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 دلویی[1]، حامد ثابت[1*]، وحید ابویی مهریزی[2]

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: ۱۳۹۷/۰۶/۰۳)

چکیده

تحقیق حاضر به بررسی ریز ساختار و ارزیابی خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در اتصال لب به لبAA2024 و AA6061 می‌پردازد. از یک ابزار استوانه ای رزوه دار از جنس فولاد گرم کار H13 جهت اتصال ورق‌های ۵ میلی متری در سرعت های چرخشی ۸۰۰، ۱۰۰۰و۱۲۰۰ دور در دقیقه و سرعت‌های پیشروی ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ میلی متر بر دقیقه استفاده شد. به منظور انجام بررسی‌های لازم، از مشاهدات متالورژیکی توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز شیمیایی عناصر و همچنین انجام آزمون‌های مکانیکی استحکام کششی و ریزسختی سنجی نیز استفاده شد. نتایج آزمون ها نشان 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 ۶۰۶۱ می شود. با افزایش سرعت پیشروی از ۳۰ تا ۱۱۰ میلیمتر بر دقیقه در سرعت های چرخشی ثابت ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ دور 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 ۲۲۱/۶ مگاپاسکال و ۱۱۱/۰۵ ویکرز مربوط به نمونه جوشکاری شده تحت سرعت چرخشی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۱۰ میلی متر بر دقیقه بود.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی،آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، سرعت پیشروی، سرعت چرخشی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: h-sabet@kiau.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

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

I.Khodai Delouei[1], H.Sabet[1*],V.Abouei Mehrizi[2]
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.

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 می‌شود. این آلیاژ هم از جمله آلیاژهای قابل عملیات حرارتی می باشد. اتصال آلیاژهای غیر مشابه مانند اتصال آلومینیوم سری 2XXX با استحکام بالا به آلیاژ آلومینیوم سری 6XXX که ارزان‌تر و انعطاف‌پذیرتر 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 2XXX 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 می‌شود. بنابراین فرآیند جوشکاری حالت جامد بهترین روش جایگزین برای جلوگیری از این مشکلات است [۱].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[1](FSW)، یک فرایند جوشکاری حالت جامد است که بوسیله انجمن جوشکاری

1 -Friction stir welding

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

انگلستان[1] (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 تأثیرگذار می باشد. برای دست یابی به خواص مکانیکی 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].

اخیرا تحقیقات متعددی جهت ایجاد اتصال بهینه میان آلیاژهای آلومینیوم غیرمشابه سری 2XXX و 6XXX صورت گرفته است. برای مثال Amancio و همکاران [۳] ، ریزساختار و خواص مکانیکی جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم 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 کاهش یافت. همچنین آنها بیان نمودند که کاهش 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 کاهش یافت و همچنین 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.

Cavaliereو همکارانش[۴]، تاثیر پارامترهای فـرایند را بر روی 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 لایه ای شدن و هم چنین حرکت مواد به سمت مرکز 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 می‌شود 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 همکارانش[۵]، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم 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 آلیاژ۶۰۶۱ 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 بین مناطق لایه ای آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ و آلیاژ ۶۰۶۱ وجود ندارد. ایشان بیان نمودند که افزایش سرعت چرخشی ابزار، ساختاری با اندازه دانه های بزرگتر بوجود می آورد. پروفیل سختـی دارای نوسـاناتی در نـاحیه جـوش بود که این مقـادیر

1 -The welding institute

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول ۱- ترکیب شیمیایی AA2024 و AA6061 .

درصد وزنی	Al	Cu	Mg	Si	Mn	Zn	Fe	Cr	Ti
AA2024	پایه	۴/۹۰	۱/۸۵	۰/۲۷	۰/۴۸	۰/۱۶	۰/۴۱	۰/۰۲	۰/۰۴۴
AA6061	پایه	۰/۳۰	۱/۱۹	۰/۶۱	۰/۰۴	۰/۰۰۷	۰/۵۲	۰/۱۷	۰/۰۲۵

سختی در سمت آلیاژ ۶۰۶۱ در نزدیکی منطقه جوش اصطکاکی اغتشاشی به۴۰ درصد سختی فلز پایه جوشکاری نشده آلیاژ ۶۰۶۱ رسید. هدف از تحقیق حاضر اتصال آلومینیوم ۲۰۲۴ به آلومینیوم ۶۰۶۱ به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و ایجاد اتصالی بدون عیب و بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال است.

