

Research Paper

Modification of mechanical properties of friction stir welded AM60 magnesium alloy with changing rotational speed and addition of alumina nanoparticles

Arash Behzadineghad¹, Abbas Mohassel^{2*}, Hamid Omidvar³, Nader Setoudeh⁴

1- M.Sc Student, Materials Engineering Department, School of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

2- Assistant Professor, Materials Engineering Department, School of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

3- Associate Professor, Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

4- Associate Professor- Materials Engineering Department, School of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Received: 2021/08/14

Revised: 2021/12/28

Accepted: 2022/02/14

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2022.28682.1932](https://doi.org/10.30495/jnm.2022.28682.1932)

Keywords:

Friction stir welding, AM60 alloy, Mechanical properties, Intermetallic compounds, Rotational speed

Abstract

Introduction: In this study mechanical properties of friction stir welded AM60 magnesium alloy in existence and lacking of alumina nanoparticles were examined.

Methods: AM60 specimens with a longitudinal groove in some of them, near the joining edges for holding reinforcing alumina nanoparticles, were prepared. Then the grooves were locked and friction stir welding process was done by H13 steel tool and FP4ME type welding machine on with and without alumina nanoparticles specimens in 1000 rpm, 1200 rpm and 1400 rpm rotational speed, 25 mm/min linear speed and starting pass of 1, 2 and 3 pass conditions.

Findings: Microscopic analysis revealed peak condition could be made in 1200 rpm rotational speed, not only in the absence of reinforcing alumina nanoparticles but also in the presence of them. Adverse effects of higher strains in lowering grain size and higher temperatures in grain growth should be considered. In the existence of alumina nanoparticles in the matrix some areas of low content aluminum formed besides of high aluminum content of intermetallic compounds regions. Higher hardness and ultimate tensile strength achieved in optimum 1200 rpm rotational speed not only with alumina nanoparticles but also in the absence of alumina nanoparticles condition. Higher stresses and therefore lower agglomerated alumina nanoparticles resulted with increasing rotational speed. With alumina nanoparticles in matrix, lower grain size, higher hardness and higher ultimate tensile strength was attained.

Citation: Behzadineghad A, Mohassel A, Omidvar H, Setoudeh N, Modification of mechanical properties of friction stir welded AM60 magnesium alloy with changing rotational speed and addition of alumina nanoparticles. Quarterly Journal of New Materials. 2021; 12(45): 47- 64

***Corresponding author:** Abbas Mohassel

Address: Department of Materials Engineering, School of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Tell: +989171043824

Email: mohassell@yu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

AM60 alloy is a low cost magnesium alloy with low Al and Mn content and proper ductility which is used in automotive industry [1,12] and friction stir welding (FSW) is a solid state welding process which is used for welding high temperature sensitive materials such as magnesium alloys. Produced heat and resulting material flow are effective in microstructure formation and linear speed and rotational speed are the two main variables [2-4] in FSW process. High linear speed and/or small rotational speed result low temperature and so small grain size microstructure [4]. Study of reinforcing particles on friction stir welded aluminum alloys have been studied in numerous researches but number of such studies in magnesium alloys is relatively low and often related to other Mg alloys [5-11]. Low mechanical behavior of weld zone in friction stir welded AM6 alloy structures has been attributed to drastic changes in texture and microstructure between weld zone and thermomechanical zone [10] and high hardness in AM60 weld zone has been achieved in low linear speed and low rotational speed conditions [9].

Materials and Methods

AM60 specimens with dimensions of 10 mm*5 mm*0.5 mm and a longitudinal groove in some of them, near the joining edges for holding reinforcing alumina nanoparticles, were prepared. Then the grooves were locked and friction stir welding process was done by H13 steel tool [13] and FP4ME type welding machine on with and without alumina nanoparticles specimens in 1000 rpm, 1200 rpm and 1400 rpm rotational speed, 25 mm/min linear speed and starring pass of 1, 2 and 3 pass conditions. Mean size and purity of the reinforcing alumina nanoparticles was 20 nm and 90% respectively. Microstructural analyses were performed with an optical Microscopy (OP), a MIRA3 TESCAN-XMU model field emission scanning electron microscopy (FESEM) and a VEGA TESCAN-XMU type scanning electron microscopy (SEM) equipped with energy-dispersive x-ray spectroscopy (EDS). Tensile

tests were made using an Al-7000LA model universal testing machine and Vickers hardness tests with a MXT70 type instrument. MIP software was used for analyzing the microscopic images and determining the size of grains and alumina nanoparticles.

Results and Discussion

Similar to others' results, reduction in volume percent of $Mg_{17}Al_{12}$, grain growth, and formation of further intermetallic compounds was observed in base and weld metal [15-17,18-19,21]. As it is seen in Figures 1 and 2-A, Microscopic studies showed formation of low aluminum content areas (darker areas) in neighborhood of aluminum intermetallic compounds (White point) or in vicinity of high aluminum content areas (lighter zones). This events were not detected in specimens without alumina nanoparticles. Heat which is generated during FSW process causes to occur dissolving and diffusion of alumina nanoparticles [20].

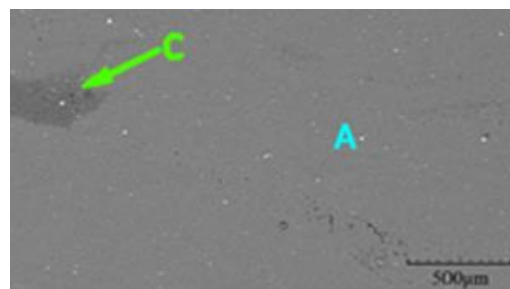


Fig. 1: Formation of low aluminum content areas (dark areas) in neighborhood of aluminum intermetallic compounds (White point)

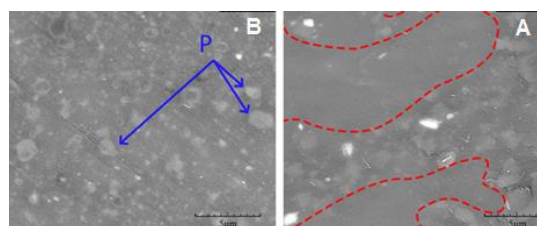


Fig. 2: A: Formation of low aluminum content areas (darker areas) in vicinity of high aluminum content areas (lighter zones) B: A nearly uniform distribution of alumina nanoparticles (P points in Figure 2-B) in specimens having alumina reinforcing nanoparticles

EDS analysis indicated a nearly uniform distribution of alumina nanoparticles (P points in Figure 2-B) in specimens with alumina reinforcing nanoparticles which showed the ability of FSW process in closely

constant dispersion of nanoparticles in matrix.

Grain size measurements showed a decrease and then an increase in grain size with increasing of rotational speed in both with and without alumina nanoparticles specimens. In lack of alumina nanoparticles, the mean size of grains in stir zone were 7.4, 6.2 and 10.2 micron for rotational speeds of 1000, 1200 and 1400 rpm respectively while in samples with alumina nanoparticle, the mean size of grains in stir zone decreased to 4.2 micron, 3.1 micron and 5.5 micron for rotational speeds of 1000, 1200 and 1400 rpm respectively. Strengthening nanoparticles cause to reduce grain size by locking the dislocations and preventing the grain growth [22]. Due to welding strains [23], the size of agglomerated alumina particles diminished with increasing of rotational speed.

Vickers hardness tests revealed an increase in hardness in samples having alumina nanoparticles in comparison with non-alumina nanoparticle specimens. Weld centerline hardness of non-alumina nanoparticle specimens increased by 4.4, 12.5 and 3.7 percent of hardness of base material with increasing of rotational speeds of 1000, 1200 and 1400 rpm respectively while for samples with alumina nanoparticles due to existence of reinforcing alumina nanoparticles, amounts of this factor were increased to 16.2, 32.4 and 21.3 percent respectively.

Tensile tests showed an increase in ultimate tensile strength in specimens containing alumina nanoparticles in comparison with non- alumina nanoparticle samples. Ultimate tensile strength of non-alumina nanoparticle samples was obtained 75, 88 and 79 percent of ultimate tensile strength of base material with increasing of rotational speeds of 1000, 1200 and 1400 rpm respectively while for samples with alumina nanoparticles, due to existence of reinforcing alumina nanoparticles, amounts of this factor were increased to 88, 98 and 86 percent respectively.

Conclusion

In friction stir welding process, strain and heat rises with increasing of rotational speed. Increasing of strain leads to a decrease in grain size but reverse effect is achieved with accumulative of heat. In lack of alumina nanoparticles, the mean size of grains in stir zone were 7.4, 6.2 and 10.2 micron for rotational speeds of 1000, 1200 and 1400 rpm respectively while in samples with alumina nanoparticle, the mean size of grains in stir zone decreased to 4.2 micron, 3.1 micron and 5.5 micron for rotational speeds of 1000, 1200 and 1400 rpm respectively.

Rotational speed of 1200 rpm was accepted as an optimum rotational speed for hardness and ultimate tensile strength. Reinforcing nanoparticles cause to reduce grain size by locking the dislocations and preventing the grain growth.

In samples with reinforcing alumina nanoparticles, the size of agglomerated particles diminished with increasing of rotational speed and aluminum intermetallic compounds formed in vicinity of low aluminum content areas.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the coauthors and participants in this study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

The authors would like to thank research deputy of Yasouj University for financial supporting of this research.

Authors' contributions

This study is a portion of M.Sc thesis of Arash Behzadineghad and relates to master research plan of corresponding author. Authors and participants have actively contributed in this paper and are aware of submitted article.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

اصلاح خواص مکانیکی جوش اصطکاکی - اغتشاشی آلیاژ منیزیم AM60 از طریق تغییر سرعت دوران و افزودن نانو ذرات آلومینا

آرش بهزادی نژاد^۱، عباس محصل^{۲*}، حمید امیدوار^۳، نادر ستوده^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

۴. دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده

مقدمه: در این پژوهش خواص مکانیکی جوش اصطکاکی-اغتشاشی آلیاژ AM60 در دو حالت بدون نانو ذرات تقویت کننده آلومینا و با نانو ذرات تقویت کننده آلومینا مورد بررسی قرار گرفت.

