

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 2، پاییز و زمستان1397، صفحه 86-71

بررسی اثر سرعت پیشروی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال AA2024 و AA6061 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

ایمان خدایی دلویی¹ ، حامد ثابت^{1*}، وحید ابویی مهریزی² ۱- گروه مهندسی مواد و متالورژی ، واحد کرج ، دانشگاه آزاد اسلامی ، کرج ، ایران ۲- مرکز تحقیقات مهندسی مواد پیشرفته ، واحد کرج ، دانشگاه آزاد اسلامی ، کرج ، ایران. (دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۲ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۳۲)

چکیدہ

تحقیق حاضر به بررسی ریز ساختار و ارزیابی خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در اتصال لب به لب AA2024 و AA6061 می روزاد. از یک ابزار استوانه ای رزوه دار از جنس فولاد گرم کار H13 جهت اتصال ورق های ۵ میلی متری در سرعت های چرخشی ۸۰۰ می بردازد. از یک ابزار استوانه ای رزوه دار از جنس فولاد گرم کار و ۱۱۰ میلی متر بر دقیقه استفاده شد. به منظور انجام بررسی های لازم، از مشاهدات متالورژیکی توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی عناصر و همچنین انجام مشاهدات متالورژیکی توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی عناصر و همچنین انجام آزمون های مناهدات متالورژیکی توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی عناصر و همچنین انجام آزمون های منان داد که تفاوت میان دو آلیاژ باعث نوسان سختی در ناحیه اغتشاش و یک کاهش بزرگ هنگام عبور از منطقه متشکل از دو آلیاژ به سمت آلیاژ ۲۰۶۱ می شود. با افزایش سرعت پیشروی از ۲۰۰ و ۱۰۰ دور بر دقیقه به علت کاهش حرارت ورودی، اندازه دان از ۲۰۰ و یا ۱۰ دور بر دقیقه به علت کاهش حرارت ورودی، اندازه مینا دو آلیاژ به سمت آلیاژ ۲۰۶۱ می شود. با افزایش سرعت پیشروی از ۲۰۰ تا ۱۰ میلیمتر بر دقیقه به علت کاهش حرارت ورودی، اندازه دان و دوبی و سختی و سختی با مقادیر به ترتیم ۲۰۱۶ می شود. با افزایش سرعت پیشروی از ۲۰۰ و یا دوبی میلیمتر بر دقیقه به علت کاهش حرارت ورودی، اندازه دانه ها کاهش پیدا کرد و سختی و استحکام افزایش یافت. همچنین بیشترین میزان استحکام کششی و سختی با مقادیر به ترتیب ۲۲۱۶ مگایاسکال و ۱۱۰۱۰ ویکرز مربوط به نمونه جوشکاری شده تحت سرعت چرخشی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۰۱ میلی متر بر دقیقه بود.

كلمات كليدى: جوشكارى اصطكاكي اغتشاشي،آلياژ آلومينيوم ٢٠٢۴، آلياژ آلومينيوم ٢٠۶٩، سرعت پيشروى ، سرعت چرخشي.

* نويسنده مسئول، پست الكترونيكي: h-sabet@kiau.ac.ir

The effect of transvers speeds on microstructure and mechanical properties of the AA2024 to AA6061 joint welded by FSW

I.Khodai Delouei¹, H.Sabet^{1*}, V.Abouei Mehrizi²

1-Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran 2- Advanced Materials Engineering Research Center, KarajBranch, IslamicAzad University, Karaj, Iran.

(Received 12 June 2018 ; Accepted 25 August 2018)

Abstract

Friction Stir Welding is one of the solid-state processes and today it has been used to join different types of materials. Friction stir welding does not have many problems and limitations due to melting and solidification of weld metal and by controlling its variables, the microstructure and desired mechanical properties can be achieved at the joint. Recently, in most industrial areas, due to its lightness and energy saving, much attention has been paid to the joining of aluminum alloys. The present study investigates the microstructure and evaluation of mechanical properties of friction stir welding in AA2024 and AA6061butt welds. A cylindrical threaded tool was used to join 5 mm thick plates at rotational speeds of 800, 1000 and 1200 rpm and traverse speeds of 30, 50, 70, 90 and 110 mm / min. In order to perform the necessary investigations, metallurgical observations were performed by optical microscope and scanning electron microscope equipped with a chemical analysis system of the elements, as well as mechanical tests of tensile strength and micro hardness. The results showed that the difference between the two alloys causes hardness variations in the nugget zone and a large hardness drop at the transition between the zone composed of both alloys and the 6061 zone. By increasing the traverse speed from 30 to 110 mm / min at constant rotational speeds of 800, 1000 and 1200 rpm, due to reduced input heat, the grain size decreases and the hardness and strength increase. Also, the highest tensile strengths and hardness were 221.6 Mpa and 111.05 Vickers, respectively, for a sample welded at a rotational speed of 1000 rpm and a traverse speed of 110 mm / min.

Keywords: Friction stir welding, Aluminum alloy 2024, Aluminum alloy 6061, Traverse speed, Rotational speed.