2- روش تحقیق

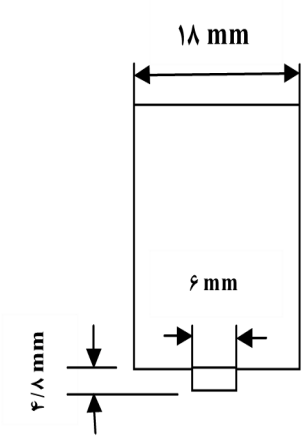
برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از ورق‌های آلومینیوم AA2024- T4 و AA6061- T6 استفاده گردید. به منظور تعیین ترکیب شیمیایی از روش طیف سنجی نشر نوری[1] طبق استاندارد ASTM E1251-11 [۷]استفاده شد. ترکیب شیمیایی هر کدام از آنها در جدول(۱) ارائه شده است.

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 ۴/۸ میلی متر بود. برای ایجاد سیلان بهتر مواد، از پین استوانه ای رزوه دار با طول گام های ۱ میلی متر استفاده گردید. همچنین کف شانه ابزار به میزان ۶ درجه نسبت به خط افق تقعر داده شد. لازم به ذکر است که در حین جوشکاری همواره ابزار نسبت به خط عمود بر راستای جوش 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 در حال چرخش با سطح قطعه آغاز می‌شد 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 می‌دهد. متغیرهای جوشکاری در این تحقیق عبارتند از:

الف) سرعت پیشروی

ب) سرعت چرخشی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سرعت چرخشی ۸۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ دور در دقیقه و سرعت های پیشروی ۳۰،۵۰، ۷۰،۹۰ و۱۱۰ 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 BX-200 ساخت کشور ژاپن، ساختار

1- Optical emission spectroscopy

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

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

نمونه	سرعت چرخشی ω (rpm)	سرعت پیشروی v (mm/min)	نمونه	سرعت چرخشی ω (rpm)	سرعت پیشروی v (mm/min)
۱	۸۰۰	۳۰	۹	۱۲۰۰	۷۰
۲	۱۰۰۰	۳۰	۱۰	۸۰۰	۹۰
۳	۱۲۰۰	۳۰	۱۱	۱۰۰۰	۹۰
۴	۸۰۰	۵۰	۱۲	۱۲۰۰	۹۰
۵	۱۰۰۰	۵۰	۱۳	۸۰۰	۱۱۰
۶	۱۲۰۰	۵۰	۱۴	۱۰۰۰	۱۱۰
۷	۸۰۰	۷۰	۱۵	۱۲۰۰	۱۱۰
۸	۱۰۰۰	۷۰			

جدول۳- ترکیب شیمیایی محلول حکاکی.

آلیاژ	زمان (ثانیه)	محلول حکاکی
AA2024	۵	۱۵۰ میلی لیترآب، ۳ میلی لیتر اسید نیتریک، ۶ میلی لیتر اسید هیدروکلریک و ۶ میلی لیتر اسید هیدروفلوریک.
AA6061	۶۰	

دانه بندی و لایه‌ای نواحی مختلف جوش و ناحیه فصل مشترک اتصال در نـاحیـه اغتشاشی در نزدیکی مرز اتصال AA2024-AA6061مورد بررسی قرار داده شد. همچنین جهت محاسبه اندازه دانه ها، اندازه رسوبات و درصد حجمی رسوبات از نرم افزارClemex استفاده شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیزگر عناصر شیمیایی[1] (EDS)مدل VEGA2 ساخت شرکت TESCAN جمهوری چک، جهت مطالعات ناحیه جوش مورد استفاده قرار گرفت. برای تصویر برداری از ناحیه جوش از آشکار ساز الکترون ثانویه استفاده شد.نتایج آزمون سختی‌سنجی بر اساس استاندارد ASTM E384-16 [۸] 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 می‌کرد و به طرف مقابل می‌رسید. فاصله هر اثر سختی از اثر قبلی نیز، ۱ میلـی متـــر بود. سختـــی فلـزات خام نیز گرفته شد تا بتوان سختی اولیه و سختی ایجاد شده در نمونه‌ها بر اثر فرایند جوشکاری با یکدیگر مقایسه شود. برای تهیه نمونه‌های آزمون کشش عرضی، ورق‌های جوش داده‌شده بر اساس استاندارد ASTM-E8M [۱۰] 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 کشش۱۵ عدد بود که از هر جوش یک نمونه جهت انجام آزمون کشش عرضی آزمون استحکام کششی توسط دستگاه INTRON –5500R با نرخ حرکت فک یک میلی متر بر دقیقه انجام شد.