روش: نمونه های آلیاژی AM60 که در تعدادی از آنها در نزدیک خط جوش شیارهایی به منظور تعبیه نانوذرات آلومینا تعبیه شده بود، در دو حالت عاری و حاوی نانو ذرات آلومینا تحت جوشکای اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفتند.

یافته‌ها و نتیجه گیری: بررسی های میکروسکوپی نشان داد که هم در نمونه های بدون نانو ذرات تقویت کننده و هم در نمونه های دارای نانو ذرات تقویت کننده، افزایش سرعت دوران ابزار کار، بدلیل اعمال کرنش های زیاد در ناحیه بهم خورده جوش، منجر به افزایش پدیده تبلور مجدد و ریز شدن دانه ها و در مقابل افزایش دما بدلیل اصطکاک ابزار کار با زمینه باعث تاثیر معکوس و منجر به رشد دانه ها می شود. بر اساس نتایج به دست آمده وجود ذرات تقویت کننده آلومینا در زمینه باعث کاهش اندازه دانه ها شد همچنین در هر دو حالت، سرعت دوران ۱۲۰۰rpm به عنوان سرعت دوران بهینه برای اندازه دانه پذیرفته شد. وجود نانو ذرات تقویت کننده آلومینا در زمینه و شکل گیری دمای بالا در هنگام فرآیند جوشکاری باعث وقوع فرآیند نفوذ و شکل گیری مناطق فقیر از آلومینیوم در بعضی نقاط و شکل گیری ترکیبات بین فلزی آلومینیوم در نقاط دیگر شد. به علت رشد دانه‌ها در منطقه متأثر از حرارت، سختی در این منطقه کمترین مقدار بود اما بدلیل رخداد پدیده تبلور مجدد و ریز شدن اندازه دانه‌ها در منطقه بهم خورده جوش، بیشترین مقدار سختی در این منطقه به دست آمد. هم در نمونه‌های بدون ذرات تقویت کننده آلومینا و هم در نمونه های دارای ذرات تقویت کننده آلومینا، بیشترین مقدار سختی و استحکام نهایی کششی در منطقه بهم خورده جوش در سرعت دوران بهینه ۱۲۰۰rpm به دست آمد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳

تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2022.28682.1932](https://doi.org/10.30495/jnm.2022.28682.1932)

واژه‌های کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، آلیاژ AM60، سرعت دوران، خواص مکانیکی، ترکیبات بین فلزی

* نویسنده مسئول: عباس محصل

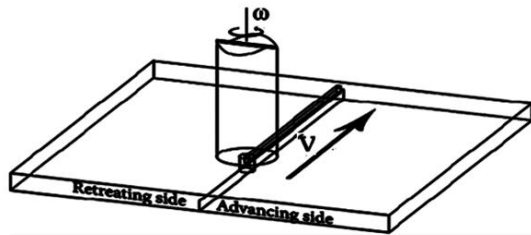
نشانی: گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

تلفن: ۰۹۱۷۱۰۴۳۸۲۴

پست الکترونیکی: mohassell@yu.ac.ir

مقدمه

سنجی فرضیه های مکانیسم های شکست در خط جوش اصطکاکی - اغتشاشی آلیاژ AM60، مورد اهتمام رن و همکاران [۱۱] قرار گرفته است. هرچند که به هدف بهبود عملکرد جوش، فرضیه هایی ارائه و آزمایش هایی انجام گرفته است ولی به علت ناکافی بودن آزمایشات و نادیده گرفته شدن دیگر پارامتر ها، منجر به اثبات و ارائه مکانیسم شکست مربوط نشده است. در این پژوهش تلاش می شود با تغییر سرعت دوران ابزار کار مقدار بهینه تعیین و سپس نقش نانو ذرات افزودنی از نوع آلومینا در اصلاح خواص مکانیکی جوش بررسی گردد.



شکل ۱- طرح واره فرآیند FSW.

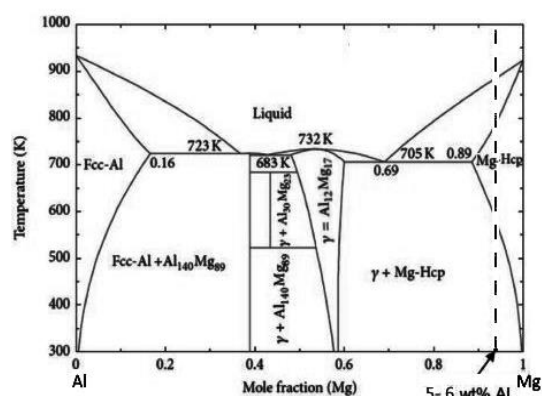
مواد و روش ها

AM60 یک آلیاژ عملیات حرارتی پذیر با قابلیت دایکست است که عموماً به صورت قطعات ریختگی مورد استفاده قرار گرفته و ورق های نوردی آن کمتر بکار گرفته می شوند. بنابراین نمونه های مورد استفاده در این مقاله از قطعات ریختگی و عاری از هرگونه تاریخچه کارسختی قبلی بودند. در این پژوهش، قطعاتی از آلیاژ ریخته شده AM60 به ابعاد ۱۰*۵*۶ سانتیمتر مکعب برش داده شد. در شکل (۲) موقعیت این آلیاژ در نمودار فازی Mg-Al مشاهده [۹] و در جدول (۱) آنالیز شیمیایی اسمی این قطعات ارائه شده است [۱۲]. به عنوان ابزارسنبه از فولاد گرم کار H 13 استفاده شد تا توانایی لازم به حفظ سختی و انجام کار دمای بالا بر روی قطعات کار را داشته باشد. ترکیب شیمیایی اسمی این فولاد در جدول (۲) آمده است [۱۳]. ابزار سنبه ای از این فولاد خام تهیه و تراشکاری شد. طرح و ابعاد این ابزار در شکل (۳- الف) آورده شده است. رزوه های استاندارد با گام ۱/۵ میلی متر طراحی و اجرا شد و سپس عملیات حرارتی شامل تنش گیری در دمای ۶۰۰ الی ۶۵۰ درجه سانتی گراد، سه مرحله سخت کاری با دمای حداکثر ۱۰۸۰°C و سه مرحله تمپر در دمای ۲۵۰ الی ۳۵۰ درجه سانتی گراد بر روی آن انجام گرفت تا بر مبنای مطالعات به سختی مورد نیاز ۵۲HRC رسیده شود [۱۴]. برای انجام عملیات جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی در حضور ذرات تقویت کننده، از پودر نانوآلومینای شرکت Shenzhen Nanotech Port Co., Ltd. ساخت کشور چین با خلوص ۹۹٪ و با متوسط اندازه دانه ۲۰ نانومتر استفاده شد همچنین برای انجام هر پاس اختلاط جوش اصطکاکی- اغتشاشی ماشین فرز مدل FP 4ME محصول شرکت ماشین سازی تبریز بکار گرفته شد. برای ۶ قطعه از قطعات، شیارهایی به منظور تعبیه پودر های تقویت کننده نانو آلومینا در درون آنها، ماشین کاری شد. شکل (۳- ب) موقعیت این شیار ها را در قطعات کار و شکل های (۳- ج) و (۳- د) به ترتیب ابزار کار و تجهیزات جوش

آلیاژ AM60 از دسته آلیاژهای ارزان قیمت منیزیم، دارای مقدار کمی آلومینیوم و منگنز است. به دلیل تولید آسان، انعطاف پذیری بالا و هزینه پایین این آلیاژ در صنایع اتومبیل سازی در تهیه قطعات مختلف از آن جمله به عنوان صندلی، سرسیلندر و چرخ استفاده گسترده یافته است [۱]. فرآیند جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی (FSW) یک روش اتصال حالت جامد مناسب برای جوشکاری آلیاژهای حساس به دمای بالا مانند آلیاژهای منیزیم است. در این روش به علت عدم وقوع ذوب در محل اتصال، شکل گیری تنش های پسماند و ترکیبات بین فلزی ترد و شکننده به حداقل رسیده و در نتیجه استفاده صنعتی از این روش در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته است. شکل (۱) طرح واره ای از عملیات جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی را نشان می دهد. در این شکل جهت چرخش ابزار کار با نماد ω و جهت حرکت ابزار کار با نماد V نشان داده شده است و بر مبنای آن در دو سمت قطعه سمت های پیش رو^۱ و پس رو^۲ مشخص شده است. در جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی عمل به هم خوردن سطح همراه با حرکت وضعی ابزار همزن باعث افزایش دمای منطقه به هم خورده شده و در اثر حرکت ابزار سیلان ماده اتفاق می افتد. گرمای تولیدی و سیلان ماده دو عامل اصلی مؤثر بر ریزساختار و سرعت خطی و سرعت دوران دو متغیر اصلی مؤثر بر خواص نهایی قطعات هستند [۲-۴]. با افزایش سرعت خطی ابزار کار، گرمای تولیدی در اثر اصطکاک ابزار کار با قطعه کاهش یافته و باعث کاهش دمای منطقه جوش می شود [۳]. عملکرد سرعت دوران، برعکس سرعت خطی است بطوریکه با افزایش سرعت دوران ابزار کار، نرخ تولید حرارت در منطقه جوش افزایش یافته و این امر منجر به افزایش اندازه دانه ها در منطقه جوش می شود [۴]. از مشکلات مطرح در فرآیندهای جوشکاری ذوبی تامین خواص مکانیکی منطقه جوش مشابه با فلزات پایه است که در روش های جوشکاری حالت جامد به علت عدم رشد دانه ها و عدم شکل گیری تخلخل این مشکلات کاهش می یابد. بیشتر بررسی های انجام گرفته در رابطه با نقش ذرات تقویت کننده در قطعات جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی مربوط به آلیاژهای زمینه آلومینیومی است [۲]. در مورد آلیاژ های منیزیم پژوهش ها کم و غالباً مرتبط با دیگر آلیاژهای زمینه منیزیم است [۵-۸]. تغییرات مقدار سختی خط جوش اصطکاکی- اغتشاشی آلیاژ AM60، با تغییر پارامترهای سرعت دوران و سرعت چرخش مورد مطالعه قرار گرفته است، نتیجه پژوهش بر حصول بیشترین مقدار سختی، برای شرایطی که هر دو سرعت در کمترین مقدار خود بوده اند، دلالت داشته است [۹]. در بررسی انجام گرفته توسط لیو و همکاران [۱۰]، علت افت خواص مکانیکی خط جوش اصطکاکی- اغتشاشی آلیاژ AM60، وجود تغییر قابل توجه در بافت و ریز ساختار ناحیه جوش نسبت به ناحیه ترمومکانیکال (ناحیه متاثر از حرارت و تغییر شکل مجاور) و شکل گیری بافت های با شکل های خاص در ناحیه جوش گزارش شده است. بررسی وقوع تغییر شکل های غیریکنواخت در ناحیه جوش و صحت

