



Modification of Mechanical Properties of Al6061 Aluminum Alloy Joint Formed Using Friction Stir Welding by Increasing the Cooling Rate and Application of Vibration

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Yahya Abadi S.¹ MSc,
Abbasi M.*¹ PhD

How to cite this article

Yahya Abadi S, Abbasi M. Modification of Mechanical Properties of Al6061 Aluminum Alloy Joint Formed Using Friction Stir Welding by Increasing the Cooling Rate and Application of Vibration. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(6):1551-1558.

ABSTRACT

Al6061 alloy is widely used in the industry; so, its welding with reliable methods is of great importance. In the fusion welding of these alloys, imperfections such as cracks, cavities, and segregations of alloy element may occur that necessitates the application of solid state welding processes such as friction stir welding method. In spite of the many advantages of the friction stir welding, several attempts have been made to improve the properties of the resulting joints. In this study, the effect of increasing the cooling rate and the effect of vibration during the process on the microstructure and mechanical properties of Al6061 welds are investigated. Also, the simultaneous effect of water circulating and vibration on the mechanical properties of the joints is evaluated. The results showed that vibration due to increasing the strain and water circulating due to increasing the cooling rate reduced the grains size in the stir zone. Investigations revealed that cooling rate increment decreased the dissolution of Mg₂Si precipitates significantly. The results of the tensile test showed that the strength of the joints increased due to the grain refinement as vibration was applied or when cooling rate increased. Also, when the vibration and coolant were applied simultaneously, the strength increased dramatically due to significant grain refinement and presence of Mg₂Si precipitates. On the other hand, with grain refinement, the volume fraction of grain boundaries increases and, thus, the growth of the cracks decreases and correspondingly elongation enhances.

Keywords Friction Stir Welding; Vibration; Cooling; Mechanical Properties; Al6061 Aluminum Alloy

¹Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

*Correspondence

Address: Qotb-e Ravandi Bulevard, 6 kilometer to Kashan, Iran. Postal code: 8731751167

Phone: -

Fax: -

m.abbasi@kashanu.ac.ir

Article History

Received: May 25, 2018

Accepted: December 28, 2018

ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Corrosion behavior of Al6061 alloy weldment produced by friction stir ... [2] Studies on friction stir welding of AA 2024 and ... [3] The effect of SiC particle addition during FSW ... [4] Developing friction stir welding window for ... [5] Solid mechanics-based Eulerian ... [6] Hybrid approaches of assisted heating and cooling for ... [7] Application of electric current in friction stir ... [8] Analysis and comparison of friction stir welding ... [9] Study of ultrasonic vibrations' effect on friction ... [10] Friction stir vibration welding process ... [11] Enhancement of mechanical properties and corrosion ... [12] Influence of in-process cooling on tensile behaviour ... [13] Mechanical and metallurgical effects of in process ... [14] ASTM E3-11: Standard guide for preparation of metallographic ... [15] Microstructural aspects of the friction-stir welding ... [16] ASTM 8M: Standard test methods of tension testing ... [17] ASTM E384-11: Standard test method for Knoop ... [18] Mechanical properties of severely plastic ... [19] Continuous dynamic recrystallization ... [20] Materials science and ... [21] Friction stir vibration welding and study ... [22] Effect of the Zener-Hollomon ... [23] Relationship between grain size and Zener ... [24] Friction stir welding and ... [25] High speed friction stir welding ... [26] Effect of water cooling on the ... [27] Cooling effect on microstructure and ... [28] Microstructural evolution of 6063 aluminum ... [29] The effect of friction stir vibration ... [30] The effect of SiC/Al₂O₃ particles used during ... [31] Mechanical ... [32] Low-temperature plastic deformation of ... [33] The effect of grain size and strain ... [34] Enhanced mechanical properties ...

بهبود خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ ایجادشده به وسیله روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با افزایش شدت سرمایش و اعمال ارتعاش

سعید یحیی‌آبادی MSc

دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

محمود عباسی PhD*

دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

آلومینیوم ۶۰۶۱ در صنعت کاربرد فراوانی دارد، بنابراین جوشکاری آن با روش‌های مطمئن اهمیت بالایی دارد. در جوشکاری ذوبی این نوع آلیاژها عیوبی از جمله ترک، حفره و جدایش عناصر آلیاژی اتفاق می‌افتد که لزوم استفاده از فرآیندهای حالت جامد مثل روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را فراهم می‌آورد. علی‌رغم مزایای فراوان روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تلاش‌هایی به منظور بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات حاصله انجام شده است. در این پژوهش، به بررسی تاثیر افزایش شدت سرمایش توسط آبگرد و همچنین بررسی تاثیر ارتعاش بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پرداخته می‌شود. همچنین تاثیر همزمان آبگرد و ارتعاش بر خواص مکانیکی اتصالات مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که ارتعاش با اعمال کرنش بیشتر روی قطعات و آبگرد به دلیل افزایش نرخ سرد شدن باعث کاهش اندازه دانه در منطقه اغتشاش می‌شوند. بررسی‌ها نشان داد که در اثر افزایش شدت سرمایش در حضور آبگرد، از انحلال رسوبات Mg_2Si به طور موثری جلوگیری می‌شود. نتایج حاصل از آزمون کشش قطعات جوشکاری شده نشان داد که با اعمال ارتعاش و خنک‌کننده به دلیل ریز شدن دانه‌ها استحکام اتصالات افزایش می‌یابد و همچنین به هنگام اعمال همزمان ارتعاش و سردکننده، به دلیل ریزدانه‌سازی موثرتر و حضور ذرات رسوب Mg_2Si ، استحکام افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. از طرف دیگر با ریز شدن دانه‌ها، مرز دانه افزایش پیدا کرده و بدین صورت رشد ترک کمتر شده و این موجب افزایش درصد ازدیاد طول قطعات می‌شود.