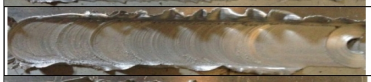
1- Electron dispersive spectrum

3-نتایج و بحث

اتصالAA2024 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.

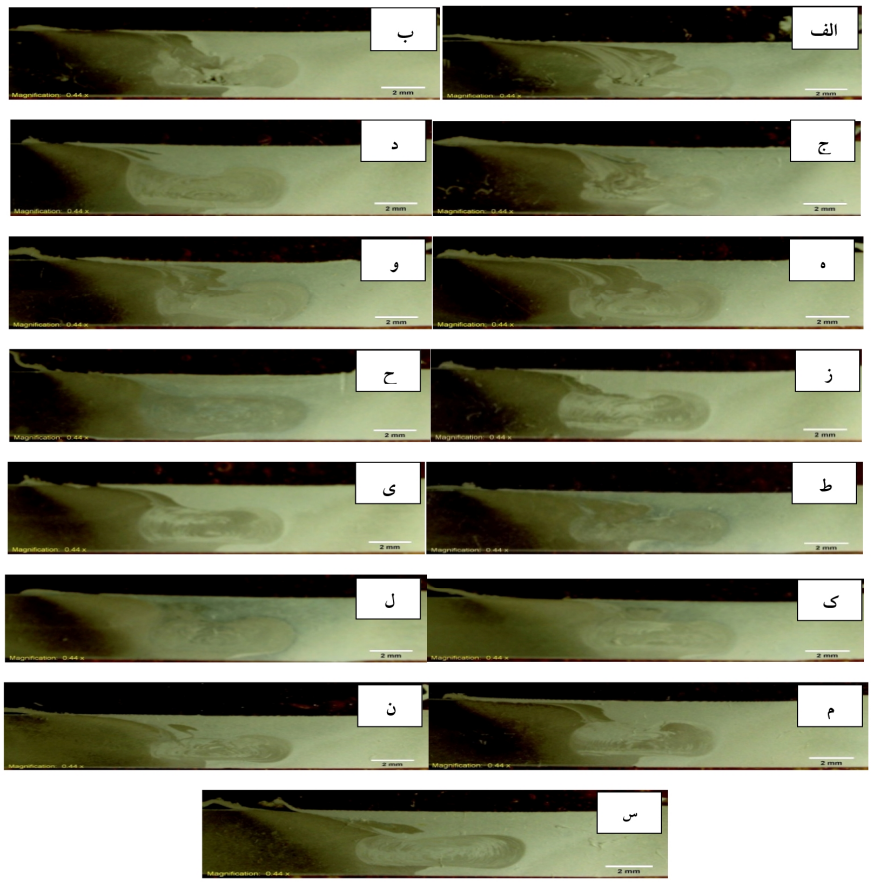
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول ۴- شرایط ظاهری و عیوب نمونه های مختلف.

نمونه	سرعت چرخشی ω (rpm)	سرعت پیشروی v (mm/min)	نوع عیب	شکل ظاهری جوش
۱	۸۰۰	۳۰	حفره داخلی	
۲	۱۰۰۰	۳۰	حفره داخلی	
۳	۱۲۰۰	۳۰	بدون عیب	
۴	۸۰۰	۵۰	بدون عیب	
۵	۱۰۰۰	۵۰	بدون عیب	
۶	۱۲۰۰	۵۰	بدون عیب	
۷	۸۰۰	۷۰	بدون عیب	
۸	۱۰۰۰	۷۰	بدون عیب	
۹	۱۲۰۰	۷۰	بدون عیب	
۱۰	۸۰۰	۹۰	بدون عیب	
۱۱	۱۰۰۰	۹۰	بدون عیب	
۱۲	۱۲۰۰	۹۰	بدون عیب	
۱۳	۸۰۰	۱۱۰	بدون عیب	
۱۴	۱۰۰۰	۱۱۰	بدون عیب	
۱۵	۱۲۰۰	۱۱۰	بدون عیب	

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 می‌شود، 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 می‌گردد و سبب افزایش حرارت در سمت پیشرونده نسبت به پسرونده می‌شود [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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



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، ک)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 A6061در سمت پسرونده اتصال و فلز پایه است AA6061 است.