انعطاف پذیرتر است در تولید قطعات خاص در صنعت هوافضا و خودروسازی رو به افزایش است. جوشکاری این دو آلیاژ یک جایگزین مناسب برای روش های اتصال کنونی جهت کاهش وزن در صنایع هوافضا است. آلیاژهای آلومینیوم سری XXXX توسط روشهای معمول جوشکاری ذوبی به سختی قابل جوشکاری هستند. دلیل این امر ایجاد عیوبی مانند ترک گرم ، تخلخل، اعوجاج است که باعث کاهش خواص مکانیکی اتصال می شود. بنابراین فرآیند جوشکاری حالت جامد بهترین روش جایگزین برای جلوگیری از این مشکلات است [1].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)، یک فرایند جوشکاری حالت جامد است که بوسیله انجمن جوشکاری

1 -Friction stir welding

1- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل داشتن خواصی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی بالا و شکل پذیری عالی به طور وسیعی در صنایع مختلف از جمله هوا فضا ، حمل و نقل و شیمیایی مورد استفاده قرار می گیرند. آلیاژ آلومینیوم۲۰۲۴ (آلیاژ آلومینیوم و مس) از استحکام و مقاومت به خستگی بالایی برخوردار است و از جمله آلیاژهای قابل عملیات حرارتی محسوب می شود. آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ (آلیاژ آلومینیوم، منیزیم و سیلیسیم) نیز دارای خواص مکانیکی، خوردگی و جوش پذیری مناسبی درنظر گرفته می شود. این آلیاژ هم از جمله آلیاژهای قابل عملیات حرارتی می باشد. اتصال آلیاژهای غیر مشابه مانند اتصال آلومینیوم سری 2XXX که ارزانتر و با استحکام بالا به آلیاژ آلومینیوم سری ۵XXA که ارزانتر و

انگلستان^۱ (TWI) در سال ۱۹۹۱ ارائه شد و به دلیل دمای کمتر فرایند نسبت به جوشکاریهای ذوبی رایج، یک روش بالقوه است [۲]. این روش برای آلیاژهای آلومینیوم و فلزاتی که جوشکاری ذوبی آن ها مشکل و یا غیر ممکن است، به طور فزاینده ای استفاده می شود. در اتصال فلزات به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پارامترهای زیادی از جمله سرعت چرخشی، سرعت خطی، هندسه پین، ابعاد پین و شانه ابزار و... بر ریزساختار و خواص مکانیکی ناحیه جوش مناسب، کلیه پارامترها باید در مقدار بهینه خود مورد استفاده قرار گیرند، زیرا مقدار نامناسب پارامترها باعث بروز مشکلاتی نظیر تشکیل عیوب، انحلال ذرات رسوب، رشد دانه و در نهایت کاهش خواص مکانیکی اتصال خواهد شد [۲].

اخيرا تحقيقات متعددي جهت ايجاد اتصال بهينه ميان آلياژهاي آلومینیوم غیرمشابه سری 2XXX و 6XXX صورت گرفته است. برای مثال Amancio و همکاران [۳] ، ریزساختار و خواص مكانيكي جوش اصطكاكي اغتشاشي آلياژهاي آلومينيوم ۲۰۲۴ به ۶۰۵۶ را مورد مطالعه قرار دادند. ناحیه اغتشاش در این تحقیق شامل لایه های متناوبی از دو آلیاژ ۲۰۲۴ و ۶۰۵۶ بود. سختی ناحیه متاثر از حرارت بدلیل تسریع در امر پیرسختی و فرایند بازیابی بر اثر چرخه حرارتی موجود در جوش كاهش يافت. همچنين آنها بيان نمودند كه كاهش سختی در ناحیه متاثر از حرارت و کار مکانیکی بر اثر کاهش چگالی نابجایی ها بوده است. با وارد شدن به ناحیه اغتشاش میزان سختی بدلیل افزایش درجه کارسختی افزایش یافت که این افزایش همراه با رسوب گذاری مجدد ذرات ریز بود. این محققین نیز نشان دادند که بر اثر تبلور مجدد در ناحیه اغتشاش، اندازه دانه ها كاهش يافت و همچنين اختلاط غیرشیمیایی فلزات پایه موجب تشکیل لایه های مختلف در ناحیه اغتشاش گردید. بطوریکه بالاترین مقدار سختی متعلق به لایههای مربوط به آلیاژ ۲۰۲۴ در ناحیه اغتشاش بود.

Cavaliere و همکارانش[۴]، تاثیر پارامترهای فرایند را بر روی

1 -The welding institute

جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ ۲۰۲۴ به آلیاژ ۶۰۸۲ مورد بررسی قرار دادند. جوشکاری با سرعت چرخشی ثابت ۱۶۰۰ دور بر دقیقه و سرعت های پیشروی ۸۰ تا ۱۱۵ میلیمتر بر دقیقه انجام گردید. در این تحقیق آنها آلیاژ ۲۰۲۴ را که دارای استحکام بالاتری بود را در سمت پیشرونده و آلیاژ ۶۰۸۲ را در سمت پسرونده قرار دادند. استفاده از ابزار رزوه دار موجب لايه اي شدن و هم چنين حركت مواد به سمت مركز جوش شد، بطوریکه تغییر سرعت پیشروی سبب تغییر شکل این ساختار در مرکز جوش شد. طی آزمون سختی انجام شده مشخص گردید که بیشترین مقدار سختی زمانی حاصل می شود که آلیاژ ۲۰۲۴ در سمت پیشرونده قرار داده شود. از طرفی زمانیکه آلیاژ ۶۰۸۲ در سمت پیشرونده قرار داده شد، مقدار سختی در مرکز جوش دارای یکنواختی بیشتری می باشد که این اتفاق نشان از مخلوط شدن مناسب مواد بود. Attallaha و همكارانش[۵]، جوشكاري اصطكاكي اغتشاشي ألومينيوم ۲۰۹۵ را انجام دادند. آنها گزارش نمودند که با افزایش سرعت چرخشی و کاهش سرعت پیشروی، حرارت ورودی به ناحیه جوش افزایش یافته و در نتیجه موجب افزایش اندازه دانه در منطقه اغتشاش می شود. افزایش نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی موجب رشد دانه در منطقه اغتشاش شد. بطوریکه اندازه دانه ها از ۲میکرون تا ۶ میکرون متغییر بود. همچنین در نتایج آزمون کشش نشان داد که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، بدلیل افزایش درحرارت ورودی و در نتیجه افزایش اندازه دانه، استحکام کششی کاهش می یابد. طی بررسی های انجام شده توسط Li و همکارانش [۶] بر روی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ به آلیاژ ۶۰۶۱ نشان داده شد که این روش جوشکاری موجب تبلور مجدد دانه ها گردید که اندازه این دانه ها با افزایش دما افزایش می یابند. همچنین مشخص گردید که تفاوت آشکاری بين مناطق لايه اي آلياژ آلومينيوم ۲۰۲۴ و آلياژ ۶۰۶۱ وجود ندارد. ایشان بیان نمودند که افزایش سرعت چرخشی ابزار، ساختاری با اندازه دانه های بزرگتر بوجود می آورد. پروفیل سختی دارای نوساناتی در ناحیه جوش بود که این مقادیر