کلیدواژه‌ها: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ارتعاش، سرمایش، خواص مکانیکی، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۷

*نویسنده مسئول: m.abbasi@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه آلومینیوم به علت خواص ویژه‌ای که دارد به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین فلزها پس از فولاد محسوب می‌شود. کاربردهای این فلز روز به روز در حال افزایش است به طوری که مصرف سرانه هر کشور در زمینه آلومینیوم نشانه پیشرفته بودن یک کشور است. آلومینیوم ۶۰۶۱ یکی از آلیاژهای آلومینیوم رسوب سخت‌شونده بوده که شامل عناصر آلیاژی اصلی سیلیسیم و منیزیم است. این آلیاژ در مقایسه با آلیاژهای استحکام بالای آلومینیوم، دارای خواص جوش‌پذیری مناسبی است. آلیاژهای این گروه به صورت گسترده در صنایع دریایی، خطوط لوله، مخازن ذخیره‌سازی و صنایع هوایی کاربرد دارد [1]. آلیاژهای آلومینیوم- منیزیم- سیلیسیم مستعد جوشکاری هستند، ولی به دلیل انحلال رسوبات Mg_2Si که در اثر ورود حرارت ناشی از جوشکاری به قطعه وارد می‌شود، متحمل نرمی زیادی می‌شوند و این موجب افت خواص مکانیکی این گروه از آلیاژها می‌شود. بروز این مشکل مهم‌ترین محدودیت در طراحی مهندسی آلیاژهای مذکور است [2].

از روش‌های نوین ارایه شده به منظور جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم، روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) است. در

این فرآیند، جوشکاری توسط دستگاهی شبیه ماشین فرزکاری صورت می‌گیرد. ابزار چرخان شامل پین در فضای بین دو قطعه اتصال یابنده فرو می‌رود به نحوی که شانه با سطوح قطعه کار تماس می‌یابد. اصطکاک حاصل از تماس ابزار با قطعه کار سبب افزایش دما و نرم شدن مواد در ناحیه اتصال می‌شود. با نرم شدن مواد، چرخش و انتقال مواد به راحتی صورت گرفته و مواد در یکدیگر ممزوج می‌شوند و اتصال صورت می‌گیرد. بیشینه حرارت تولیدشده در این فرآیند حدود ۰/۸ نقطه ذوب فلزات پایه بوده و هیچ‌گونه عملیات ذوبی صورت نمی‌گیرد [3, 4]. از مزایای این روش جوشکاری، عدم تشکیل عیوب جوشکاری از قبیل تخلخل، ترک گرم، عدم ذوب و عدم نفوذ جوش است. همچنین این روش، بازدهی انرژی بالایی داشته و نیازی به ماده پرکننده در موضع جوش وجود ندارد [5].

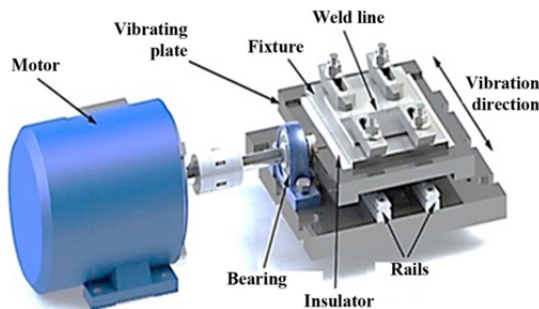
رسوب سختی یکی از مکانیزم‌های استحکام‌دهی در آلیاژهای آلومینیوم گروه ۶۰۰۰ است. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی این آلیاژها، حرارت ایجادشده در منطقه اغتشاش و هدایت آن به منطقه متاثر از عملیات ترمومکانیکی و منطقه متاثر از حرارت باعث می‌شود که رسوبات درشت یا منحل شوند. کاهش رسوبات در طول جوشکاری منجر به ایجاد اتصال با خواص ضعیف می‌شود. یکی از راهکارهای ارایه شده توسط محققین به منظور غلبه بر این مشکل و بهبود استحکام اتصالات ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، خارج کردن حرارت از موضع اتصال و سرد کردن آن است [6]. اگرچه به منظور بهبود خواص جوش، کاهش نیروی جوشکاری، کاهش سایش ابزار جوشکاری و کاهش حرارت ورودی در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تحقیقات مختلف دیگری نیز صورت گرفته است که از جمله آنها می‌توان به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی همزمان با اعمال جریان الکتریکی [7]، انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با کمک لیزر [8]، انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با کمک امواج اولتراسونیک [9]، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی [10] اشاره کرد. همان‌طور که اشاره شد از موارد دیگر ارایه شده در خصوص بهبود عملکرد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، افزایش شدت سرمایش در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و همچنین اعمال ارتعاش در حین جوشکاری است.

سینه‌مار و همکاران [11] به بررسی تاثیر اعمال سردکننده در حین جوشکاری بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ پرداختند که برای این منظور از نازلی استفاده شد که ۲۰ میلی‌متر پشت ابزار قرار گرفته بود. بررسی ریزساختاری نشان داد که در حالت اعمال سردکننده به دلیل اینکه حرارت اضافی توسط آب کاهش می‌یابد، اندازه دانه نسبت به حالت بدون سردکننده کوچک‌تر است. به علاوه اتصال ایجادشده در حالت اعمال سردکننده دارای استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم بالاتری نسبت به سرد کردن معمولی است در حالی که در مقدار ازدیاد طول آنها تفاوت ناچیزی وجود دارد. *شارما* و همکاران [12] با اعمال مستقیم جریان ماده خنک‌کننده به موضع جوش در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به بررسی اثر افزایش شدت سرمایش روی خواص ناحیه جوش پرداختند. در روش آنها، مایع خنک‌کننده در فاصله ۳۰ میلی‌متری از سطح قطعه کار و از پشت ابزار توسط یک نازل به سطح قطعه کار هدایت شد. نتایج نشان داد که در حضور مایع خنک‌کننده، اندازه دانه در نواحی مختلف شامل ناحیه اغتشاش، ناحیه متاثر از گرما و ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی کاهش یافت. همچنین آنها دریافتند که افزایش سرمایش در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سبب انتقال

محور موتور و در نتیجه فرکانس ارتعاش نگهدارنده از یک درایور استفاده شد.



شکل ۱) تصویر نگهدارنده مجهز به سیستم آبگرد برای انجام جوشکاری



شکل ۲) دستگاه لرزش گر مورد استفاده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی

قطعات در موقعیت لب به لب در کنار یکدیگر روی نگهدارنده قرار گرفته و مهار شدند و جوشکاری صورت گرفت. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در چهار حالت شامل معمولی، همراه با سردکننده، همراه با ارتعاش و حالت اعمال همزمان ارتعاش و سردکننده انجام شد. ریزساختار و خواص مکانیکی هر چهار دسته نمونه جوشکاری شده با یکدیگر مقایسه شدند. در تمامی چهار حالت ذکر شده، سرعت چرخشی ابزار ۹۵۰ دور بر دقیقه، سرعت حرکت خطی ابزار ۴۰ میلی متر بر دقیقه و زاویه ابزار ۲۰° در نظر گرفته شد. مبنای انتخاب این مقادیر، بررسی‌های تجربی توسط نویسندگان است که نشان داد مناسب‌ترین مقادیر پارامترهای جوشکاری جهت ایجاد اتصالی با ظاهر مناسب و بدون عیوب جوش استفاده از مقادیر ذکر شده است.