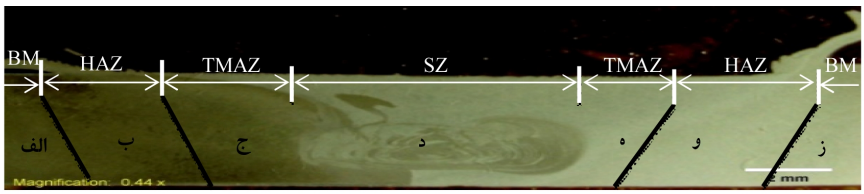
در شکل(۴) و شکل(۵) ریزساختار اولیه ورق‌های AA2024 و AA6061 حاصل از میکروسکوپ نوری نشان داده شده است.اندازه دانه‌های فلز پایه AA2024 بین ۳۰ تا ۵۰ میکرومتر و برای فلز پایه AA6061 بین ۳۹ تا ۴۳ میکرومتر مشاهده شد. میانگین اندازه ترکیبات بین فلزی نامحلول موجود در فلزات پایه AA2024 و AA6061 به ترتیب ۷/۱ و 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 Cu_2FeAl_7 برای AA2024 و $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ 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 Cu_2FeA_{l7} است. اندازه دانه‌ها در منطقه اغتشاش از ۲ تا ۱۰ میکرون متغیر است. متوسط اندازه دانه‌ها در منطقه اغتشاش، نوع فاز، متوسط اندازه فاز و درصد حجمی فاز برای تمامی نمونه‌ها

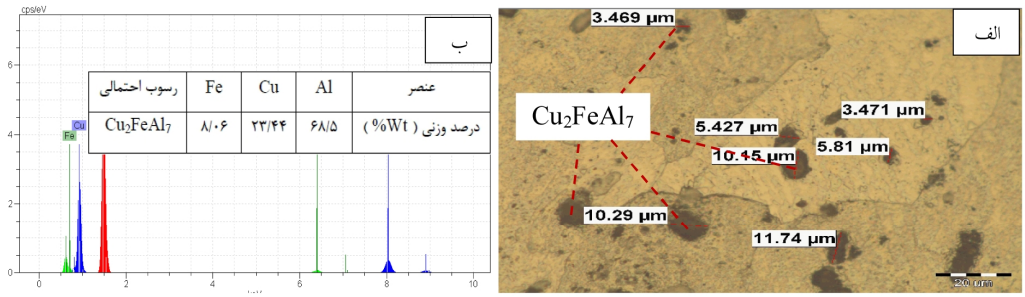
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

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

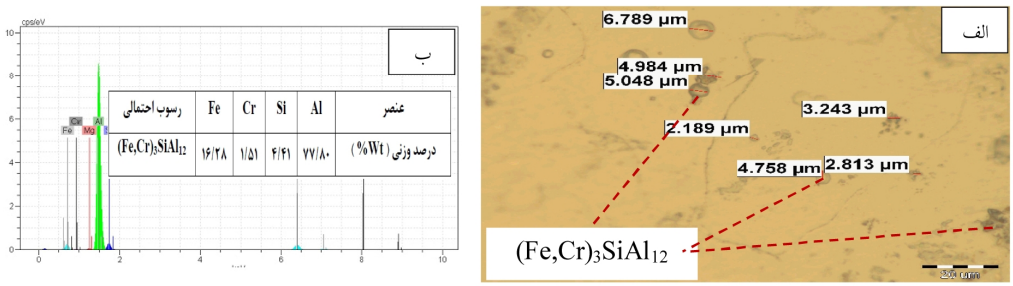
عنصر	Al	Cu	Mn	Fe	Si	Mg	فاز احتمالی
درصد وزنی A (%Wt)	۶۷/۱۲	۱۱/۹۳	۴/۸۴	۱۱/۹۵	۴/۱۵	-	Cu_2FeAl_7
درصد وزنی B (%Wt)	۹۲/۷۱	۶/۱۸	-	-	-	۱/۱۱	AA2024
درصد وزنی C (%Wt)	۹۹/۱۴	۰/۰۳	-	-	-	۰/۸۳	AA6061



شکل۳- تصویر ماکروسکوپی از مقطع عرضی اتصال AA2024 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.