متوسط اندازه دانه ۲۰ نانومتر استفاده شد همچنین برای انجام هر پاس اختلاط جوش اصطکاکی- اغتشاشی ماشین فرز مدل FP 4ME محصول شرکت ماشین سازی تبریز بکار گرفته شد. برای ۶ قطعه از قطعات، شیارهایی به منظور تعبیه پودر های تقویت کننده نانو آلومینا در درون آنها، ماشین کاری شد. شکل (۳-ب) موقعیت این شیار ها را در قطعات کار و شکل های (۳-ج) و (۳-د) به ترتیب ابزار کار و تجهیزات جوش FSW را نشان می دهند. پس از ایجاد شیار و فشرده سازی پودر های آلومینا در درون آنها، از ابزار بدون پین برای بستن شیارها استفاده شد. بر روی قطعات بدون شیار در شرایط بدون حضور ذرات تقویت کننده با تغییر تعداد پاس اختلاط ۱ تا ۳ پاس با سرعت های چرخش ۱۰۰۰ rpm، ۱۲۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm و با سرعت جابجایی ۲۵ mm/min انجام شد. برای قطعات شیاردار نیز عملیات جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی در شرایط حضور ذرات تقویت کننده مشابه قطعات بدون شیار انجام شد. زاویه ابزار کار با خط عمود ۳° و میزان فرورفتگی شانه ابزار کار در سطح قطعه ۰/۳ mm اعمال شد. به منظور انجام مطالعات ریزساختاری از سطح مقطع قطعات جوشکاری FSW شامل منطقه بهم خورده تغییر شکل پلاستیک یافته جوش (SZ)، منطقه متاثر از کارمکانیکی و حرارت (TMAZ) و منطقه متاثر از حرارت جوش (HAZ) و فلز اولیه (BM) بر اساس استاندارد ASTM E407 نمونه‌هایی برش داده شد. در شکل (۴) موقعیت این مناطق نشان داده شده استو پس از سنباده‌زنی تا سنباده ۳۰۰۰ و پولیش توسط خمیر الماسه با استفاده از محلول حکاکی^۱ با ترکیب شیمیایی حاوی ۱۰mL استیک اسید، ۶gr پیکریک اسید و ۱۰۰mL اتانول عملیات حکاکی انجام گرفت. تصاویر میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ نوری Leitz Metallux 3 تهیه و از نرم افزار MIP برای آنالیز تصاویر متالوگرافی در اندازه گیری اندازه دانه ها و اندازه ذرات تقویت کننده استفاده شد. برای سنجش اندازه دانه‌ها از روش مساحت سنجی^۲ استفاده شد. این عملیات بر طبق استاندارد ASTM E112 انجام شد. مطالعات ریزساختاری شامل تعیین اندازه و توزیع اندازه دانه ها و شناسایی ترکیب شیمیایی فازها از طریق آنالیز EDS انجام گرفت. نمونه‌های دارای نانوذرات تقویت کننده آلومینا پس از پوشش دهی با روکش طلا با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای ارزیابی ریزساختار و آنالیز شیمیایی نمونه های FSW تقویت شده با ذرات نانو آلومینا از میکروسکوپ الکترونی مدل-VEGA TESCAN- XMU مجهز به طیف سنج EDS و میکروسکوپ FE-SEM مدل MIRA3 TESCAN-XMU استفاده شد. اندازه گیری ریزسختی مقاطع جوشکاری FSW با ذرات تقویت کننده و نمونه های بدون ذرات تقویت کننده در سرعت های دوران مختلف بر مبنای استاندارد ASTM E384 با بار اعمالی ۲۰۰gf و زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه انجام شد. برای اندازه گیری سختی، از سختی سنج ویکرز ساخت MATSUZAWA مدل MXT70 استفاده شد. برای تعیین استحکام کششی اتصالات جوشکاری بر مبنای استاندارد ASTM E8، نمونه‌های آزمون کشش در

FSW را نشان می دهند. پس از ایجاد شیار و فشرده سازی پودر های آلومینا در درون آنها، از ابزار بدون پین برای بستن شیارها استفاده شد. بر روی قطعات بدون شیار در شرایط بدون حضور ذرات تقویت کننده با تغییر تعداد پاس اختلاط ۱ تا ۳ پاس با سرعت های چرخش ۱۰۰۰rpm، ۱۲۰۰rpm و ۱۴۰۰ rpm و با سرعت جابجایی ۲۵ mm/min انجام شد. برای قطعات شیاردار نیز عملیات جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی در شرایط حضور ذرات تقویت کننده مشابه قطعات بدون شیار انجام شد. زاویه ابزار کار با خط عمود ۳° و میزان فرورفتگی شانه ابزار کار در سطح قطعه ۰/۳ mm اعمال شد. به منظور انجام مطالعات ریزساختاری از سطح مقطع قطعات جوشکاری FSW شامل منطقه بهم خورده تغییر شکل پلاستیک یافته



شکل ۲- نمودار فازی Al-Mg [۹]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ AM60 مورد استفاده در

پژوهش [۱۲]

عنصر	Al	Mn	Fe	Mg
درصد وزنی	۴/۶-۶/۵	۰/۲۶-۰/۵۰	<۰/۰۰۴	Bal.

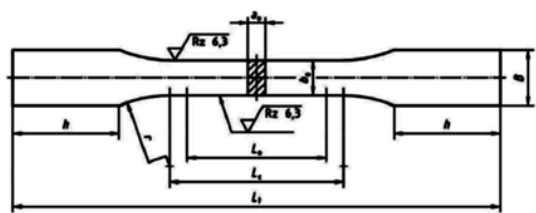
جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولاد گرم کار H13 که به

عنوان ابزار سنبه در این پژوهش استفاده شد [۱۳]

عنصر	C	Cr	Mn	Mo	Si	V	Fe
درصد وزنی	۰/۵۴	۵/۵	۰/۵	۱/۵	۱	۱/۲	Bal.

برای انجام عملیات جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی (FSW) در حضور ذرات تقویت کننده، از پودر نانوآلومینای شرکت Shenzhen Nanotech Port Co., Ltd. ساخت کشور چین با خلوص ۹۹٪ و با

جهت عرض جوش مطابق شکل (۵) توسط دستگاه وایرکات تهیه شدند. آزمون کشش تک محوره توسط دستگاه یونیورسال ۵۰ تن مدل AI-7000LA ساخت شرکت GoTech Testing Machines انجام و نمونه های مورد بررسی بر مبنای جدول (۳) نامگذاری شدند.



شکل ۵- شماتیک نمونه های جوشی برای آزمون کشش

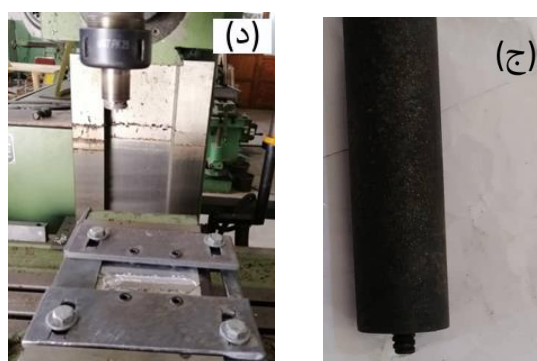
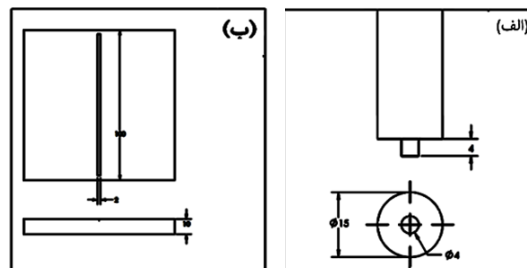
جدول ۳- مشخصات نمونه های جوشکاری شده در وضعیت با و بدون ذرات تقویت کننده آلومینا و چگونگی نامگذاری آنها

کد نامگذاری	تعداد پاس اختلاط	سرعت دوران ابزار کار (rpm)		
		تعداد پاس	سرعت دوران ابزار کار	
3P-1000	۳	۱۰۰۰	۱۰۰۰	در غیاب ذرات تقویت کننده
3P-1200	۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	
3P-1400	۳	۱۴۰۰	۱۴۰۰	
C-3P-1000	۳	۱۰۰۰	۱۰۰۰	در حضور ذرات تقویت کننده
C-3P-1200	۳	۱۲۰۰	۱۲۰۰	
C-3P-1400	۳	۱۴۰۰	۱۴۰۰	

نتایج و بحث

الف- نمونه های عاری از نانو ذرات تقویت کننده آلومینیومی جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی تک پاس روی نمونه های AM60 در شرایط عدم حضور ذرات تقویت کننده آلومینا در سرعت خطی ۲۵ mm/min و در سرعت های دوران ۱۰۰۰ rpm، ۱۲۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm انجام شد. شکل (۶) شکل ظاهری جوش های انجام شده را با افزایش سرعت دوران از ۱۰۰۰ rpm تا ۱۴۰۰ rpm نشان می دهد که به برقراری اتصال و سلامت ظاهری جوش های انجام شده در سرعت های دوران اشاره شده، دلالت دارد. با افزایش سرعت دوران ابزار، میزان کرنش اعمالی همچنین گرمای حاصل از اصطکاک ابزار با قطعه کار افزایش می یابد. افزایش کرنش باعث ریز شدن اندازه دانه ها و در مقابل افزایش دما بواسطه اصطکاک، می تواند باعث رشد دانه ها شود.