Ti	Cr	Fe	Zn	Mn	Si	Mg	Cu	Al	درصد وزني
•/•**	۰/۰۲	•/41	•/19	•/۴۸	۰/۲۷	١/٨۵	۴/۹ •	پايە	AA2024
۰/۰۲۵	۰/۱۷	۰/۵۲	•/••V	•/•۴	۰/۶۱	1/19	۰/۳۰	يايه	AA6061

جدول ۱- ترکیب شیمیایی AA2024 و AA6061.

سختی در سمت آلیاژ ۶۰۶۱ در نزدیکی منطقه جوش اصطکاکی در حال چر اغتشاشی به ۴۰ درصد سختی فلز پایه جوشکاری نشده آلیاژ به اندازه کا ۶۰۶۱ رسید. هدف از تحقیق حاضر اتصال آلومینیوم ۲۰۲۴ به پیشگرم انج آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و را نشان می ایجاد اتصالی بدون عیب و بررسی ریزساختار و خواص از: مکانیکی اتصال است.

2- روش تحقيق

برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از ورق های آلومینیوم ۲4 -AA2024 و ۲۵ -AA6061 استفاده گردید. به منظور تعیین ترکیب شیمیایی از روش طیف سنجی نشر نوری طبق استاندارد [۷] ASTM E1251-11 استفاده شد. ترکیب شیمیایی هر کدام از آنها در جدول(۱) ارائه شده است.

ورقهای AA2024 و AA6061 به ابعاد ۵×۵۰×۳۰۰ میلیمتر برای جوشکاری برش زده شدند. سطوح کلیه ورقها قبل از جوشکاری به منظور از بین بردن اکسیدهای سطحی و چربیها توسط سنباده و استون تمیز شدند. جوشکاری با قرارگیری ورق AA2024 در سمت پیشروی صورت گرفت.جهت جوشکاری از دستگاه فرز سنگین با توان هفت کیلو وات استفاده شد. برای ساخت ابزار جوشکاری از فولاد گرمکار H13 استفاده شد که قطر و ارتفاع شانه به ترتیب ۱۸ و ۸۰ میلی متر و قطر و ارتفاع پین به ترتیب ۶ و ۸/۴ میلی متر بود. برای ایجاد سیلان بهتر مواد، از پین استوانه ای رزوه دار با طول گام های ۱ میلی متر به خط افق تقعر داده شد. لازم به ذکر است که در حین زاویه ۳ درجه را داشت و مقدار عمق نفوذ ابزار ۴/۹ میلی متر بود، همچنین پیشروی ابزار با وقفه ۱۵ ثانیه بعد از تماس شانه

1- Optical emission spectroscopy

در حال چرخش با سطح قطعه آغاز می شد تا ماده در زیر شانه به اندازه کافی گرم شده باشد. فرایند در دمای محیط، بدون پیشگرم انجام شد. شکل(۱) تصویر شماتیک ابزار ساخته شده را نشان می دهد. متغیرهای جو شکاری در این تحقیق عبارتند از: اف) سرعت پیشروی ب) سرعت چرخشی جو شکاری اصطکاکی اغتشاشی در سرعت چرخشی ۲۰۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ دور در دقیقه و سرعت های پیشروی ۳۰،۵۰

۷۰،۹۰ و ۱۱۰ میلی متر بر دقیقه انجام شده است. متغیرهای جوشکاری در جدول(۲) ارائه شده است.



شکل ۱- تصویر شماتیک ابزار ساخته شده برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

آزمون متالوگرافی بر روی ریز ساختار جوش و مناطق تحت تأثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و منطقه فصل مشترک اتصال در ناحیه اغتشاش در نزدیکی مرز اتصال AA2024-AA6061 از نظر اندازه دانه و قفلهای مکانیکی انجام گردید. جهت آماده سازی نمونههای متالوگرافی نمونه ها پس از برش، مانت، سنباده و پولیش، توسط محلول ارایه شده در جدول(۳) حکاکی شدند. سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری OLYMPUS مدل OS-XB ساخت کشور ژاپن، ساختار

سرعت پیشروی V	سرعت چرخشی ۵	نمونه	سرعت پیشروی V	سرعت چرخشی @	نمونه
(mm/min)	(rpm)		(mm/min)	(rpm)	
٧.	17	٩	٣٠	۸۰۰	١
٩٠	۸	١٠	٣٠	۱۰۰۰	۲
٩.	۱	11	٣.	17	٣
٩٠	17	17	۵۰	۸	4
)).	۸	١٣	۵۰	1	۵
)).	۱۰۰۰	14	۵۰	17	۶
11.	17	۱۵	٧.	۸	V
			٧.	۱۰۰۰	٨

جدول ۲- متغیرهای جوشکاری در نمونههای جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی.

جدول٣- تركيب شيميايي محلول حكاكي.