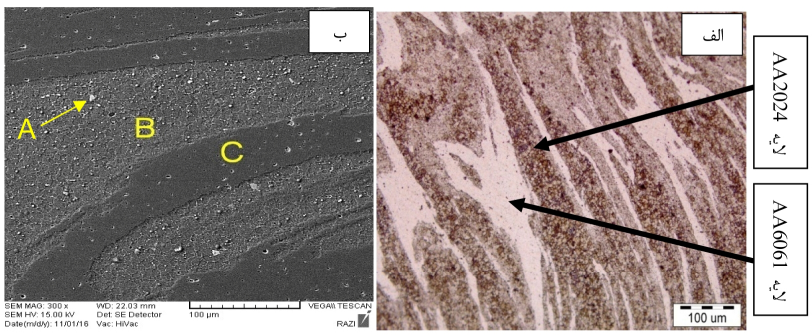
شکل(۷) رابطه اندازه دانه در منطقه اغتشاش را با سرعت پیشروی در سرعت های چرخشی ثابت ۸۰۰ ،۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش سرعت پیشروی در سرعت چرخشی ثابت اندازه دانه‌ها کاهش می یابد. دلیل این امر این است که افزایش سرعت پیشروی باعث کاهش حرارت ورودی و کاهش زمان برای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

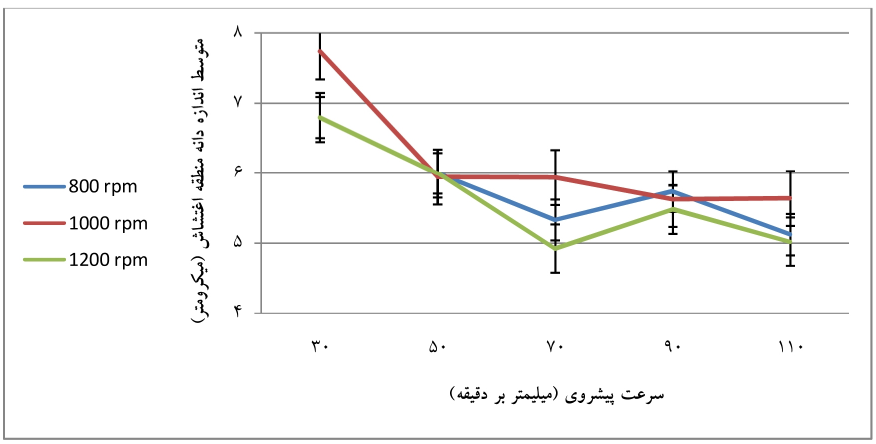
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول ۶- مشخصات فازها و اندازه دانه نمونه ها.

نمونه	سرعت چرخشی ω (rpm)	سرعت پیشروی v (mm/min)	متوسط اندازه دانه ها در منطقه اغتشاش (µm)	نوع فاز	درصد حجمی فاز	متوسط اندازه فاز در منطقه اغتشاش (µm)
۱	۸۰۰	۳۰	۷/۴۱	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۵	۱/۶۳
۲	۱۰۰۰	۳۰	۷/۷۴	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۲	۱/۲۴
۳	۱۲۰۰	۳۰	۶/۸۰	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۳/۶	۲/۷۳
۴	۸۰۰	۵۰	۵/۸۱	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۴	۱/۲۲
۵	۱۰۰۰	۵۰	۵/۹۵	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۹	۱/۴۳
۶	۱۲۰۰	۵۰	۶	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۷	۲/۴۵
۷	۸۰۰	۷۰	۵/۳۳	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۳	۲/۳۸
۸	۱۰۰۰	۷۰	۵/۹۴	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۳/۳	۲/۲۸
۹	۱۲۰۰	۷۰	۴/۹۲	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۵	۱/۳۲
۱۰	۸۰۰	۹۰	۵/۷۴	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۹	۲/۳۴
۱۱	۱۰۰۰	۹۰	۵/۶۳	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۳/۴	۲/۴۷
۱۲	۱۲۰۰	۹۰	۵/۴۸	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۳/۱	½
۱۳	۸۰۰	۱۱۰	۵/۱۲	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۷	۱/۸
۱۴	۱۰۰۰	۱۱۰	۵/۶۴	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۸	۱/۹
۱۵	۱۲۰۰	۱۱۰	۵/۰۲	$(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$, Cu_2FeAl_7	۲/۲	۱/۵