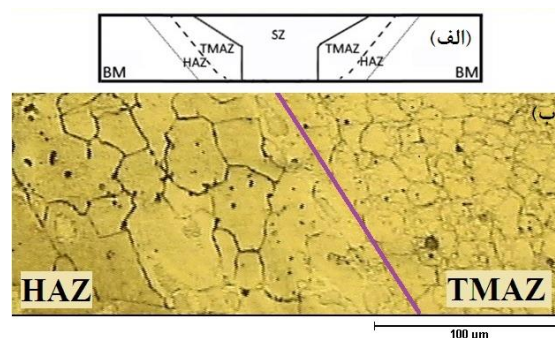
شکل (۷) تصاویر میکروسکوپ نوری فلز پایه در قبل از جوشکاری را در بزرگنمایی های مختلف نشان می دهد که با توجه به نموداری فازی شکل (۲) قابل تفسیر می باشد، در شکل (۷-الف)، فاز روشن تر (منطقه A)، فاز زمینه است که به واسطه انحلال پذیری کم آلومینیم در منیزیم، حاوی درصد آلومینیم پایین است. این فاز α -Mg یا منیزیم نام دارد. در شکل (۷-ب)، فاز تیره تر، که با حرف B مشخص شده است و نسبت به فاز زمینه درصد حجمی کمتری را دارد فاز یوتکتیک



شکل ۳- الف: شماتیک ابزار مورد استفاده در فرآیند FSW

ب: شماتیک قطعات کار در قبل از عملیات FSW ج:

تصویر ابزار مورد استفاده در فرآیند FSW د: تجهیزات جوش FSW شامل قطعات جوشکاری شده و ابزار کار



شکل ۴- الف: موقعیت شماتیک مناطق بهم خورده جوش

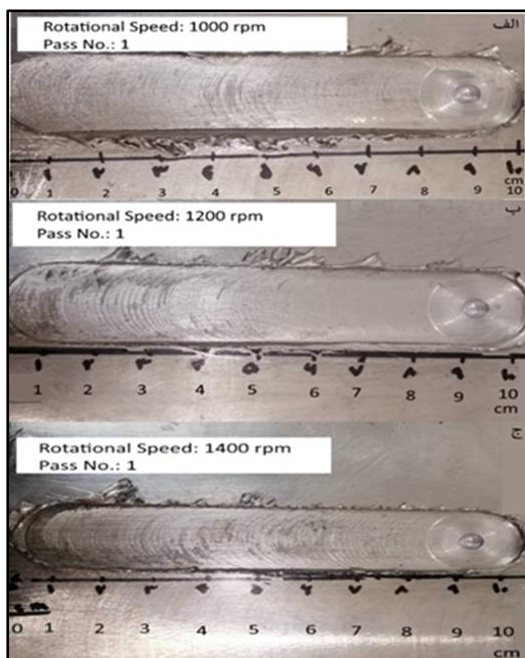
(SZ)، مناطق متاثر از کارمکانیکی و حرارت (TMAZ)،

مناطق متاثر از حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM) ب:.

موقعیت مناطق متاثر از کارمکانیکی و حرارت (TMAZ) در

کنار مناطق متاثر از حرارت (HAZ)

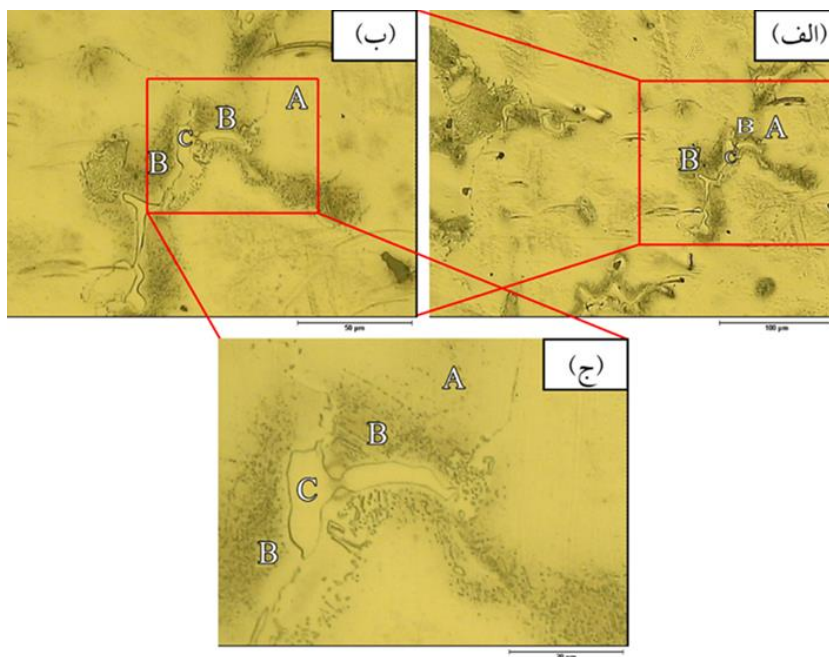
اصطکاک سطح ابزار با قطعه کار، دمای بیشتری ایجاد می شود [۱۷]. کرنش بیشتر، باعث تشکیل دانه‌های ریزتر و گرمای بیشتر باعث تشدید پدیده‌های بازیایی، تبلور مجدد و رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته می شود [۱۷] بنابراین بواسطه تقابل این دو عامل با یکدیگر، یک مقدار بهینه برای اندازه دانه به ازای یک سرعت دوران مشخص در این فرایند جوشکاری وجود دارد. در شکل (۹-ب) ریزساختاری با متوسط اندازه دانه ۶/۲ میکرون برای نمونه با سرعت دوران ۱۲۰۰ rpm مشاهده می شود.



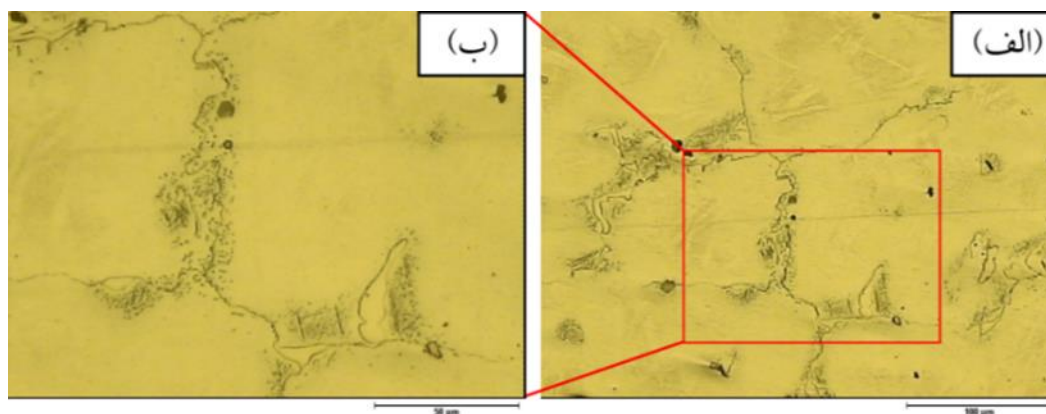
شکل ۶- تغییرات ایجاد شده در شکل ظاهری جوش اصطکاکی اغتشاشی با افزایش سرعت دوران: الف- ۱۰۰۰ rpm، ب- ۱۲۰۰ rpm و ج- ۱۴۰۰ rpm

است که بر طبق نمودار فازی مربوط در دمای ۴۳۷°C شکل می‌گیرد. در شکل (۷-ج)، در منطقه علامت گذاری شده با حرف B، طبیعت لایه‌ای مخلوط یوتکتیک در بزرگنمایی ۴۵۰۰ مشخص شده است همچنین در منطقه C حضور رسوبات ثانویه که می‌تواند فاز γ با ترکیب شیمیایی $Mg_{17}Al_{12}$ باشد، قابل مشاهده است. حضور سه ترکیب اشاره شده در بالا در AM60 در پژوهشی دیگر نیز گزارش شده است [۱۵]. شکل (۸) ریزساختار منطقه HAZ را در نمونه 3P-1200 بر اساس نامگذاری جدول (۳) و شکل (۸-ب) تصویر منطقه مشخص شده از شکل (۸-الف) را در بزرگنمایی بیشتر نشان می‌دهد. مقایسه شک های (۷) و (۸) مشخص می‌سازد که در اثر انجام عملیات جوشکاری در منطقه HAZ تغییرات جزئی در ریزساختار ایجاد می‌شود. با توجه به نمودار فازی Al-Mg، در هنگام جوشکاری در اثر گرمای ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعه کار، رسوب‌های بین فلزی فاز ثانویه γ در زمینه حل می‌شود و زمینه به فاز فوق اشباع از آلومینیم تبدیل می‌شود [۱۶]. قسمتی از آلومینیم حل شده در زمینه از فاز یوتکتیک تأمین می‌شود لذا پس از عملیات جوشکاری درصد حجمی فاز های γ و یوتکتیک کاهش می‌یابد [۱۶].