محلول حکاکی	زمان (ثانيه)	ٱلياژ
	۵	AA2024
۱۵۰ میلی لیترآب، ۳ میلی لیتر اسید نیتریک، ۶ میلی لیتر اسید هیدروکلریک و ۶ میلی لیتر اسید هیدروفلوریک.	۶.	AA6061

دانه بندی و لایهای نواحی مختلف جوش و ناحیه فصل مشترک اتصال در نـاحیـه اغتشاشی در نزدیکی مرز اتصال AA2024-AA6061مورد بررسي قرار داده شد. همچنين جهت محاسبه اندازه دانه ها، اندازه رسوبات و درصد حجمي رسوبات از نرم افزار Clemex استفاده شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیزگر عناصر شیمیایی' (EDS)مدل VEGA2 ساخت شركت TESCAN جمهورى چک، جهت مطالعات ناحیه جوش مورد استفاده قرار گرفت. برای تصویر برداری از ناحیه جوش از آشکار ساز الکترون ثانویه استفاده شد.نتایج آزمون سختی سنجی بر اساس استاندارد [۸] ASTM E384-16 به وسیله دستگاه ریزسختی سنجی (ویکرز) PEA، ساخت کشور استرالیا با باری معادل ۲۰۰ گرم به مدت ۱۰ ثانیه اندازه گیری شدند. اندازه گیری ریز سختی در طول ۲۱ میلی متر از سطوح مقطع جوش انجام شد به طوری که ریز سختی سنجی از یک سمت فلز پایه یک طرف آغاز و به سمت ناحیه گذار و نواحی جوش ادامه پیدا می کرد و به طرف مقابل میرسید. فاصله هر اثر سختی از اثر قبلی نیز، ۱ میلی متر بود. سختی فلزات خام نیز گرفته شد تا بتوان

1- Electron dispersive spectrum

سختی اولیه و سختی ایجاد شده در نمونهها بر اثر فرایند جوشکاری با یکدیگر مقایسه شود. برای تهیه نمونههای آزمون کشش عرضی، ورقهای جوش داده شده بر اساس استاندارد [۱۰] ASTM-E8M برش داده شد.نمونهها به گونهای از خط جوش برش داده شد که طول نمونه کشش عمود بر خط جوش باشد و جوش در مرکز نمونه قرار بگیرد. تعداد کل جوشها جهت انجام آزمون کشش ۵۱ عدد بود که از هر جوش یک نمونه جهت انجام آزمون کشش عرضی آزمون استحکام کششی توسط دستگاه INTRON با نرخ حرکت فک یک میلی متر بر دقیقه انجام شد.

3-نتايج و بحث

اتصال AA2024 به AA6061 با بکارگیری سرعتهای چرخشی و پیشروی مختلف بصورت کاملا موفق انجام شد.کلیه جوشها از نظر ظاهری مورد بررسی قرار گرفت. شرایط مختلف جوشکاری به همراه ظاهر کلیه جوشها در جدول(۴) نمایش داده شده است. همه جوشها از نظر ظاهری مناسب و میزان پلیسه ایجاد شده در حد مورد قبولی بود. در جوشها عیوب ظاهری مانند پارگی و حفره در سطح جوش نمی باشند.

شکل ظاہری جوش	نوع عيب	سرعت پیشروی V	سرعت چرخشي ۵	نمونه
		(mm/min)	(rpm)	
Contraction	حفره داخلي	٣.	٨	ì
	حفره داخلي	٣.	۱	٢
	بدون عيب	٣.	17	٣
	بدون عيب	۵۰	A**	k
	بدون عيب	۵۰		۵
C C C C C C C C C C C C C C C C C C C	بدون عيب	۵۰	17	Ŷ
	ب <i>دو</i> ن عيب	٧.	۸	v
	بدون عيب	٧.		٨
	بدون عيب	٧.	17	٩
	بدون عيب	٩٠	۸	١.
	بدون عيب	٩٠		``
	بدون عيب	٩.	17	١٢
	ب <i>دو</i> ن عيب		۸۰۰	117
	ب <i>دو</i> ن عيب			14
	بدون عيب	11.	17	10

جدول ۴- شرایط ظاهری و عیوب نمونه های مختلف.

شکل(۲) تصاویر ماکروسکوپی از مقاطع جوشها را نشان میدهد. همان گونه که مشاهده میشود، سیلان مواد باعث مخلوط شدن دو ماده در ناحیه اغتشاشی جوش گردیده است. در تمامی جوش ها هر دو ورق AA2024 و AA6061 در ناحیه جوش دچار اختلاط گردیده اند که می توان آن را به مومسان شدن هر دو فلز AA2024 و AA6061 تحت فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نسبت داد. همانطور که در شکل(۲) دیده میشود درهم رفتگی و اختلاط دو ورق در نمونههای مختلف با یکدیگر تفاوت دارد که می توان دلیل آن را به تفاوت در مقدار حرارت ورودی در هر یک از نمونهها دانست. در نمونه ۱۳ با وجود داشتن پایین ترین نسبت سرعت

چرخشی به سرعت پیشروی، اختلاط مناسبی در جوش رخ داده است. در نمونههای ۱ و ۲ بدلیل حرارت ورودی نامناسب، اتصال بطور کامل تشکیل نشده است. همانطور که در شکل(۲) مشاهده می شود، کشیدگی مواد به سمت بالا در سمت پیشرونده اتفاق افتاده است که می تواند دلیل آن هم راستایی کرنشهای برشی حاصل از چرخش و پیشروی ابزار باشد. این حالت که موجب تقویت یکدیگر می گردد و سبب افزایش حرارت در سمت پیشرونده نسبت به پسرونده می شود [۲]. مشخص است که تقریبا در همه جوشها در قسمت میانی جوش (قسمت در تماس با پین) اختلاط بهتری بین طرفین جوش صورت گرفته است.