ابزار مورد استفاده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، ابزاری دوتکه شامل پین از جنس کاربید تنگستن و شانه از جنس فولاد عملیات حرارتی شونده M2 با سختی ۶۲ راکول سی بود. طرح هندسه ابزار و ابعاد آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

ریزساختار اتصالات به وجود آمده تحت شرایط متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور بررسی ریزساختار از عملیات متالوگرافی طبق استاندارد ASTM E3-11 [14] استفاده شد. نمونه‌هایی از سطح مقطع قطعات جوش شده تهیه و مانت شدند. قطعات مانت شده پس از سنباده زنی و پولیش، به منظور رونمایی ریزساختار تحت محلول اچ شامل ۱۵۰ میلی لیتر آب، ۳ میلی لیتر اسید نیتریک، ۶ میلی لیتر اسید هیدروکلریک، ۶ میلی لیتر اسید هیدروفلوریک به مدت ۱۰ ثانیه قرار گرفتند [15].

به منظور تعیین خواص مکانیکی اتصال به دست آمده از آزمون‌های کشش و ریزسختی سنجی استفاده شد. آزمون کشش تک محوری

موضوع شکست از ناحیه متاثر از گرما به ناحیه اغتشاش در حین آزمون کشش شد. فراتینی و همکاران [13] به منظور مطالعه اثر سرعت سرد کردن روی خواص منطقه جوش، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را در آب انجام دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که افزایش شدت سردکنندگی سبب افزایش درصد وزنی منیزیم و در نتیجه چگالی بیشتر رسوبات در جوش شد و استحکام جوش افزایش یافت. رحمی و عباسی [10] تاثیر ارتعاش را در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که با اعمال ارتعاش به دلیل کرنش یافتن بیشتر مواد و حرکت بیشتر نابه‌جایی‌ها، اندازه دانه کاهش می‌یابد و همچنین استحکام و انعطاف پذیری اتصال در مقایسه با حالت معمول افزایش می‌یابد. آنها همچنین گزارش کردند که با افزایش فرکانس ارتعاش، خواص مکانیکی اتصال بهبود می‌یابد.

در این تحقیق، با اعمال ارتعاش و همچنین افزایش شدت سردکنندگی در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ از طریق آبگرد به بررسی اثر ارتعاش و سرعت سرد شدن روی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش پرداخته می‌شود. ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده در چهار حالت بدون استفاده از آبگرد و ارتعاش، با استفاده از آبگرد، با استفاده از ارتعاش و استفاده همزمان از ارتعاش و آبگرد با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۲- مواد و روش آزمایش

ورق آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با ضخامت ۳ میلی متر و ترکیب شیمیایی اشاره شده در جدول ۱ در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت.

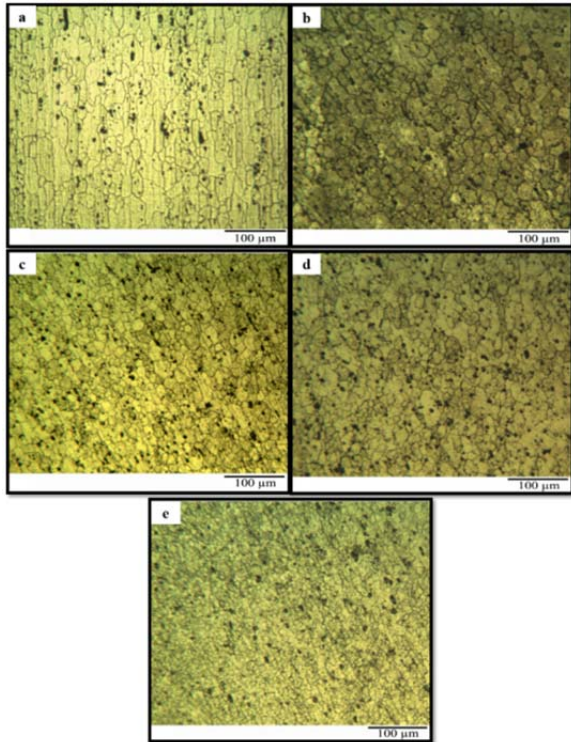
جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۶۰۶۱ (درصد وزنی)

آلومینیوم	۹۷/۳۰
منیزیم	۰/۸۵
سیلیسیم	۰/۶۵
کروم	۰/۱۵
منگنز	۰/۱۰
تیتانیوم	۰/۱۰
مس	۰/۲۰
روی	۰/۲۰
آهن	۰/۳۵

ورق در قطعاتی با ابعاد ۵×۱۵ سانتی متر برش زده و سطوح قطعات چربی زدایی شد. همچنین لبه قطعات به هم اتصال یابنده، پلیسه گیری شد. به منظور انجام جوشکاری دستگاه فرزکاری به کار رفت. در شکل ۱، تصویر نگهدارنده مجهز به سیستم آبگرد به منظور افزایش سرعت سرعش برای انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نمایش داده شده است. در این سیستم آبگرد، نگهدارنده با مجرای عبور آب به قطر ۱۲ میلی متر مورد استفاده قرار گرفت و دبی جریان آب، ۱/۵ لیتر بر دقیقه بود.

همچنین شکل ۲ تصویر دستگاه لرزش گر مورد استفاده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. در این دستگاه، حرکت چرخشی محور موتور توسط مکانیزم بادامکی به حرکت رفت و برگشتی صفحه لغزان که نگهدارنده روی آن مهار می‌شود، تبدیل می‌شود. با انجام لرزش، قطعات اتصال یابنده که روی نگهدارنده مهار می‌شوند، در راستای عمود بر خط جوش ارتعاش می‌یابند. طراحی بادامک به صورتی انجام شد که دامنه حرکت صفحه لغزشگر ۰/۵ میلی متر باشد. همچنین به منظور تغییر سرعت حرکت چرخشی

دارد [19]. در رابطه با اثر ارتعاش در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌توان گفت که با اعمال ارتعاش، مواد در منطقه اغتشاش کرنش بیشتری می‌یابند. از آنجایی که رابطه مستقیمی بین چگالی نابه‌جایی‌ها و کرنش اعمال شده روی یک قطعه وجود دارد [20]، با اعمال ارتعاش تعداد نابه‌جایی‌ها در منطقه اغتشاش افزایش می‌یابد. افزایش تعداد نابه‌جایی‌ها سبب افزایش بازیابی و تبلور مجدد شده و به این صورت ریزدانه‌گی بیشتری را در منطقه اغتشاش ایجاد می‌کند (شکل ۴- c) [21].