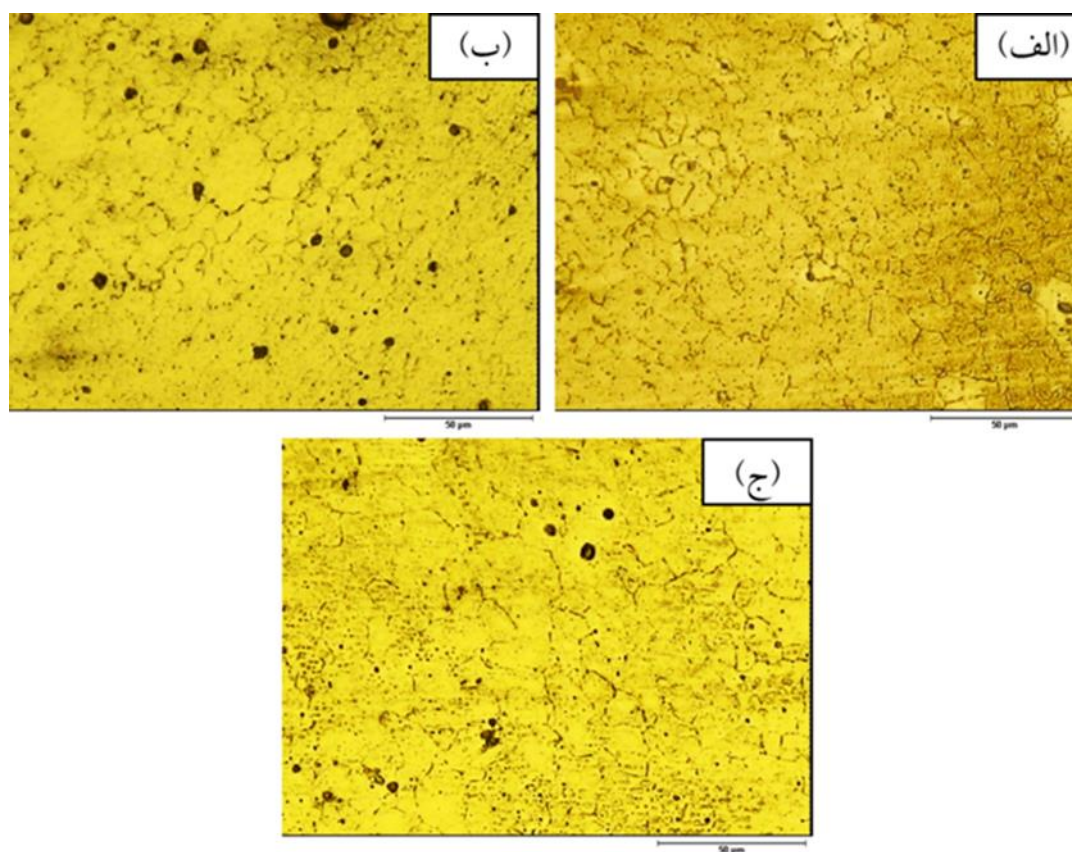
شکل (۹) تصاویر میکروسکوپ نوری منطقه SZ نمونه‌های پس از جوشکاری FSW با ۳ پاس اختلاف در سرعت‌های دوران ۱۰۰۰ rpm تا ۱۴۰۰ rpm را نشان می‌دهد. اندازه دانه‌ها در سرعت دوران ۱۲۰۰ rpm (شکل ۹-ب) نسبت به نمونه‌های مرتبط با سرعت‌های دوران ۱۰۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm (به ترتیب در شکل های ۹-الف) و (۹-ج) کمتر است. میانگین اندازه قطر دانه‌ها برای نمونه‌ها در منطقه SZ در سرعت‌های دوران ۱۰۰۰ rpm، ۱۲۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm به ترتیب برابر با ۷/۴، ۶/۲ و ۱۰/۲ میکرون به دست آمد. با افزایش سرعت دوران ابزار در منطقه بهم خورده جوش در فرآیند FSW، علاوه بر کرنش اعمالی، به علت افزایش گرمای تولیدی ناشی از



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ نوری از فلز زمینه در قبل از جوشکاری در بزرگنمایی: (الف) ۸۰۰، (ب) ۱۶۰۰ و (ج) ۴۵۰۰



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ نوری از منطقه HAZ برای نمونه 3P-1200 در بزرگنمایی (الف) ۸۰۰، (ب) ۱۶۰۰. (مشخصات نامگذاری نمونه ها در جدول (۳) آمده است.)



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ نوری از منطقه SZ نمونه های جوشکاری شده در سرعت های دوران: (الف) ۱۰۰۰ rpm، (ب) ۱۲۰۰ rpm و (ج) ۱۴۰۰ rpm پس از ۳ پاس اختلاط

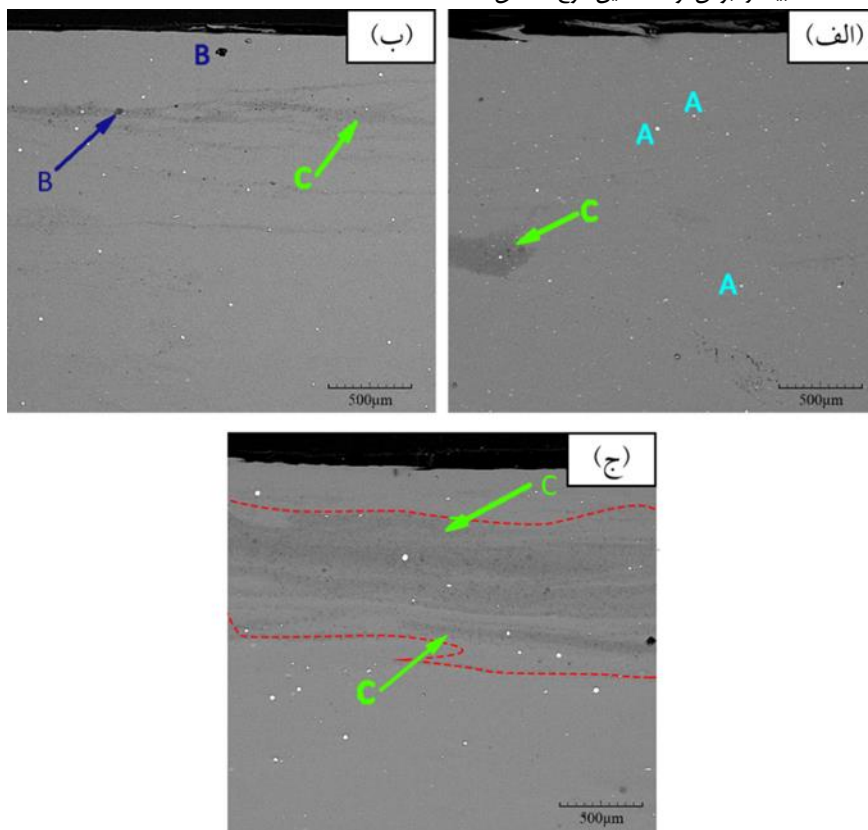
نامگذاری نمونه ها در جدول (۳) آمده است. سرعت دوران کم باعث تولید گرمای کمتر می شود. علاوه بر این، نانوذرات تقویت کننده بدلیل مساحت سطحی زیاد، از انرژی آزاد سطحی زیادی برخوردار بوده و در نتیجه تمایل زیاد به حل شدن در زمینه دارند شکل (۱۰- الف) نحوه توزیع ذرات رسوبی نشان داده شده با حرف A را نیز نشان می دهد که با توجه به نمودار فازی Al-Mn موجود در شکل (۱۱) [۱۸] و بر مبنای پژوهش های پیشین از نوع رسوبات بین فلزی آلومینیم-منگنز هستند

ب- نمونه های حاوی نانو ذرات تقویت کننده آلومینیا

شکل (۱۰) تصاویر FE-SEM نمونه های حاوی نانو ذرات تقویت کننده آلومینیا با متوسط اندازه دانه ۲ میکرون در سرعت های دوران ابزار برابر با ۱۰۰۰ rpm، ۱۲۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm را نشان می دهد. شکل (۱۰- الف) تصویر FE-SEM مربوط به نمونه تقویت شده در سرعت دوران ۱۰۰۰ rpm و ۳ پاس اختلاط (C-3P-1000) است. مشخصات

گرمای بیشتر تولید شده در طی فرآیند جوشکاری است. در بررسی های میکروسکوپی، با توجه به بیشتر بودن جرم اتمی آلومینیم، تصاویر مناطق و فازهای با محتوای آلومینیم بیشتر، روشن تر و با محتوای آلومینیوم کمتر، تیره دیده می شوند. در نتیجه، رسوب های سفید رنگ مشاهده شده در شکل (۱۰-ب) مرتبط به ذرات رسوب بین فلزی آلومینیم-منگنز هستند [۲۱]. علت شکل گیری این رسوبها را می توان به گرمای بیشتر به واسطه اصطکاک بین ابزار با قطعه کار در سرعت دوران بالاتر، نفوذ آلومینیم از فاز زمینه به نزدیک این مناطق و در نهایت ترکیب شدن آلومینیم و منگنز و رشد آنها نسبت داد [۲۱]. شکل (۱۰-ج) تصویر نمونه ایجاد شده در سرعت دوران ابزار کار ۱۴۰۰ rpm را نشان می دهد. در این شکل شکل گیری مناطق تیره با وسعت بیشتر و شکل گیری رسوبات درشت تر ناشی از افزایش سرعت دوران ابزار کار، رخداد گرمای بیشتر در منطقه SZ، نفوذ و تجمع بیشتر آلومینیم در مناطق اطراف و در نتیجه شکل گیری رسوب های بین فلزی سفید رنگ در آن مناطق است.