شکل۲ – تصاویر ماکروسکوپی مقطع جوش نمونه های: الف) ۱، ب) ۲، ج) ۳، د) ۴، ه) ۵، و) ۶،ز) ۷، ح)۸ ط)۹، ی)۱۰، ی)۱۱، ل)۱۲، م)۱۳، ن)۱۴، س)۱۵.

تصویر ماکروسکوپی ناحیه جوش نمونه ۱۴ در شکل(۳) نمایش داده شده است. این اتصال دارای هفت منطقه مختلف شامل فلز پایه AA2024 ، ناحیه متاثر از حرارت در A2024 در سمت پیشرونده اتصال، ناحیه متاثر از حرارت و کار مکانیکی در AA2024 در سمت پیشرونده اتصال، ناحیه اغتشاش، ناحیه متاثر از حرارت و کار مکانیکی در AA6061 در سمت پسرونده اتصال، ناحیه متاثر از حرارت در AA6061 است. سمت پسرونده اتصال و فلز پایه است AA6061 است.

در شکل(۴) و شکل(۵) ریزساختار اولیه ورقهای AA2024 و AA6061 حاصل از میکروسکوپ نوری نشان داده شده است.اندازه دانههای فلز پایه AA2024 بین ۳۰ تا ۵۰ میکرومتر و برای فلز پایه AA6061 بین ۳۹ تا ۴۳ میکرومتر مشاهده شد. میانگین اندازه ترکیبات بین فلزی نامحلول موجود در فلزات پایه AA2024 و AA6061 به ترتیب ۷/۱ و ۴/۲ میکرومتر با درصد حجمی ۲/۹ و ۲/۳ بود. همچنین نتایج آنالیز EDS

این ذرات بوسیله میکروسکوپ الکترونی در شکلهای(۴) و(۵) نشان داده شده است. این فازها با توجه به درصد وزنی عناصر حاصل از آنالیز EDS، رسوباتی از نوع Cu₂FeAl₇ برای AA6061 و Fe,Cr)₃SiAl₂ برای AA6061 بودند.

در شکل(۶) تصویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی ناحیه اغتشاش نمونه ۸ نشان داده شده است. این تصاویر نشان دهنده مناطق لایه ای ناحیه اغتشاش است. همچنین آنالیز EDS نقاط A ، B و C در جدول(۵) ارائه شده است. با توجه به درصد وزنی عناصر حاصل از آنالیز، نقاط B و C به ترتیب مربوط به آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۶۰۶۱ هستند. همچنین نقطه A که با رنگ سفید در تصویر مشخص است با توجه به آنالیز بدست آمده رسوبی از نوع Cu₂FeA₁₇ است. اندازه دانهها در منطقه اغتشاش از ۲ تا ۱۰ میکرون متغیر است. متوسط اندازه فاز و درصد حجمی فاز برای تمامی نمونهها

فاز احتمالی	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Al	عنصر
Cu ₂ FeAl ₇	-	4/10	11/90	۴/۸۴	11/97	9V/17	درصد وزنیA (Wt%)
AA2024	1/11	-	-	-	۶/۱۸	97/21	درصد وزنی B (Wt%)
							_
AA6061	•/٨٣	-	-	-	۰/۰۳	99/14	درصد وزنی C (Wt%)

جدول ۵- آنالیز EDS نقاط A، B وC در شکل(۶-ب)



شکل۳– تصویر ماکروسکوپی از مقطع عرضی اتصال AA6061 به AA6061 در نمونه ۱۴.



شکل ۴– تصویر میکروسکوپ نوری و آنالیز EDS رسوبات فلز پایه آلومینیوم ۲۰۲۴ : الف)تصویر میکروسکوپ نوری، ب) آنالیز EDS رسوبات.



شکل ۵– تصویر میکروسکوپ نوری و آنالیز EDS رسوبات فلز پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ : الف)تصویر میکروسکوپ نوری، ب) آنالیز EDS رسوبات.

در جدول(۶) ارائه شده است.

شکل(۷) رابطه اندازه دانه در منطقه اغتشاش را با سرعت پیشروی در سرعت های چرخشی ثابت ۸۰۰ ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ دور بر دقیقه نشان میدهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش سرعت پیشروی در سرعت چرخشی ثابت اندازه دانهها کاهش می یابد. دلیل این امر این است که افزایش سرعت پیشروی باعث کاهش حرارت ورودی و کاهش زمان برای رشد دانه می شود [۱۱]. شکل(۸) تصویر میکروسکوپی

نوری کاهش اندازه دانههای تبلور مجدد یافته در منطقه اغتشاش را در اثر افزایش سرعت پیشروی نشان می دهد. ریزشدن دانه ها در منطقه اغتشاش ناشی از تبلور مجدد دینامیکی است. تغییر شکل بسیار زیاد همراه اعمال حرارت در منطقه اغتشاش موجب تشکیل ریزساختار تبلور مجدد یافته ریزدانه می شود [۱۲].

تصاویری با بزرگنمایی بالا از عیوب در ناحیه جوش در شکل(۹) نشان داده شده است. حفراتی در نمونه دیده می شوند

متوسط اندازه فاز در	درصد	نوع فاز	متوسط اندازه دانه ها در	سرعت پیشروی V	سرعت چرخشي ٥	نمونه
منطقه اغتشاش (µm)	حجمى	_	منطقه اغتشاش (µm)	(mm/min)	(rpm)	
	فاز					
1/8٣	۲/۵	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	٧/۴١	٣.	۸	ì
1/74	۲/۲	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	V/V¥	٣.	۱۰۰۰	۲
۲/۷۳	٣/۶	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۶/۸۰	٣٠	17	٣
١/٢٢	۲/۴	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۵/۸۱	۵۰	۸۰۰	۴
١/۴٣	۲/۹	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۵/۹۵	٥٠	۱۰۰۰	۵
۲/۴۵	۲/۷	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۶	۵۰	17	۶
۲/۳۸	۲/۳	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۵/۳۳	٧.	۸	v
۲/۲۸	٣/٣	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۵/۹۴	٧.	۱۰۰۰	٨
١/٣٢	۲/۵	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	4/97	٧.	17	٩
۲/۳۴	۲/۹	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۵/۷۴	٩٠	۸	١٠
۲/۴۷	٣/۴	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۵/۶۳	٩٠	۱	11
1/2	٣/١	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۵/۴۸	٩٠	17	11
١/٨	۲/۷	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۵/۱۲	11.	۸	١٣
1/9	۲/۸	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۵/۶۴	11.	۱۰۰۰	14
۱/۵	۲/۲	(Fe,Cr) ₃ SiAl ₁₂ , Cu ₂ FeAl ₇	۵/۰۲	11.	17	۱۵