شکل ۴ (a) ریزساختار فلز پایه و ریزساختار منطقه اغتشاش؛ (b) FSW، (c) FSW+ارتعاش، (d) FSW+سردکننده، (e) FSW+ارتعاش+سردکننده

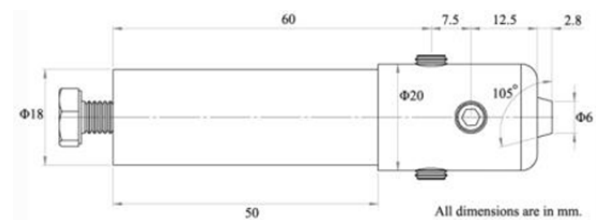
اثر افزایش سرعت سرمایش در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در شکل ۴-d نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که اندازه دانه در نمونه ۴-d کوچک‌تر از اندازه دانه در نمونه ۴-b است. کاهش اندازه دانه در نمونه جوشکاری شده با حضور آب نسبت به نمونه جوشکاری شده بدون حضور آب را می‌توان به سرعت سرمایش بیشتر آن و در نتیجه دمای کمتر ناحیه اغتشاش نسبت داد. در عملیات‌های ترمومکانیکی اثر دما و کرنش روی ساختار را می‌توان با پارامتر زرن- هولومان ($Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp(\frac{Q}{RT})$) ارایه کرد [22]. طبق تعریف ارایه شده، با افزایش کرنش و کاهش دما، پارامتر زرن- هولومان افزایش می‌یابد. از سوی دیگر رابطه پارامتر زرن- هولومان (Z) با اندازه دانه (d) به صورت زیر ارایه شده است [23]:

$$\ln d = b - a \ln Z$$

که a و b ثوابت معادله هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش Z ، اندازه دانه (d) کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش شدت سردکنندگی از رشد دانه جلوگیری شده و ساختار ریزدانه به دست می‌آید. اثر همزمان سردکننده و ارتعاش روی ریزساختار در شکل ۴- e نمایش داده شده است. کوچک‌ترین اندازه دانه در

براساس استاندارد ASTM-E8 [16] صورت گرفت. نمونه‌های آزمون کشش با استفاده از روش وایرکات و در راستای عمود بر خط جوش از قطعات جوشکاری شده تهیه شدند. تهیه نمونه‌ها به‌گونه‌ای بود که جوش در مرکز نمونه‌های کشش قرار گرفت. برای کشش نمونه‌ها از دستگاه کشش ۱۰۰ تن با سرعت حرکت فک بالا به میزان یک میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد. به منظور اطمینان از صحت داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون کشش، برای هر حالت جوشکاری سه نمونه کشش تهیه و مورد آزمون قرار گرفت. ریزسختی‌سنجی براساس معیار ویکرز و طبق استاندارد ASTM-E384 [17] انجام شد. مقادیر سختی در مناطق مختلف جوش شامل منطقه اغتشاش، منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکی و منطقه متأثر از حرارت اندازه‌گیری شد به‌نحوی که در هر منطقه ۳ داده جمع‌آوری شد. مقدار نیرو در حین سختی‌سنجی ۱۰۰ گرم نیرو و زمان توقف ۱۰ ثانیه بود.

به‌منظور تعیین فازهای تشکیل شده در حین جوشکاری از دستگاه پراش پرتو ایکس با ولتاژ کاری ۳۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر استفاده شد. نرخ روبش ۰/۳ درجه بر دقیقه انتخاب شد. در این دستگاه لامپ پرتوی ایکس مورد استفاده از جنس مس و طول موج پرتوی ایکس تولیدی ۱/۵۴۲/۱۰ آنگستروم بود. به‌منظور اندازه‌گیری دما در حین فرآیند از ترموکوپل نوع K استفاده شد. ترموکوپل در مکان تعبیه شده در نگهدارنده به‌نحوی که فاصله راس ترموکوپل از مرکز جوش ۱۵ میلی‌متر باشد، قرار گرفت.



شکل ۳ (۳) تصویر شماتیک ابزار استفاده شده (ابعاد بر حسب میلی‌متر است)

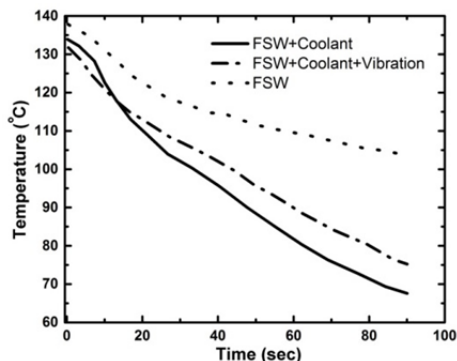
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختاری

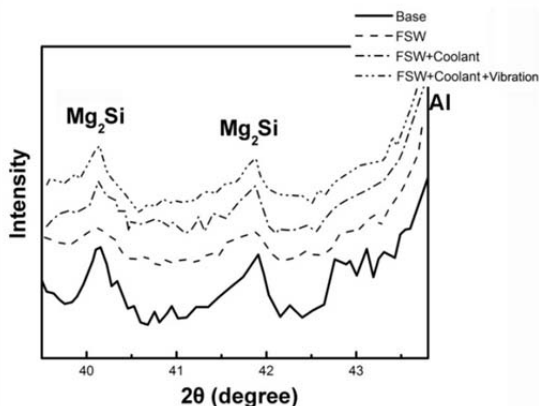
در شکل ۴، ریزساختار مربوط به نمونه فلز پایه به همراه ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده در منطقه اغتشاش در حالت‌های مختلف نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۴-a و ۴-b مشاهده می‌شود که اندازه دانه نمونه فلز پایه بیشتر از نمونه‌های جوشکاری شده و اندازه دانه نمونه جوشکاری شده در حالت حضور ارتعاش، ریزتر از اندازه دانه در نمونه جوشکاری شده بدون حضور ارتعاش است.

