian, 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 stirrergeometry 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.