جدول ۶- مشخصات فازها و اندازه دانه نمونه ها.



شکل ۶- تصاویر ناحیه اغتشاش نمونه ۸، الف) تصویر میکروسکوپ نوری مناطق لایه ای و ب) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مناطق لایه ای.



شکل ۷– رابطه متوسط اندازه دانه در منطقه اغتشاش با سرعت پیشروی در سرعت های چرخشی ثابت .



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ نوری ناحیه اغتشاش در سرعت چرخشی ثابت۱۰۰۰ rpm زالف) سرعت پیشرویmm/min، ۳۰ ب) سرعت پیشروی۰mm/min ۵۰، ج) سرعت پیشروی۷۰۰ mm/min، د) سرعت پیشروی۹۰ mm/min، ه) سرعت پیشروی۱۱۰۰ mm/min .



شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ نوری از حفرات در ناحیه اغتشاش نمونه ۲.

که دلیل آن را می توان به عدم حرارت ورودی بهینه نسبت داد که موجب عدم اختلاط مناسب بین مواد در ناحیه اغتشاش بین دو فلز AA2024 و AA6061 شده است. زیرا بر اثر حرارت ورودی نامناسب، اختلاط مواد بصورت ناقص صورت میگیرد که دلیل آن عدم پلاستیسیته مناسب مواد است. بنابراین ترکیب بهینهای از مقدار سرعت چرخشی و سرعت پیشروی به منظور تولید حرارت ورودی مناسب، لازم می باشد.

با عبور از سمت ناحیه اغتشاش به سمت فلز پایه، ناحیهای به نام ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی(TMAZ)^۱ مشاهده میشود. ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی از دانههای تغییر شکل یافته تشکیل شده است. دانهها در ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی دچار تغییر شکل و کشیدگی شده و نسبت وجوه در آنها زیاد شده است.

1 -Thermo mechanically affected zone



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی ناحیه جوش نمونه ۴، الف) ناحیه HAZ فلز ۲۰۲۴، ب) ناحیه TMAZ فلز ۲۰۲۴، ج) ناحیه اغتشاش.



شکل۱۱– نمودار ریز سختی منطقه جوش در نمونه های ۱، ۲ و ۳.



شکل ۱۲- نمودار ریز سختی منطقه جوش در نمونه های ۴ ، ۵ و ۶ .

در ناحیه متاثر از حرارت(HAZ)^۲، تغییر قابل ملاحظهای در اندازه دانه مشاهده می شود. بطوریکه دانه ها افزایش چشمگیری نسبت به ناحیه اغتشاش دارند، زیرا در این ناحیه بر خلاف ناحیه اغتشاش هیچ گونه عملیات کار مکانیکی رخ نمی دهد و تنها حرارت ناشی از چرخش ابزار در این ناحیه دخیل است. بنابراین دانه ها در این ناحیه رشد یافته که در ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی در تحقیق حاضر محدوده باریکی را در تمامی نمونهها به خود اختصاص داده است. در ناحیه متاثر از حرارت و کار مکانیکی، دانهها بصورت کشیده شده به چشم میخورند. در این ناحیه مقدار تغییر شکل و همچنین دما کمتر از ناحیه اغتشاش میباشد، بنابراین مقدار کرنش به مقدار کرنش بحرانی لازم برای وقوع تبلور مجدد پویا نمیرسد [۱۳].

1 -Heat affected zone



شکل ۱۳ – نمودار ریز سختی منطقه جوش در نمونه های ۷، ۸ و ۹.



شکل ۱۴ – نمودار ریز سختی منطقه جوش در نمونه های ۱۰ ، ۱۱ و ۱۲.



شکل ۱۵ – نمودار ریز سختی منطقه جوش در نمونه های ۱۳ ، ۱۴ و ۱۵.

طرف آغاز و به سمت ناحیه گذار و نواحی جوش ادامه پیدا میکند و به طرف مقابل میرسد. ریزسختی نمونه های جوشکاری شده در جدول(۷) ارائه شده است. بیشترین میزان سختی مربوط به نمونه ۱۴ با مقدار ۱۱۱/۰۵ ویکرز و کمترین میزان سختی مربوط به نمونه ۳ با مقدار ۹۲/۶ ویکرز است. در شکل های(۱۱) تا (۱۵) نمودار مقدار سختی بر حسب فاصله از مرکز جوش در نمونههای جوشکاری شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در تمامی نمونهها میانگین سختی در ناحیه اغتشاش تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارند. نتیجه می تواند موجب کاهش خواص مکانیکی در این ناحیه از جوش شود. همانطور که دیده می شود ناحیه متاثر از حرارت و کار مکانیکی بصورت دانههای کاملا کشیده در در اطراف ناحیه اغتشاش بوجود آمده است [۱۴]. شکل(۱۰) تصاویر میکروسکوپ نوری نواحی مختلف جوش نمونه ۴ در سمت پیشرونده (آلومینیوم ۲۰۲۴) را نشان میدهد. در شکل تفاوت اندازه دانهها در نواحی مختلف جوش مشخص است. اندازه گیری ریزسختی از سطوح مقطع جوش انجام شد، به طـوری که ریز سختی سنجی از یک سمت فلـز پایه یک