مهم‌ترین علت کاهش اندازه در نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده نسبت به نمونه فلز پایه، پدیده بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی است [18]. فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی سبب تغییر شکل شدید در ناحیه جوش می‌شود که افزایش زیاد چگالی نابه‌جایی‌ها را به دنبال دارد. با توجه به تولید گرمای زیاد در حین جوشکاری به دلیل تماس میان ابزار و قطعه‌کار، نابه‌جایی‌ها امکان حرکت می‌یابند. تحت فرآیند بازیابی دینامیکی، نابه‌جایی‌ها به‌منظور کاهش انرژی آزاد سیستم، نظم‌بندی جدید یافته و تشکیل مرزهای با زاویه کم می‌دهند. در ادامه با انجام تغییر شکل بیشتر، مرزهای با زاویه کم تحت فرآیند تبلور مجدد دینامیکی، مرزهای با زاویه زیاد تشکیل می‌دهند که ریزدانه‌گی را به همراه

زمان قرارگرفتن در معرض دمای بالا را کاهش می‌دهد. می‌تواند درشت شدن رسوبات را در منطقه اغتشاش کنترل کند و در نهایت منجر به بهبود سختی در منطقه اتصال شود [26]. در نمودار ۱ مشاهده می‌شود که دمای نمونه جوشکاری شده همزمان با اعمال ارتعاش و خنک‌کننده کمتر از نمونه جوشکاری شده در حالت ساده است. به عبارت دیگر، کاهش دمای ناشی از حضور خنک‌کننده بیشتر از افزایش دمای ناشی از حضور ارتعاش است. از اثرات افزایش دما در حین جوشکاری می‌توان به نقش آن در انحلال ذرات رسوب Mg_2Si در حین جوشکاری و رشد دانه اشاره کرد [27]. در نمودار ۲ نتایج پراش اشعه ایکس مربوط به فلز پایه و فلزات جوش در حالت های مختلف جوشکاری مشاهده می‌شود. در نمودارهای مربوط به آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه‌های مختلف مورد بررسی، بزرگ‌ترین پیک‌ها مربوط به پیک آلومینیوم بود. در کنار این پیک‌های بزرگ، پیک‌های کوچکی مشاهده شدند که نتیجه بررسی‌ها نشان داد که این پیک‌ها مربوط به فاز Mg_2Si است. در نمودار ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش دما در حین فرآیندهای جوشکاری مطالعه شده، شدت پیک مربوط به فاز Mg_2Si کاهش یافته است. برای نمونه پایه، پیک‌هایی با شدت بالا مشاهده می‌شود. علت کاهش شدت پیک مربوط به فاز Mg_2Si در نمونه‌های جوشکاری شده را می‌توان به انحلال این ذرات با افزایش دما نسبت داد [27]. ساتو و همکاران [28] دریافتند که رسوبات Mg_2Si در دمایی بیش از $400^{\circ}C$ در زمینه آلومینیوم حل می‌شوند. در نمودار ۲ برای نمونه جوشکاری شده همراه با سردکننده، شدت پیک‌های مربوط به فاز Mg_2Si بیشتر از سایر نمونه‌های دیگر جوشکاری شده است که این می‌تواند به دلیل ایجاد حرارت کمتر در ناحیه جوش در حالت وجود سردکننده باشد.



نمودار ۱) پروفیل دمایی ثبت شده حین جوشکاری در شرایط متفاوت



نمودار ۲) الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به فلز پایه و نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط متفاوت

مقایسه با سایر نمونه‌ها، در این نمونه مشاهده می‌شود. در این حالت تاثیر همزمان کاهش حرارت (به دلیل افزایش شدت سردکنندگی) و افزایش کرنش (به دلیل اعمال ارتعاش) وجود دارد. عامل اول، کاهش اندازه دانه و عامل دوم، افزایش کرنش و افزایش پدیده تبلور مجدد دینامیکی و در نتیجه کاهش دوباره اندازه دانه را به همراه دارد. در جدول ۲ میانگین اندازه دانه در فلز پایه و حالت‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی متفاوت به منظور مقایسه بهتر و درک تاثیر هر نوع فرآیند بر اندازه دانه ارایه شده است.

جدول ۲) میانگین اندازه دانه فلز پایه و منطقه اغتشاش در شرایط متفاوت جوشکاری

نوع ریزساختار	متوسط اندازه دانه (میکرومتر)
فلز پایه	۹۱
FSW	۶۳
سردکننده+FSW	۵۰
ارتعاش+FSW	۴۴
FSW+ارتعاش+سردکننده	۳۲

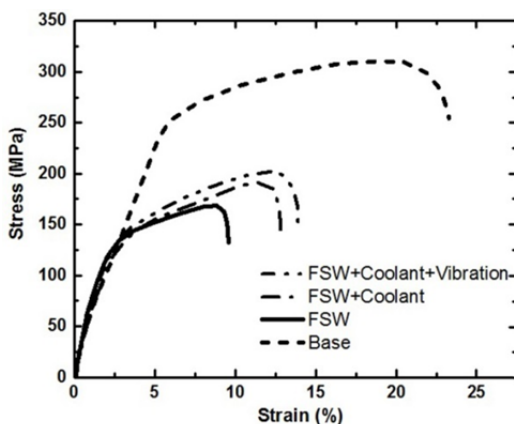
۳-۲- پروفیل دمایی

دو عامل تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک بین ابزار و قطعه‌کار موجب افزایش دما درون ناحیه اغتشاشی و اطراف آن می‌شود. مطالعات نشان داده است که در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم دما در ناحیه اغتشاش در محدوده $400-550^{\circ}C$ افزایش می‌یابد [24]. همچنین افزایش دما بر ریزساختار ماده مانند اندازه دانه، حل شدن رسوبات و در نتیجه خواص مکانیکی جوش تاثیرگذار است [25]. نمودار ۱ تغییرات دمایی یک نقطه از نگهدارنده را برای شرایط مختلف جوشکاری مورد مطالعه بر حسب زمان نمایش می‌دهد. نقطه بیشینه در این نمودارها، مربوط به لحظه عبور ابزار از نقطه مورد مطالعه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با عبور ابزار از نقطه مورد بررسی، دما در همه نمونه‌ها کاهش یافته است. وقتی که ابزار به نقطه‌ای از جسم می‌رسد، به دلیل تماس با شانه و همچنین اصطکاک بین پین و قطعه، دما به شدت افزایش می‌یابد. بعد از حرکت ابزار به سمت جلو، جریان همرفتی، باعث کاهش دما در منطقه اتصال مورد بررسی می‌شود. باید توجه داشت که نمودار ۱ تغییرات دمایی برای یک نقطه از نگهدارنده که ترموکوپل در آنجا نصب است را نشان می‌دهد نه برای نقطه‌ای از خط جوش، البته مطمئناً یک نقطه از خط جوشکاری، دمای بالاتری را تجربه می‌نماید.