[۱۹]. باتوجه به تمایل زیاد ذرات ریز آلومینا به انحلال در زمینه، مقداری از این ذرات در زمینه حل شده و در ادامه باعث شکل گیری رسوبات بین فلزی و شکل گیری مناطق روشن در زمینه شده است. در این شکل مناطق تیره رنگی نیز مشاهده می شود که با حرف C مشخص شده است. در این مناطق، میانگین جرم اتمی کمتر و به عبارت دیگر محتوای آلومینیم موجود در زمینه کمتر است [۲۰]. شکل (۱۰-ب) تصویر نمونه تقویت شده با نانو ذرات Al_2O_3 در سرعت دوران ابزار کار ۱۲۰۰ rpm (C-3P-1200) را نشان می دهد. در این حالت، بدلیل سرعت دوران بالاتر، بواسطه اصطکاک گرمای بیشتری تولید می شود در نتیجه احتمال رخداد پدیده آنبیل بیشتر است. در محل های تیره مانند نقطه B حفره هایی شکل گرفته که ناشی از پر نشدن کامل آن نقاط در طی تغییر شکل پلاستیک در منطقه SZ است. مناطق نواری تیره رنگ در واقع مناطق زمینه منیزیم با مقادیر کمتر آلومینیم هستند که در شکل (۱۰-الف) نیز به صورت محدود دیده می شوند. برای نمونه C-3P-1200 (نامگذاری نمونه بر اساس جدول ۳) وسعت این نوع مناطق بیشتر است. علت بیشتر بودن وسعت این نوع مناطق،



شکل ۱۰- تصاویر FE-SEM در بزرگنمایی ۲۰۰ از نمونه های تقویت شده با نانو ذرات آلومینا پس از ۳ پاس اختلاط. نمونه ها در سرعت دوران: (الف) ۱۰۰۰ rpm، (ب) ۱۲۰۰ rpm و (ج) ۱۴۰۰ rpm تولید شده است

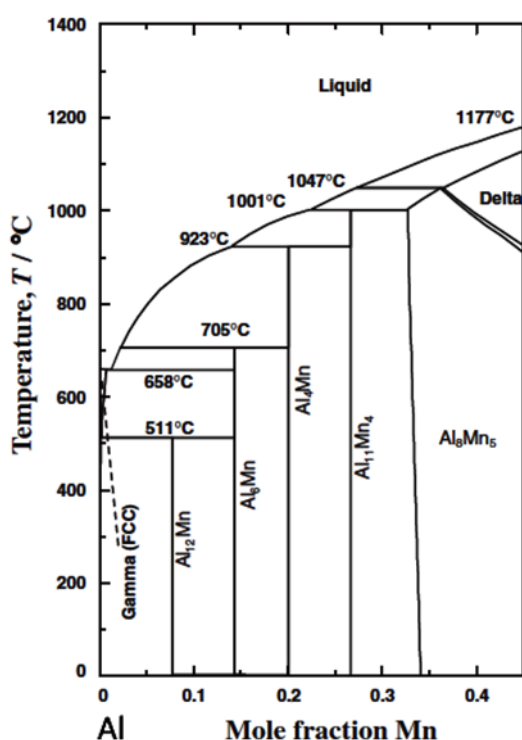
آلومینیم و مناطق تیره مناطق فقیر از آلومینیوم هستند. در مناطق روشن تر محتوای عناصر سنگین تر (آلومینیم) بیشتر است. شکل (۱۲-ب) و شکل (۱۲-ج) تصاویر نمونه های تقویت شده را در سرعت های دوران ابزار کار ۱۰۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm نشان می دهند. برای بررسی نحوه توزیع ذرات آلومینا در زمینه منیزیم، از نواحی روشن

شکل (۱۲) تصاویر FE-SEM نمونه های تقویت شده با نانو ذرات آلومینا در سرعت های دوران ابزار برابر با ۱۰۰۰ rpm، ۱۲۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm در بزرگنمایی ۱۰ هزار را نشان می دهد. شکل (۱۲-الف) تصویر نمونه C-3p-1000 (نامگذاری نمونه ها در جدول ۳) آمده است) شکل (۱۰) است که در آن قسمت های تیره با خط چین از قسمتهای روشن تر جدا شده اند. مناطق روشن تر مناطق غنی از

علامت گذاری شده با حرف P آنالیز EDS انجام گرفت. شکل (۱۳) طیف EDS این نواحی

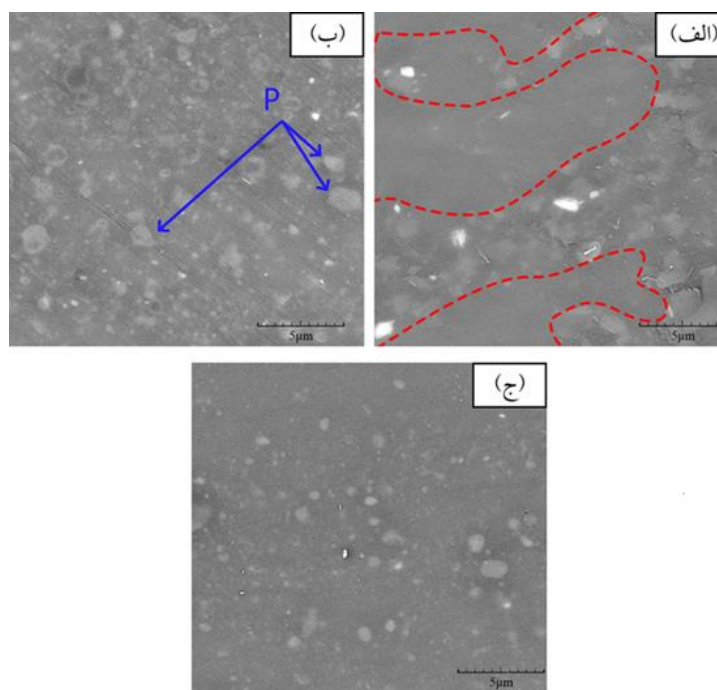
نسبتا روشن را نشان می دهد که به حضور آلومینیم و اکسیژن در آن ناحیه دلالت دارد. بنابراین ذرات نشان داده شده همان ذرات تقویت کننده آلومینا هستند که در زمینه منیزیمی پخش شده اند. با توجه به این یافته نحوه توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه نشان داده شده در شکل (۱۲) مشخص می گردد که به توزیع تقریبا یکسان این ذرات در زمینه دلالت دارد. درصد اتمی و وزنی هریک از عناصر آلومینیم و اکسیژن در جدول (۴) آورده شده است.

شکل (۱۴) تصاویر نمونه های FE-SEM نمونه های تقویت شده با ذرات آلومینایی را در دو سرعت دوران ۱۰۰۰ rpm و ۱۲۰۰ rpm نشان می دهد. در سرعت دوران ۱۲۰۰ rpm اندازه دانه ها ریزتر است. اندازه گیری میانگین اندازه دانه توسط نرم افزار MIP نشان داد که میانگین اندازه دانه ها در سرعت های دوران ۱۰۰۰ rpm، ۱۲۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm به ترتیب ۴/۲، ۳/۱ و ۵/۵ میکرون است که کاهش اندازه دانه با افزایش سرعت دوران تا ۱۲۰۰ rpm را تایید کرد. بر اساس اندازه گیری، متوسط اندازه دانه از ۴/۲ میکرون در سرعت دوران ۱۰۰۰ rpm به ۳/۱ میکرون در سرعت دوران ۱۲۰۰ rpm کاهش یافت. در حضور نانو ذرات تقویت کننده آلومینا، دو عامل اصلی می تواند باعث ریز شدن اندازه دانه ها شود. عامل اول، قفل شدن نابجایی ها توسط نانو ذرات آلومینا و در نتیجه شکل گیری مرزهای فرعی پس از رسیدن دانسیته نابجایی ها به یک حد بحرانی است. روشن است در یک سرعت دوران مشخص، بدلیل دوران ابزار کار در تماس با سطح قطعه کار، تنش لازم برای افزایش دانسیته نابجایی ها وجود دارد. عامل دوم نقش ذرات

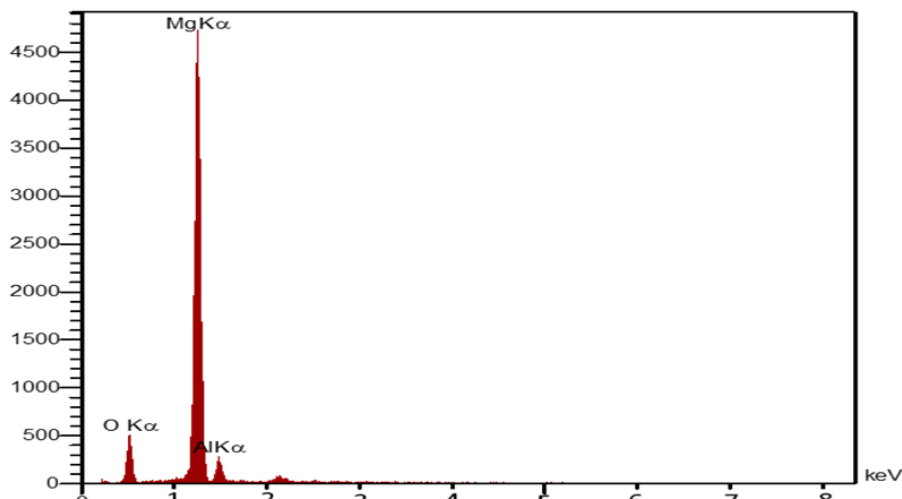


شکل ۱۱- نمودار فازی Al-Mn [۱۸]

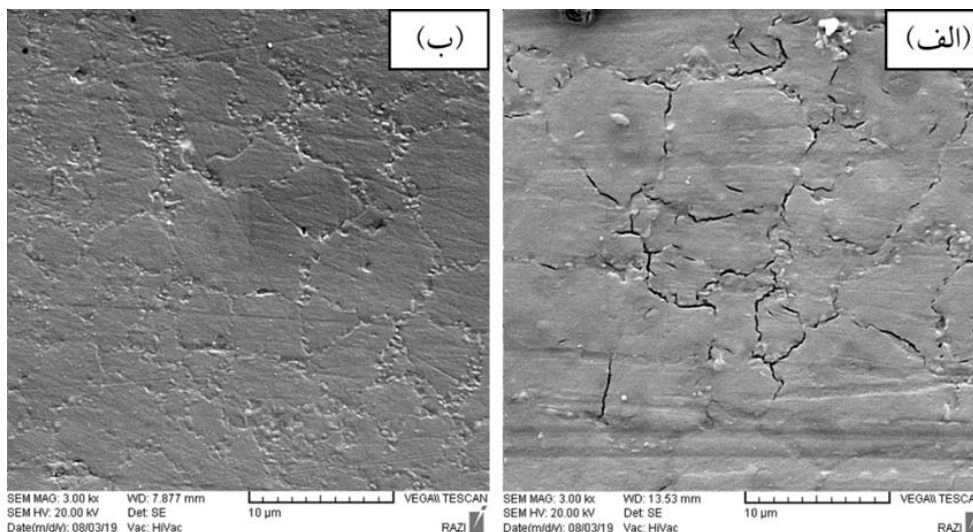
تقویت کننده در ممانعت از رشد دانه ها و عدم تحرک مرز دانه ها و از آن جمله مرزهای فرعی در حضور نانو ذرات تقویت کننده در مرزها است [۲۲].