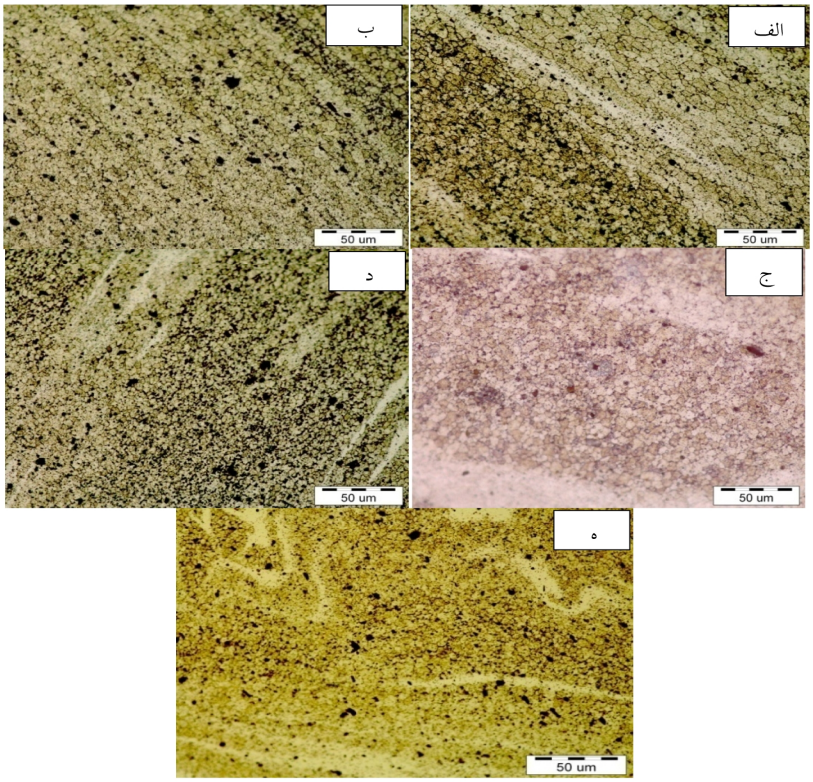


شکل ۶- تصاویر ناحیه اغتشاش نمونه ۸ ، الف) تصویر میکروسکوپ نوری مناطق لایه ای و ب) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مناطق لایه ای.

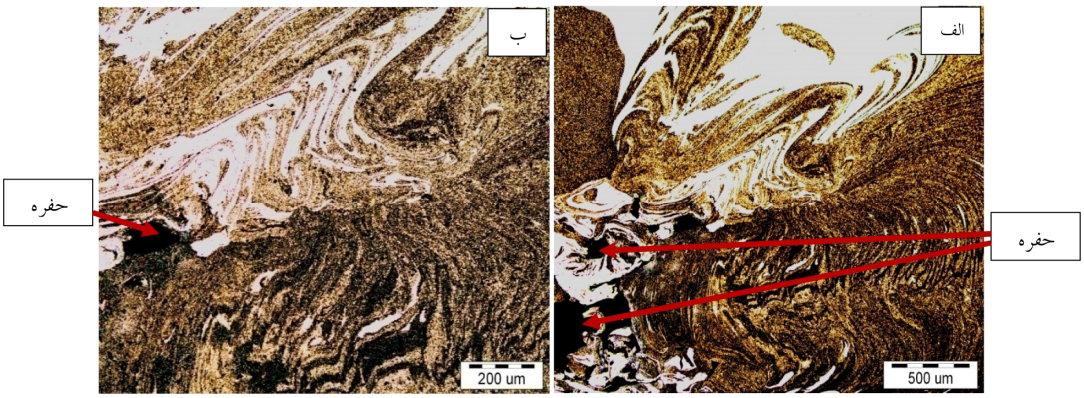


شکل ۷- رابطه متوسط اندازه دانه در منطقه اغتشاش با سرعت پیشروی در سرعت های چرخشی ثابت .

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ نوری ناحیه اغتشاش در سرعت چرخشی ثابت۱۰۰۰ rpm ; الف) سرعت پیشروی۳۰ mm/min ، ب) سرعت پیشروی۵۰ mm/min ، ج) سرعت پیشروی۷۰ mm/min ، د) سرعت پیشروی۹۰ mm/min ، ه) سرعت پیشروی۱۱۰ mm/min .