در نمودار ۱ مشاهده می‌شود که بین حالت‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی متفاوت انجام شده، حالت همراه با ارتعاش دارای بیشترین دما در زمان‌های اولیه و همچنین در طول جوشکاری است. دلیل این پدیده را می‌توان به تاثیر ارتعاش بر جنبش مولکول‌ها و افزایش دما در منطقه اتصال مربوط کرد. اما وقتی در کنار ارتعاش از خنک‌کننده استفاده می‌شود، حرارت ایجاد شده در مرکز جوش به شدت کاهش یافته و در طول جوشکاری این حرارت کاهش می‌یابد. در نمودار ۱ مشاهده می‌شود که در حالت جوشکاری همراه با سردکننده، نرخ کاهش حرارت در طول جوشکاری نسبت به حالات دیگر بیشتر است. در این حالت وقتی ابزار حرکت می‌کند، جریان آبگرد، تاثیر زیادی بر حرارت گذاشته و به شدت دما را کاهش می‌دهد. همچنین وجود سردکننده باعث می‌شود تا اتصال، مدت زمان کمتری را در معرض دمای بالا قرار گیرد. از آنجایی که سردکننده به صورت موثری پیک دمایی و

توزیع سختی در ناحیه اتصال مربوط به نمونه‌های مختلف مطالعه شده، در نمودار ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رفتار کلی نمونه‌ها مشابه یکدیگر است. بیشترین سختی در منطقه اغتشاش و کمترین سختی در منطقه متأثر از حرارت دیده می‌شود و سختی نقاط مربوط به ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی در میان این دو حد قرار دارد. حرارت تولیدشده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی از یک‌سو سبب رشد دانه می‌شود و از سوی دیگر می‌تواند سبب انحلال رسوبات در آلیاژهای عملیات حرارتی‌شونده شود که هر دو این عوامل، کاهش سختی را به همراه دارند [29]. در حالی که ریزدانه‌شدن در منطقه اغتشاش به دلیل پدیده تبلور مجدد دینامیکی، افزایش سختی را به دنبال دارد [29]. با توجه به این موضوع، سختی ناحیه اغتشاش بیشترین و سختی مربوط به ناحیه متأثر از حرارت که تنها تحت تاثیر حرارت قرار می‌گیرد و روی آن هیچ کار مکانیکی صورت نمی‌گیرد، کمترین خواهد بود. نتایج ریزسختی‌سنجی در حالات متفاوت در نمودار ۳ ارائه شده است. با توجه به نمودار ۳ مشاهده می‌شود که بیشترین میزان سختی مربوط به نمونه جوشکاری شده همراه با اعمال همزمان ارتعاش و سردکننده است و سختی مربوط به نمونه جوشکاری شده همراه با سردکننده بیشتر از سختی نمونه جوشکاری شده همراه با ارتعاش است.

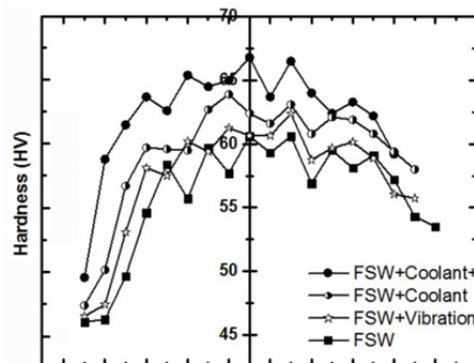
در توضیح باید گفت که دو عامل اندازه دانه و حضور ذرات رسوب موثر، در افزایش سختی نقش دارند [29]. با کاهش اندازه دانه و توزیع یکنواخت ذرات ریز و پراکنده رسوب، سختی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده شد کوچک‌ترین اندازه دانه در منطقه اغتشاش مربوط به نمونه جوشکاری شده در حالت همزمان ارتعاش و سردکننده بود. همچنین در نمودار ۲ مشاهده شد که برای این نمونه، شدت پیک‌های مربوط به فاز Mg_2Si نسبت به نمونه جوشکاری شده ساده بیشتر است. بنابراین نمونه جوشکاری شده با اعمال همزمان ارتعاش و سردکننده، بیشترین میزان سختی را دارد. همچنین در نمودار ۲ مشاهده می‌شود که اثر اعمال سردکننده در حین جوشکاری در افزایش سختی نسبت به اثر اعمال ارتعاش بیشتر است. دلیل این موضوع را می‌توان به اثر بیشتر کاهش دمای ناشی از اعمال سردکننده بر کاهش اندازه دانه و کاهش انحلال ذرات رسوب Mg_2Si نسبت به اثر ارتعاش در کاهش اندازه دانه دانست.



نمودار ۴) منحنی تنش- کرنش فلز پایه و اتصالات جوشکاری شده تحت شرایط متفاوت

نکته قابل ملاحظه دیگر در نمودار ۴، افزایش درصد افزایش طول در نمونه‌های جوشکاری شده همزمان با اعمال ارتعاش و/یا سردکننده نسبت به نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمول است. علت این موضوع را می‌توان به کاهش اندازه دانه در این نمونه‌ها نسبت به نمونه جوشکاری شده معمول مرتبط دانست.

ریزشدن دانه موجب افزایش مرز دانه‌ها می‌شود. افزایش مرز دانه، رشد ترک را به تعویق انداخته و ممکن است مکانیزم شکست را از حالت بین‌دانه‌ای به حالت درون‌دانه‌ای تغییر داده و به این صورت باعث افزایش درصد ازدیاد طول شود [32]. همچنین مطالعات هانس با استفاده از میکروسکوپ الکترون عبوری نشان داد که با



نمودار ۳) نتایج ریزسختی مربوط به اتصالات جوشکاری شده در شرایط متفاوت

۳-۴- نتایج آزمون کشش

منحنی‌های تنش- کرنش به‌دست‌آمده از آزمون کشش نمونه‌های جوشکاری شده در حالات متفاوت در نمودار ۴ ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود وقتی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولی انجام می‌شود، میزان استحکام نهایی کشش ۱۷۰مگاپاسکال و میزان درصد ازدیاد طول قطعه ۹% است. ولی نکته جالب توجه این است که با اعمال سردکننده یا اعمال ارتعاش می‌توان این خواص را تا حد زیادی بازیابی کرده و استحکام نهایی کشش و درصد ازدیاد طول را افزایش داد. در حالت وجود سردکننده و ارتعاش به‌طور همزمان، منحنی تنش- کرنش جهشی انجام داده و میزان استحکام نهایی کشش به ۲۰۰مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول به ۱۴% افزایش می‌یابد.