شکل ۱۲- تصاویر FE-SEM در بزرگنمایی ۱۰ هزار از نمونه های حاوی نانو ذرات تقویت کننده آلومینا پس از ۳ پاس اختلاط نمونه ها در سرعت دوران ابزار: (الف) ۱۰۰۰ rpm، (ب) ۱۲۰۰ rpm و (ج) ۱۴۰۰ rpm تولید شده است



شکل ۱۳- طیف EDS تهیه شده از ناحیه روشن نشان داده شده با حرف P در شکل ۱۲



شکل ۱۴- تصاویر FE-SEM نمونه‌های تقویت شده با نانو ذرات آلومینا در تعداد پاس اختلاط ۳ و در سرعت دوران: (الف) ۱۰۰۰ rpm و (ب) ۱۲۰۰ rpm

جدول ۴- درصد اتمی عناصر شناسایی شده از ناحیه روشن نشان داده شده با حرف P در شکل ۱۲.

عنصر	A%
O	۴۸/۲۸
Mg	۳۷/۴۳
Al	۱۴/۲۹

مقدار است و علت آن وقوع پدیده تبلور مجدد و ریز شدن اندازه دانه‌ها است و جدول (۵) تغییرات (افزایش) عدد سختی در این ناحیه را برای نمونه‌های حاوی و عاری از ذرات تقویت کننده در سرعت های دوران ۱۰۰۰ rpm، ۱۲۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm ارائه می دهد. همانطور که از شکل (۱۵) و جدول (۵) دریافت می شود در ناحیه SZ، در حضور نانو ذرات تقویت کننده آلومینا نسبت به نمونه های بدون نانو ذرات تقویت کننده، میانگین مقدار سختی بیشتر است. دو دلیل اصلی را می توان برای این مورد بیان نمود. دلیل اول می تواند ناشی از جلوگیری رسوبها از فرورفتن فرورونده در ماده باشد. در تایید این مطلب بهبود سختی آلیاژ AZ91 در اثر حضور ذرات سرامیکی توسط دیگر محققان گزارش شده است [۸]. دلیل دیگر نقش ذرات تقویت کننده در کاهش اندازه دانه ها و در ممانعت از حرکت مرز دانه ها در نمونه‌های حاوی ذرات تقویت کننده است که در شکل (۱۴) نیز کاهش اندازه دانه ها قابل مشاهده و نقش ذرات تقویت کننده در کاهش اندازه دانه توسط دیگر

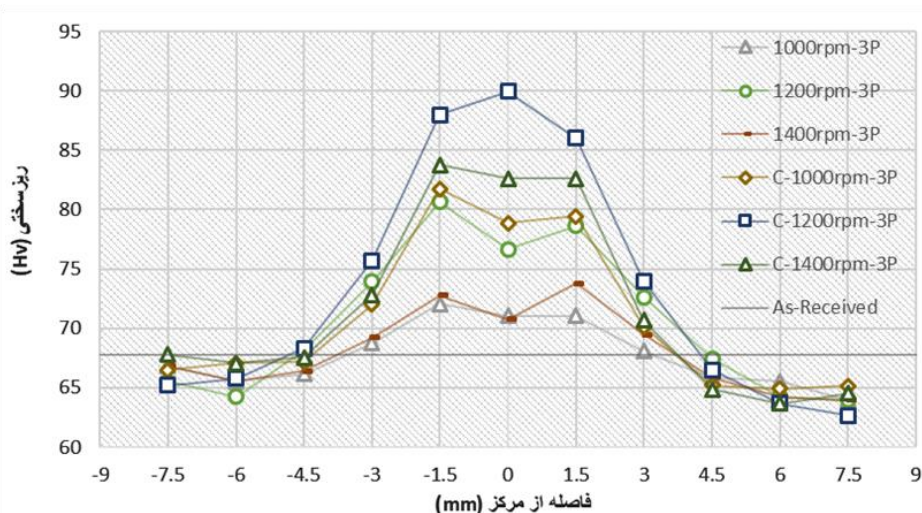
شکل (۱۵) نتایج اندازه گیری ریزسختی نواحی مختلف جوش در غیاب و در حضور نانو ذرات تقویت کننده آلومینا به همراه نتایج ریز سختی نمونه در قبل از جوشکاری را نشان می دهد. ناحیه منفی منحنی سمت پیشرو و ناحیه مثبت منحنی، سمت پسرو قطعات جوش داده شده را دلالت می کند. با توجه به شکل مقدار سختی در مناطق HAZ از مقدار سختی زمینه کمتر است که این مورد بدلیل رشد دانه‌ها در اثر گرمای فرآیند در مناطق HAZ است. عدد سختی در ناحیه میانی SZ بیشترین

ذرات تقویت کننده استحکام نهایی کششی پهنه در سرعت دوران rpm ۱۲۰۰ بدست آمده است. همچنین مقایسه نتایج نمونه‌های حاوی و عاری از ذرات تقویت کننده نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی ذرات تقویت کننده بدلیل ریز شدن اندازه دانه‌ها و همچنین قفل شدن مرز دانه‌ها توسط نانو ذرات آلومینا و عدم تحرک آن‌ها استحکام بیشتری دارند. شکل (۱۶) تغییرات استحکام نهایی کششی نمونه‌های حاوی نانو ذرات تقویت کننده را در سرعت‌های دوران ابزار rpm ۱۰۰۰، ۱۲۰۰ و rpm ۱۴۰۰ و در تعداد پاس اختلاط ۳ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که استحکام نهایی کششی نمونه جوش تولیدی در سرعت دوران rpm ۱۲۰۰ بیش از ۹۵٪ استحکام نهایی کششی نمونه خام اولیه است و حال اینکه این نسبت برای نمونه‌های در سرعت دوران rpm ۱۰۰۰ و rpm ۱۴۰۰ به ترتیب ۸۸٪ و ۸۶٪ است.

پژوهشگران نیز گزارش شده است [۲۰]. بر مبنای استدلال تقابل دو پارامتر کرنش و گرما که در قسمت تاثیر سرعت دوران در اندازه دانه در ناحیه SZ ارائه شد، بیشترین مقدار سختی در دو حالت بدون ذرات تقویت کننده و با ذرات تقویت کننده در سرعت دوران rpm ۱۲۰۰ بدست آمد. بنابراین تاثیر سرعت دوران و نقش آن در اندازه دانه‌ها و در مقدار سختی برای نمونه‌های جوشکاری شده قابل توجه است.

استحکام نهایی کششی

جدول (۶) تغییرات استحکام نهایی کششی نمونه‌های جوشکاری شده را در سرعت‌های دوران ابزار rpm ۱۰۰۰، rpm ۱۲۰۰ و rpm ۱۴۰۰ در تعداد پاس اختلاط در دو حالت با و بدون ذرات تقویت کننده ارائه کرده است. همانطور که مشاهده می‌شود بر مبنای استدلال تقابل دو پارامتر کرنش و گرما که در قسمت تاثیر سرعت دوران در اندازه دانه در ناحیه SZ ارائه شد، در هر دو حالت با ذرات تقویت کننده و بدون



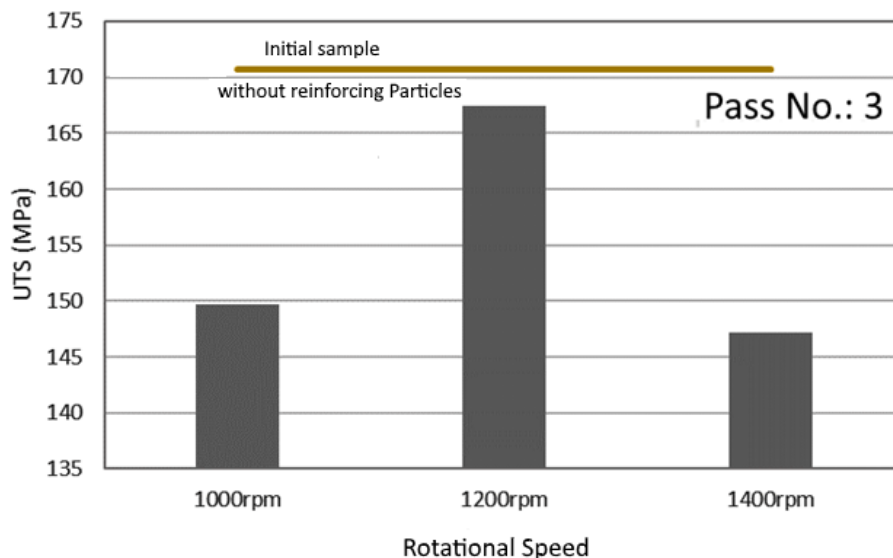
شکل ۱۵- پروفیل تغییرات سختی مقاطع جوش FSW شده برای نمونه‌های حاوی و عاری از نانو ذرات تقویت کننده آلومینا در سرعت‌های دوران مختلف ابزار کار

جدول ۵- تغییرات ریز سختی نمونه‌های جوشکاری شده در دو حالت با ذرات تقویت کننده آلومینا و بدون ذرات تقویت کننده آلومینا

تغییرات (افزایش) ریز سختی نسبت به ریز سختی نمونه خام اولیه (%)	ریز سختی نسبت به ریز سختی نمونه خام اولیه (%)	تعداد پاس اختلاط	ریز سختی (HV)	شرایط نمونه	
۰	۱۰۰	-	۶۸	خام اولیه	
۱۶/۲	۱۱۶/۲	۳	۷۹	۱۰۰۰	بدون ذرات تقویت کننده
۳۲/۴	۱۳۲/۴		۹۰	۱۲۰۰	
۲۱/۳	۱۲۱/۳		۸۲/۵	۱۴۰۰	
۴/۴	۱۰۴/۴	۳	۷۱	۱۰۰۰	با ذرات تقویت کننده
۱۲/۵	۱۱۲/۵		۷۶/۵	۱۲۰۰	
۳/۷	۱۰۳/۷		۷۰/۵	۱۴۰۰	

جدول ۶- تغییرات استحکام نهایی کششی نمونه های جوشکاری شده در دو حالت با ذرات تقویت کننده آلومینا و بدون ذرات تقویت کننده آلومینا