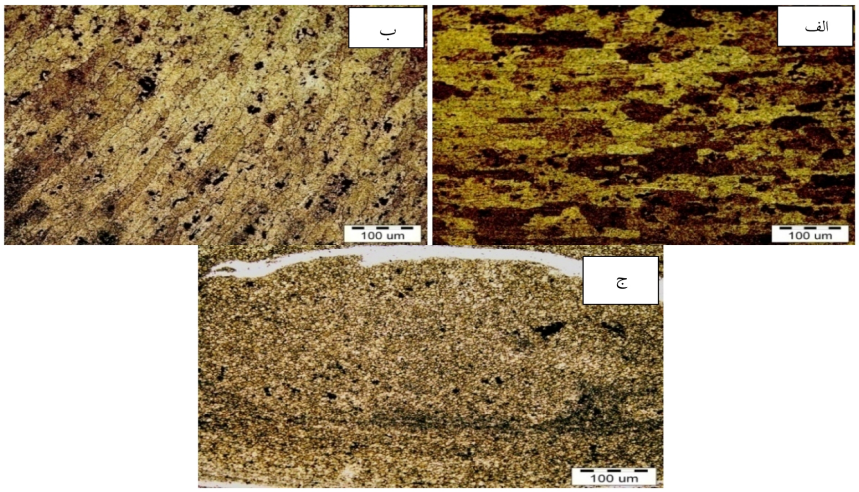
شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ نوری از حفرات در ناحیه اغتشاش نمونه ۲.

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.

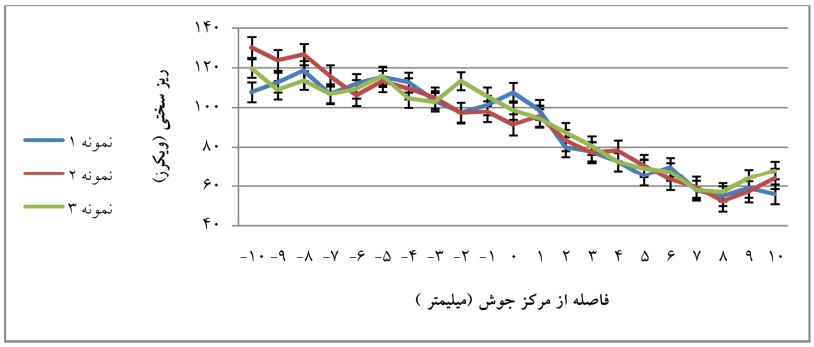
با عبور از سمت ناحیه اغتشاش به سمت فلز پایه، ناحیه‌ای به نام ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی(TMAZ)[1] مشاهده می‌شود. ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی از دانه‌های تغییر شکل یافته تشکیل شده است. دانه‌ها در ناحیه متأثر از حرارت و کار مکانیکی دچار تغییر شکل و کشیدگی شده و نسبت وجوه در آن‌ها زیاد شده است.

1 -Thermo mechanically affected zone

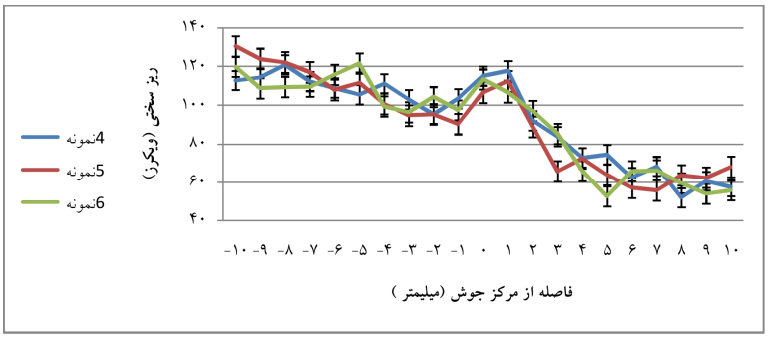
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپی ناحیه جوش نمونه ۴، الف) ناحیه HAZ فلز ۲۰۲۴، ب) ناحیه TMAZ فلز۲۰۲۴، ج) ناحیه اغتشاش.



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



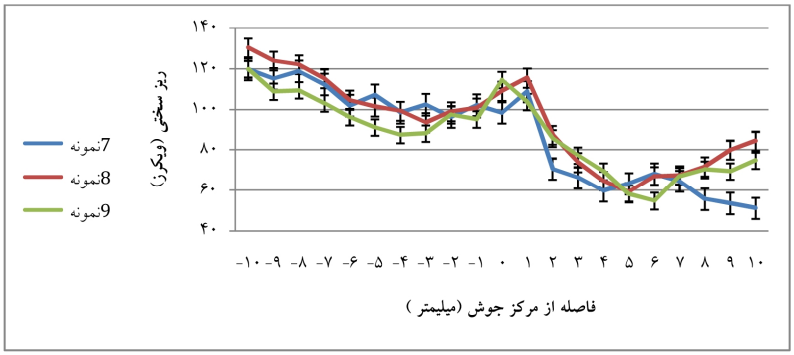
شکل ۱۲- نمودار ریز سختی منطقه جوش در نمونه های ۴ ، ۵ و ۶ .