طبق رابطه هال-پچ $(\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2})$ [30]، استحکام (σ) با اندازه دانه (d) نسبت معکوس دارد و هر چه ماده دانه‌ریزتر باشد، از آنجایی که جزء حجمی مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد و مقاومت در برابر حرکت ناب‌جایی‌ها افزایش می‌یابد، استحکام آن افزایش بیشتری می‌یابد. همچنین طبق رابطه اورووان $(\Delta\sigma = \frac{Gb}{\lambda})$ [31]، حضور ذرات رسوب ریز با توزیع یکنواخت و فاصله (λ) کم از یکدیگر عامل مهمی در کاهش حرکت ناب‌جایی‌ها و افزایش استحکام (σ) است. برای نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده همزمان با اعمال ارتعاش و سردکننده از آنجایی که ساختار ریزدانه (شکل ۴) و جزء حجمی ذرات رسوب زیاد (نمودار ۲) است، لذا این نمونه استحکام نهایی کشش بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. همچنین در نمودار ۴ مشاهده می‌شود که نمونه‌های جوشکاری شده با اعمال ارتعاش یا سردکننده استحکام بیشتری نسبت به نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده معمولی دارند. با توجه به این موضوع می‌توان دریافت که اثر اعمال سردکننده در افزایش استحکام بیشتر از اثر اعمال ارتعاش است.

در حالت وجود سردکننده به دلیل نرخ سرمایش بیشتر، ریزدانه سازی موثری در منطقه اغتشاش نسبت به حالت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمول حاصل می شود و با اعمال همزمان ارتعاش و سردکننده، میزان این ریزدانه شدن افزایش می یابد.

(۲) با ورود ابزار به داخل قطعه کار، دما در ناحیه اغتشاش به دلیل حرارت ناشی از اصطکاک ابزار و قطعه کار افزایش می یابد. در حالت وجود سردکننده، این حرارت به سرعت خارج می شود و حرارت با نرخ زیادی از منطقه اغتشاش خارج می شود. همچنین بیشینه دما در همه حالت ها نسبت به نقطه ذوب آلومینیوم 6061 بسیار کمتر است.

(۳) نتایج ریزسختی نشان می دهد که در منطقه اغتشاش در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به همراه اعمال ارتعاش و خنک کننده به دلیل ریزدانه سازی موثر و حضور بیشتر رسوبات Mg_2Si سختی افزایش می یابد.

(۴) نتایج حاصل از آزمون کشش قطعات جوشکاری شده نشان می دهد که با اعمال ارتعاش یا خنک کننده به دلیل ریزدانه شدن دانه ها استحکام اتصال ها افزایش می یابد و همچنین هنگام اعمال همزمان ارتعاش و سردکننده، به دلیل ریزدانه سازی موثرتر و وجود بیشتر ذرات رسوب Mg_2Si استحکام افزایش چشمگیری پیدا می کند. از طرف دیگر با ریزدانه شدن دانه ها، مرز دانه ها افزایش پیدا کرده و مقاومت به رشد ترک بیشتر شده و این باعث افزایش درصد ازدیاد طول قطعات می شود.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: سعید یحیی آبادی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش شناسی/پژوهشگر اصلی (50%); محمود عباسی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (50%)

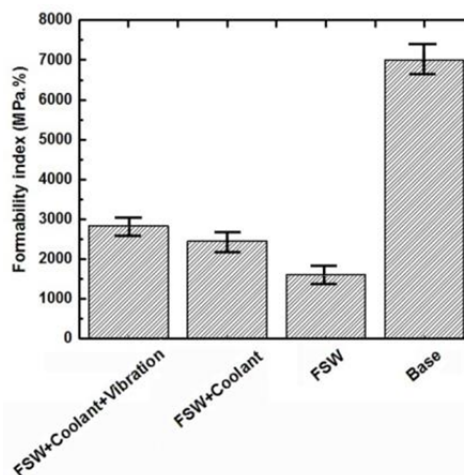
منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

منابع

- 1- Gharavi F, Matori KA, Yunus R, Othman NK, Fadaeifard F. Corrosion behavior of Al6061 alloy weldment produced by friction stir welding process. Journal of Materials Research and Technology. 2015;4(3):314-322.
- 2- Sadeesh P, Venkatesh Kannan M, Rajkumar V, Avinash P, Arivazhagan N, Devendranath Ramkumar K, et al. Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals. Procedia Engineering. 2014;75:145-149.
- 3- Abbasi M, Abdollahzadeh A, Bagheri B, Omidvar H. The effect of SiC particle addition during FSW on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy. Journal of Materials Engineering and Performance. 2015;24(12):5037-5045.
- 4- Lakshminarayanan AK, Malarvizhi S, Balasubramanian V. Developing friction stir welding window for AA2219 aluminium alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011;21(11):2339-2347.
- 5- Zhang Z, Zhang HW. Solid mechanics-based Eulerian model of friction stir welding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014;72(9-12):1647-1653.
- 6- Mehta KP, Badheka VJ. Hybrid approaches of assisted heating and cooling for friction stir welding of copper to

ریزدانه شدن، تعداد نابه جایی های موجود در مرز دانه ها که اصطلاحاً "نابه جایی های ضروری هندسی" نام دارند، بیشتر می شود. این نابه جایی ها، سبب تطابق کرنش بین دانه های مجاور شده و افزایش درصد افزایش طول را سبب می شوند [33].

نمودار ۵ مقادیر اندیس شکل پذیری نمونه های جوشکاری شده در حالات متفاوت را نشان می دهد. اندیس شکل پذیری معرف میزان جذب انرژی پیش از شکست در آزمون کشش است و به صورت حاصل ضرب استحکام نهایی کشش (UTS) در درصد افزایش طول (EL) تعریف می شود [34]. همان طور که مشاهده می شود اندیس شکل پذیری فلز پایه نسبت به فلزات جوش مقادیر بیشتری دارد. اندیس شکل پذیری بالا در فلز پایه، ترکیب مناسب استحکام و انعطاف پذیری فلز پایه را در مقایسه با قطعات جوشکاری شده نشان می دهد. مطابق نمودار ۵، در میان نمونه های جوشکاری شده، کمترین میزان اندیس شکل پذیری مربوط به حالت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمول است و بهترین حالت مربوط به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی همراه با اعمال همزمان سردکننده و ارتعاش است. این موضوع را می توان با نتایج مربوط به نمودار تنش- کرنش در قسمت قبل مربوط ساخت که با اعمال همزمان ارتعاش و سردکننده به دلیل افزایش استحکام کششی نهایی و همچنین ازدیاد طول، میزان انرژی جذب شده پیش از شکست افزایش می یابد و یا به عبارت دیگر چقرمگی شکست اتصالات بهبود می یابد. همچنین در حالت های اعمال سردکننده و همچنین اعمال ارتعاش به صورت جداگانه، افزایش اندیس شکل پذیری را شاهد هستیم که این پدیده نیز به ریزدانه شدن دانه ها و افزایش استحکام و انعطاف پذیری اتصال مربوط می شود.