میانگین ریز سختی	سرعت پيشروي	سرعت چرخشي	نمونه	میانگین ریز سختی	سرعت پيشروي	سرعت	نمونه
منطقه جوش (ويكرز)	v (mm/min)	ω (rpm)		منطقه جوش (ويكرز)	v (mm/min)	چرخشی ۵ (rpm)	
۱۰۲/۴	٧.	17	٩	۱۰۲/۶۵	۳.	۸	١
1.5	٩٠	٨	١.	1 • 1/9	۳.	۱۰۰۰	۲
۱۰۱/۵	٩٠	1	11	٩٢/۶	٣.	17	٣
۱.۷/۴۵	٩٠	17	١٢	۱۰۰/۹	۵۰	A•••	۴
) • V/V	11.	۸	١٣	٩۵/٢	۵۰	۱	۵
111/•0	11.	1	14	1/1	۵۰	17	۶
۱•۸/۶	11.	17	۱۵	1.0/.0	٧.	۸۰۰	V
				1.7/80	٧.	۱	٨

جدول ۷- نتایج ریز سختی سنجی نمونه ها.

محل شكست	درصد ازدیاد	استحكام كششى	نمونه
	طول	(N/mm^2)	
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/٧٥	198/0)
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/۴٩	194/44	٢
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/۵٣	۲.۶	٣
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/۵١	۲ • ۲/۳	4
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/۵٩	۲۰۰/۱۳	۵
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/۵۴	۲•۶/۸۸	6
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/۵٣	194/71	v
ناحيه جوش (پسرونده)	۲/۹۲	210/88	٨
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/٢٩	۲.٩/۱۳	٩
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/٢٩	۲.٩/۱۳	١.
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/٣٩	۲ • ۸/۳	11
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/٣۶	Y • V/AA	١٢
ناحيه جوش (پسرونده)	٣/١٥	۲۰۸	١٣
ناحيه جوش (پسرونده)	۳/۰۱	221/8	14
ناحيه جوش (يسرونده)	۳/۱۰	22./82	10

جدول ۸- نتایج آزمون کشش نمونه های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی.

اغتشاش نسبت داد. از طرف دیگر نیز می توان اظهار داشت که با توجه به نمودارهای سختی، مقدار سختی در تمامی نمونه ها در کلیه مناطق جوش در سمت AA2024 نسبت به AA6061 دارای مقدار بیشتری است. دلیل آن می تواند بالاتر بودن مقدار سختی فلز یایه AA2024 باشد .

تاثیر پارامترهای جوشکاری بر روی سختی از تاثیر آن ها بر حرارت ورودی در حین جوشکاری ناشی می شود. با افزایش سرعت پیشروی، نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی کاهش و در نتیجه حرارت ورودی کاهش مییابد و این تفاوت میان آلیاژها باعث نوسان سختی در ناحیه اغتشاش و یک کاهش بزرگ هنگام عبور از منطقه متشکل از دو آلیاژ به سمت آلیاژ ۶۰۶۱ میشود. پراکندگی مقادیر سختی در ناحیه اغتشاش میتواند به دلیل ایجاد الگوهای حلقه پیازی باشد. افزایش سختی در منطقه اغتشاش به دلیل وقوع پدیده تبلور مجدد که منجر به کاهش اندازه دانه می شود. همچنین به وضوح مشخص است که به محض خارج شدن از ناحیه اغتشاش مقدار سختی کاهش قابل ملاحظه ای یافته است که علت آن را میتوان به عدم رخ دادن پدیده تبلور مجدد در خارج از ناحیه



شکل ۱۶– رابطه ریزسختی منطقه جوش با سرعت پیشروی در سرعت های چرخشی ثابت .



شکل ۱۷ – رابطه استحکام با سرعت پیشروی در سرعت های چرخشی ثابت .



شکل ۱۸ – تصاویر سطح شکست در نمونه های: الف) ۷، ب)۱۴.

موجب کاهش اندازه دانه می شود و در نهایت مرزدانهها افزایش و مقدار سختی بالا می رود[۶]. شکل(۱۶) افزایش سختی با افزایش سرعت پیشروی در سرعت های چرخشی ثابت را نشان میدهد.

پس از بررسی و مطالعه ریز ساختار جوش و سختی مربوط به نمونه ها ، استحکما اتصالات ایجاد شده در شرایط مختلف به

منظور مقایسه تأثیر متغیرها مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمون تمامی نمونهها از ناحیه جوش دچار شکست شدند. این بدین معنی است که مقدار استحکام جوش از دو فلز پایه کمتر است. ناحیه جوش بین دو آلیاژ AA2024 و AA6061 با نشان دادن حالت پلاستیک و گردنی شدن شکسته شد که این مطلب نشان از شکست حالت نرم دارد. در میان تمامی نمونهها،

نمونه ۷ با مقدار ۱۹۴/۳۸ مگایاسکال دارای کمترین و نمونه ۱۴ با مقدار ۲۲۱/۶ مگا یاسکال دارای بیشترین میزان استحکام کششی هستند. دلیل این تفاوت آن می تواند وجود حفره در نمونه ۷ و از طرفی دیگر کوچکتر بودن اندازه دانه در نمونه ۱۴ نسبت به نمونه های دیگر باشد. همان طور که در شکل(۱۷) مشاهده می شود با افزایش سرعت پیشروی در سرعت چرخشی ثابت استحکام کششی افزایش یافته است که می توان دلیل آنرا به کوچکتر شدن اندازه دانه در منطقه اغتشاش نسبت داد زیرا با افزایش سرعت پیشروی، نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی کاهش و در نتیجه حرارت ورودی کاهش مىيابد كه نهايتا موجب كوچكتر شدن اندازه دانه مي گردد. ریز شدن دانه ها باعث افزایش مرزدانه ها و ممانعت بیشتر در مقابل حركت نابجاييها و در نتيجه سبب افزايش استحكام كششى نمونه ها مي شود. مي توان اينگونه استنباط نمود كه، اندازه دانه در منطقه اغتشاش تعيين كننده مقدار استحكام کششی است، بدین صورت که هرچه اندازه دانه ها ریزتر، استحکام کششی بیشتر می گردد. جدول(۸) نتایج آزمون کشش نمونهها را نشان ميدهد.