تغییرات (کاهش) استحکام نهایی کششی نمونه های جوشکاری شده نسبت به استحکام نهایی کششی نمونه خام اولیه (%)	استحکام نهایی کششی نسبت به استحکام نهایی کششی نمونه خام اولیه (%)	تعداد پاس اختلاط	استحکام نهایی کششی (MPa)	شرایط نمونه	
۰	۱۰۰	-	۱۷۰/۷	خام اولیه	
۲۵	۷۵	۳	۱۲۸/۳	۱۰۰۰	بدون ذرات تقویت کننده
۱۲	۸۸		۱۴۹/۵	۱۲۰۰	
۲۱	۷۹		۱۳۵/۴	۱۴۰۰	
۱۲	۸۸	۳	۱۴۹/۷	۱۰۰۰	با ذرات تقویت کننده
۲	۹۸		۱۶۷/۴	۱۲۰۰	
۱۴	۸۶		۱۵۷/۴	۱۴۰۰	



شکل ۱۶- تغییرات استحکام نهایی نمونه های حاوی نانو ذرات تقویت کننده آلومینا با افزایش سرعت دوران پس از ۳ پاس اختلاط جوش

نتیجه گیری

عنوان سرعت دوران بهینه برای سختی در ناحیه SZ جوش و برای استحکام نهایی کششی جوش پذیرفته شد. در حضور ذرات تقویت کننده دو عامل باعث ریزدانی می شود. یکی قفل شدن نابیجایی ها در پشت ذرات تقویت کننده و شکل گیری مرزها و دانه های فرعی پس از رسیدن دانسیته نابیجایی ها به یک حد بحرانی است و دیگری نقش ذرات تقویت کننده در ممانعت از رشد دانه ها و عدم تحرک مرز دانه ها و از آن جمله مرزهای فرعی است.

۲- در شرایط حضور ذرات تقویت کننده نانو آلومینیومی در زمینه، با افزایش سرعت دوران ابزار کار به علت اعمال تنش های برشی شدید

۱- در فرآیند FSW با افزایش سرعت دوران کرنش و گرمای حاصل از اصطکاک افزایش می یابد که افزایش کرنش باعث ریزدانی و افزایش دما باعث رفتار متضاد رشد دانه ها می شود. در حالت بدون ذرات تقویت کننده، قطر متوسط دانه ها در منطقه SZ در سرعت های دوران ۱۰۰۰ rpm، ۱۲۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm به ترتیب ۷/۴، ۶/۲ و ۱۰/۲ میکرون و در شرایط حضور ذرات تقویت کننده متوسط اندازه دانه ها در سرعت های دوران ۱۰۰۰ rpm، ۱۲۰۰ rpm و ۱۴۰۰ rpm به ترتیب ۴/۲، ۳/۱ و ۵/۵ میکرون کاهش یافت. سرعت دوران ۱۲۰۰ rpm به اندازه ذرات تقویت کننده آگلومره شده کوچکتر شده واز طرفی با افزایش دما شرایط به منظور نفوذ اتمی و شکل گیری ترکیبات بین فلزی آلومینیومی در کنار مناطق با محتوای کم آلومینیوم فراهم می شود.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از پایان نامه کارشناسی ارشد یکی از دانشجویان و در راستای برنامه جامع تحقیقاتی نویسنده مسئول مقاله است. نویسندگان

مشارکت نویسندگان

مقاله حاضر بخشی از نتایج پایان نامه دانشجوی کارشناسی ارشد آرش بهزادی است. نویسنده مسئول از اساتید راهنما و سایر نویسندگان از اعضای کمیته پایان نامه بوده که در انجام پژوهش و نگارش مقاله، تمام نویسندگان به صورت موثر مشارکت داشته اند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام نموده اند که مقاله حاضر عاری از هرگونه تعارض منافع است.

References:

[1]Kulekci, M. K, Magnesium and its alloys applications in automotive industry, Int J Adv Manuf Technol, 2008: 39:851-865, [DOI:10.1007/s00170-007-1279-2]

[2]Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R. and Withers, P. J.; Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews, 2009:54 (2): 49-93. , [DOI: https://doi.org/10.1179/174328009X411136]

[3] Mardalizadeh M., Safarkhanian M.A., Solaymani M. R. (2019), Influence of Friction Stir Welding Parameters on Mechanical and Metallurgical Properties in Lap Joints of 5456Aluminum Alloy, Journal of New Materials, Vol. 10, No. 36, pp. 141-156 [In Persian, 1398]. https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=729089.

[4]Chai F., Zhang D.T., Li Y.Y.. Effect of rotation speeds on microstructures and tensile properties of submerged friction stir processed AZ31 magnesium alloy. Materials Research Innovations 2014;18(sup4) 152-156. [DOI: https://doi.org/10.1179/1432891714Z.00000000673]

[5]L. Ceschini, I. Boromei, G. Minak, A. Morri, F. Tarterini, Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10 vol.%Al2O3p

مقاله از حمایت های مالی و معنوی دانشگاه یاسوج برای انجام پایان نامه مذکور و این پژوهش سپاسگزاری می کنند.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در این پژوهش، همکاری مشارکت کنندگان داوطلبانه و با رضایت ایشان بوده است.

حامی مالی

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه یاسوج برای حمایت مالی از این پروژه سپاسگزاری می نمایند.

composite, Compos. Sci. Technol.,2007: 67(3-4): 605-615. [DOI: https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.07.029]

[6]X.G. Chen, M.D. Silva, P. Gougeon, L.S. Georges, Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6063-B4C metal matrix composites, Mater. Sci. Eng. A,2009: 518 (1-2): 174-184, [DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.04.052]

[7]S. Gopalakrishnan, N. Murugan, Prediction of the tensile strength of friction stir welded aluminium matrix TiCp particulate reinforced composite, Mater. Des.,2011: 32(1):462-467, [DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.055]

[8]W. Lee, C.Y. Lee, M.K. Kim, J.I. Yoon, Y. Kim, S.B. Jung, Microstructures and wear property of friction stir welded AZ91 Mg/SiC particle reinforced composite, Compo Sci. Technol.2006: 66 (11-12): 1513-1520, [DOI: https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.11.023]

[9]S. Richmire, K. Hall, M. Haghshenas, Design of experiment study on hardness variations in friction stir welding of AM60 Mg alloy, Journal of Magnesium and Alloys,2018: 6 (3): 215-228, [DOI: https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.07.00]

- [10] Liu D, Tang Y, Shen M, Hu Y and Zhao L, Analysis of Weak Zones in Friction Stir Welded Magnesium Alloys from the Viewpoint of Local Texture: A Short Review, *Metals*, 2018; 970 (8):1-16. [DOI:10.3390/met8110970]
- [11] Ren W, Xin R, Tan C, Liu D, Texture Related Inhomogeneous Deformation and Fracture Localization in Friction-Stir-Welded Magnesium Alloys: A Review, *Frontiers in Materials*, 2020; 6 (339):1-10. [DOI: 10.3389/fmats.2019.00339]
- [12] P. Bassani¹, E. Gariboldi, A. Tuissi, Calorimetric analysis of AM60 magnesium alloy, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2005; 80 (3):739–747 [DOI: 10.1007/s10973-005-0723-5]
- [13] U. F. Al-Qawabeha,, Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties, Microhardness, and Impact Energy of H13 Alloy Steel, *International Journal of Scientific & Engineering Research* ,2017;8(2): 100-104. <https://www.ijser.org/researchpaper/Effect-of-Heat-Treatment-on-the-Mechanical-Properties-Microhardness-and-Impact-Energy-of-H13-Alloy-Steel.pdf>.
- [14] Azizieh M., Mazaheri M., Balak Z., Kafashan H. and Kim H. S.. Fabrication of Mg/Al12Mg17 in-situ surface nanocomposite via friction stir processing. *Materials Science and Engineering*, 2018: A (712): 655-662. [DOI:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.030>]
- [15] Yin Y., Ikuta A., North T., Microstructural features and mechanical properties of AM60 and AZ31 friction stir spot welds. *Materials & Design* 2010;31(10):4764–4776. [doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.005>]
- [16] Feng A., Ma Z., Enhanced mechanical properties of Mg–Al–Zn cast alloy via friction stir processing. *Scripta Materialia* 2007;56(5):397–400. [doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.10.035>]
- [17] Richmire S, Sharifi P, Haghshenas M. On microstructure, hardness, and fatigue properties of friction stir-welded AM60 cast magnesium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018;98(5-8): 2157-2172. [doi:10.1007/s00170-018-2375-1]
- [18] Asgar-Khan M. and Medraj M., Thermodynamic description of the Mg-Mn, Al-Mn and Mg-Al-Mn systems using the modified quasichemical model for the liquid phases, *Materials Transactions*, 2009: 50(5): 1113-1122 [doi:10.2320/matertrans.MRA2008484]
- [19] Hasani B.M., Hedaiatmofidi H., Zarebidaki A. Effect of friction stir process on the microstructure and corrosion behavior of AZ91 Mg alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 2021;267:124672. [doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124672>]
- [20] Mironov S, Motohashi Y, Ito T, Goloborodko A, Funami K, Kaibyshev R. Feasibility of friction stir welding for joining and microstructure refinement in a ZK60 magnesium alloy. *Materials Transactions*, 2007: 48 (12): 3140-3148. [doi:10.2320/matertrans.MRA2007177]
- [21] Gao Y., Morisada Y., Fujii H., Liao J., Dissimilar friction stir lap welding of magnesium to aluminum using plasma electrolytic oxidation interlayer. *Materials Science and Engineering: A*, 2018;711(10):109–118. [doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.034>]
- [22] Mertens A., Simar A., Adrien J., Maire E., Montrieux H.-M., Delannay F., et al. Influence of fibre distribution and grain size on the

mechanical behaviour of friction stir processed Mg-C composites. *Materials Characterization* 2015;107:125-133. [doi: 10.1016/j.matchar.2015.07.010]

[23] Abdollahi S.H., Karimzadeh F., Enayati M.H., Development of surface composite based on Mg-Al-Ni system on AZ31 magnesium alloy and evaluation of formation mechanism. *Journal of Alloys and Compounds* 2015;623:335-341.