نمودار ۵ اندیس شکل پذیری فلز پایه و اتصالات جوشکاری شده تحت شرایط متفاوت

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 6061 با موفقیت انجام شد. تاثیر ارتعاش و وجود سردکننده بر میکروساختار اتصال همچنین بر خواص مکانیکی اتصال ها از جمله ریزسختی و خواص کششی مورد ارزیابی قرار گرفت. مهم ترین نتایج این بررسی به طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

(۱) ارزیابی ریزساختار اتصالات و فلز پایه نشان می دهد که در منطقه اغتشاش در حالت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمول، نسبت به فلز پایه، دانه های ریزتری تشکیل شده است و همچنین با اعمال ارتعاش به دلیل ایجاد کرنش بیشتر در منطقه اغتشاش و

- introduction. 7th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 2007.
- 21- Fouladi S, Abbasi M, Givi M. Friction stir vibration welding and study about the effects of its parameters on microstructure and mechanical properties of Al5052 joint. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(4):217-224. [Persian]
- 22- Li YS, Zhang Y, Tao NR, Lu K. Effect of the Zener-Hollomon parameter on the microstructures and mechanical properties of Cu subjected to plastic deformation. *Acta Materialia*. 2009;57(3):761-772.
- 23- Chang CI, Lee CJ, Huang JC. Relationship between grain size and Zener-Hollomon parameter during friction stir processing in AZ31 Mg alloys. *Scripta Materialia*. 2004;51(6):509-514.
- 24- Mishra RS, Ma ZY. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering R Reports*. 2005;50(1-2):1-78.
- 25- Raikoty H, Ahmed I, Talia GE. High speed friction stir welding: a computational and experimental study. ASME 2005 Summer Heat Transfer Conference collocated with the ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems, 17-22 July, 2005, San Francisco, California, USA. New York: ASME; 2005.
- 26- Zhang HJ, Liu HJ, Yu L. Effect of water cooling on the performances of friction stir welding heat-affected zone. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012;21(7):1182-1187.
- 27- Cho JH, Han SH, Lee CG. Cooling effect on microstructure and mechanical properties during friction stir welding of Al-Mg-Si aluminum alloys. *Materials Letters*. 2016;180:157-161.
- 28- Sato YS, Kokawa H, Enomoto M, Jogan Sh. Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction-stir welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1999;30(9):2429-2437.
- 29- Fouladi S, Abbasi M. The effect of friction stir vibration welding process on characteristics of SiO₂ incorporated joint. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;243:23-30.
- 30- Dadaei M, Omidvar H, Bagheri B, Jahazi M, Abbasi M. The effect of SiC/Al₂O₃ particles used during FSP on mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *International Journal of Materials Research*. 2014;105(4):369-374.
- 31- Dieter GE. *Mechanical metallurgy*. 3rd Edition. New York: McGraw-Hill; 1986.
- 32- Estrin YZ, Zabrodin PA, Braude IS, Grigorova TV, Isaev NV, Pustovalov VV, et al. Low-temperature plastic deformation of AZ31 magnesium alloy with different microstructures. *Low Temperature Physics*. 2010;36(12):1100-1106.
- 33- Hansen N. The effect of grain size and strain on the tensile flow stress of aluminium at room temperature. *Acta Metallurgica*. 1977;25(8):863-869.
- 34- Naderi M, Abbasi M, Saeed-Akbari A. Enhanced mechanical properties of a hot-stamped advanced high-strength steel via tempering treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013;44(4):1852-1861.
- aluminum joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;239:336-345.
- 7- Pitschman M, Dolecki JW, Johns GW, Zhou J, Roth JT. Application of electric current in friction stir welding. ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 12-15 October, 2010, Erie, Pennsylvania, USA. New York: American Society of Mechanical Engineers; 2010.
- 8- Campanelli SL, Casalino G, Casavola C, Moramarco V. Analysis and comparison of friction stir welding and laser assisted friction stir welding of aluminum alloy. *Materials*. 2013;6(12):5923-5941.
- 9- Amini S, Amiri MR. Study of ultrasonic vibrations' effect on friction stir welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;73(1-4):127-135.
- 10- Rahmi M, Abbasi M. Friction stir vibration welding process: Modified version of friction stir welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;90(1-4):141-151.
- 11- Sinhmar S, Dwivedi DK. Enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of friction stir welded joint of AA2014 using water cooling. *Materials Science and Engineering A*. 2017;684:413-422.
- 12- Sharma Ch, Dwivedi DK, Kumar P. Influence of in-process cooling on tensile behaviour of friction stir welded joints of AA7039. *Materials Science and Engineering A*. 2012;556:479-487.
- 13- Fratini L, Buffa G, Shivpuri R. Mechanical and metallurgical effects of in process cooling during friction stir welding of AA7075-T6 butt joints. *Acta Materialia*. 2010;58(6):2056-2067.
- 14- ASTM International. ASTM E3-11: Standard guide for preparation of metallographic specimens [Internet]. West Conshohocken: ASTM International; 2011 [cited 1 Jun 2018]. Available from: <https://wenku.baidu.com/view/b7ac1006a6c30c2259019eb2.html>
- 15- Liu G, Murr LE, Niou CS, McClure JC, Vega FR. Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum. *Scripta Materialia*. 1997;37(3):355-361.
- 16- ASTM International. ASTM 8M: Standard test methods of tension testing of metallic materials metric [Internet]. West Conshohocken: ASTM International; 2003 [cited 10 Jun 2018]. Available from: Not Found
- 17- ASTM International. ASTM E384-11: Standard test method for Knoop and Vickers hardness of materials [Internet]. West Conshohocken: ASTM International; 2011 [cited 7 Month?Jun 2018]. Available from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E384-11.htm>
- 18- Sarkari Khorrami M, Kazeminezhad M, Kokabi AH. Mechanical properties of severely plastic deformed aluminum sheets joined by friction stir welding. *Materials Science and Engineering A*. 2012;543:243-248.
- 19- Jata K, Lee Semiatin S. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys. *Scripta Materialia*. 2000;43(8):743-749.
- 20- Callister WD. *Materials science and engineering: An*