برای بررسی بهتر چگونگی شکست نمونه ها از ناحیه جوش، سطح شکست نمونه های ۷ و ۱۴ که به ترتیب دارای پایین ترین و بالاترین مقدار استحکام کششی بودند مورد مطالعه قرار گرفت. تصاویری از سطح شکست در شکل(۱۸)، آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود سطح شکست نمونهها دارای دیمپل های عمیق و زیادی هست که از مشخصه های بارز شکست نرم است. همچنین این مورد نشان دهنده تغییر شکل زیادی در حین آزمون کشش می باشد.

4- نتیجه گیری در تحقیق حاضر امکان سنجی اتصال آلومینیوم ۲۰۲۴ به آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و ایجاد اتصالی بدون عیب مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

-با کنتـرل متغیـرهای جوشکـاری اصطکـاکی اغتشاشی، امکان

دستیابی به یک جوش سالم و ایجاد ترکیبی از خواص دو آلیاژ AA2024 و AA6061 در جوشکاری با این روش وجود دارد. -کوچکترین اندازه دانه مربوط به نمونه ۹ با سرعت چرخشی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۷۰ میلیمتر بر دقیقه با متوسط اندازه دانه ۴/۹۲ میکرومتر در ناحیه اغتشاش بود. - با افزایش سرعت پیشروی از ۳۰ تا ۱۱۰ میلیمتر بر دقیقه در سرعت های چرخشی ثابت ۵۰۰ ما۰۰ و ۱۲۰۰ دور بر دقیقه به علت کاهش حرارت ورودی، اندازه دانهها کاهش یافت.

- اندازه و کسر حجمی رسوبات Cu₂FeAl₇ و Fe,Cr)₃SiAl₁₂ و Fe,Cr)₃SiAl₁₂ با تغییر سرعت چرخشی و سرعت پیشروی تغییر نمود. - بیشترین میزان سختی مربوط به نمونه ۱۴ به مقدار ۱۱۱/۰۵ ویکرز در سرعت چرخشی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۱۱۰ میلیمتر بر دقیقه بود. - تفاوت میان آلیاژها باعث نوسان سختی در ناحیه اغتشاش و یک کاهش بزرگ هنگام عبور از منطقه متشکل از دو آلیاژ به سمت آلیاژ ۶۰۶۱ شد. - بیشترین میزان استحکام کششی مربوط به نمونه ۱۴ به مقدار ۲۲۱/۶

سرعت پیشروی ۱۱۰ میلیمتر بر دقیقه بود.

منابع

1-Heinz.A, Haszler.A, Keidel.C, Moldenhauer.S, Benedictus.R, Miller.W.S, 2000,"Recent Development in Aluminium Alloys for Aerospace Applications", Materials Science and Engineering A, Vol. 280, PP 102 –107.

2-MishraaR.S., Z.Y. Ma, 2005, "Friction Stir Welding and Processing", Materials Science and Engineering R Vol. 50, pp 1–78.

3- Amancio-Filho.S.T, Sheikhi.S, dos Santos.J.F, Bolfarini.C, 2008,"Preliminary Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Welds in Aircraft Aluminium Alloys 2024-T351 and 6056-T4", Journal of Materials Processing Technology Vol.206, PP 132–142.

4- Cavaliere.P, De Santis.A, Panella.F, Squillace.A, 2009, "Effect of Welding Parameters on Mechanical and Microstructural Properties of Dissimilar AA6082–AA2024 Joints produced by Friction Stir Welding", Materials and Design Vol.30, PP 609–616.

of Dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys. Mater Sci Eng B 2008;148(1–3):82–7.

11- J.F. Guo, H.C. Chen, C.N. Sun, G. Bi, Z. Sun, J. Wei, 2014, "Friction Stir Welding of Dissimilar Materials Between AA6061 and AA7075 Al alloys Effects of Process Parameters", Materials and Design Vol.56, PP 185–192.

12- Mahoney MW, Rhodes CG, Flintoff JG, Spurling RA, Bingel WH. Properties of Friction-Ftir-Welded 7075-T651 Aluminum. Metall Mater Trans A 1998;29A:1955–64.

13- Humphreys F.J., Hotherly.M, 1995, "Recrystalization and Related Annealing Phenomena", Pergamon, press New York.

14- Aydin H, Bayram A, Uguz A. Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of 2024 Aluminium Alloy in Different Heat Treated State. Mater Des2009;30:211–221.

5- Attallaha.M.M, Salemb.H.G, 2005, "Friction Stir Welding Parameters: a Tool for Controlling Abnormal Grain Growth During Subsequent Heat Treatment", Materials Science and Engineering A, Vol. 391, PP 51– 59.

6- Li.Y, Murr. L.E, McClure. J.C, 1999" Flow Visualization and Residual Microstructures Associated With the Friction-Stir Welding of 2024 Aluminum to 6061 Aluminum", Materials Science and Engineering A, Vol. 271, PP 213–223.

7- Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry, ASTM E1251-11.

8- Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM E384-16.

9- Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM-E8M.

10- Khodir SA, Shibayanagi T. Friction Stir Welding