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].

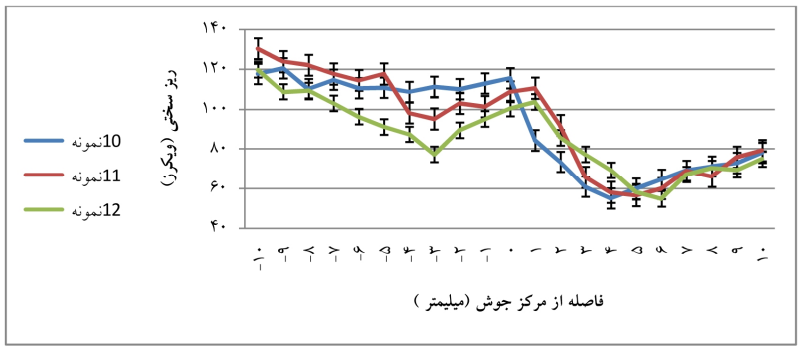
در ناحیه متاثر از حرارت(HAZ)[1] ، تغییر قابل ملاحظه‌ای در اندازه دانه مشاهده می‌شود. بطوریکه دانه ها افزایش چشمگیری نسبت به ناحیه اغتشاش دارند، زیرا در این ناحیه بر خلاف ناحیه اغتشاش هیچ گونه عملیات کار مکانیکی رخ نمی‌دهد و تنها حرارت ناشی از چرخش ابزار در این ناحیه دخیل است. بنابراین دانه‌ها در این ناحیه رشد یافته که در

1 -Heat affected zone

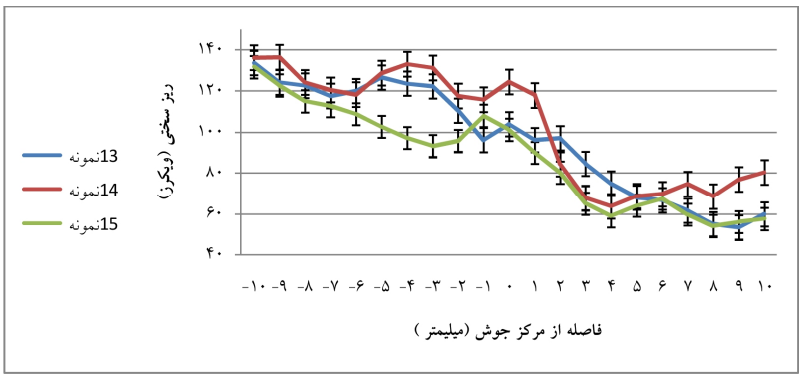
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



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.

نتیجه می‌تواند 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. اندازه‌گیری ریزسختی 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 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 می‌شود در تمامی نمونه‌ها میانگین سختی در ناحیه اغتشاش تفاوت چشمگیری با یکدیگر ندارند.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

جدول ۷- نتایج ریز سختی سنجی نمونه ها.

نمونه	سرعت چرخشی ω (rpm)	سرعت پیشروی v (mm/min)	میانگین ریز سختی منطقه جوش (ویکرز)	نمونه	سرعت چرخشی ω (rpm)	سرعت پیشروی v (mm/min)	میانگین ریز سختی منطقه جوش (ویکرز)
۱	۸۰۰	۳۰	۱۰۲/۶۵	۹	۱۲۰۰	۷۰	۱۰۲/۴
۲	۱۰۰۰	۳۰	۱۰۱/۹	۱۰	۸۰۰	۹۰	۱۰۶
۳	۱۲۰۰	۳۰	۹۲/۶	۱۱	۱۰۰۰	۹۰	۱۰۱/۵
۴	۸۰۰	۵۰	۱۰۰/۹	۱۲	۱۲۰۰	۹۰	۱۰۷/۴۵
۵	۱۰۰۰	۵۰	۹۵/۲	۱۳	۸۰۰	۱۱۰	۱۰۷/۷
۶	۱۲۰۰	۵۰	۱۰۰/۱	۱۴	۱۰۰۰	۱۱۰	۱۱۱/۰۵
۷	۸۰۰	۷۰	۱۰۵/۰۵	۱۵	۱۲۰۰	۱۱۰	۱۰۸/۶
۸	۱۰۰۰	۷۰	۱۰۲/۶۵				

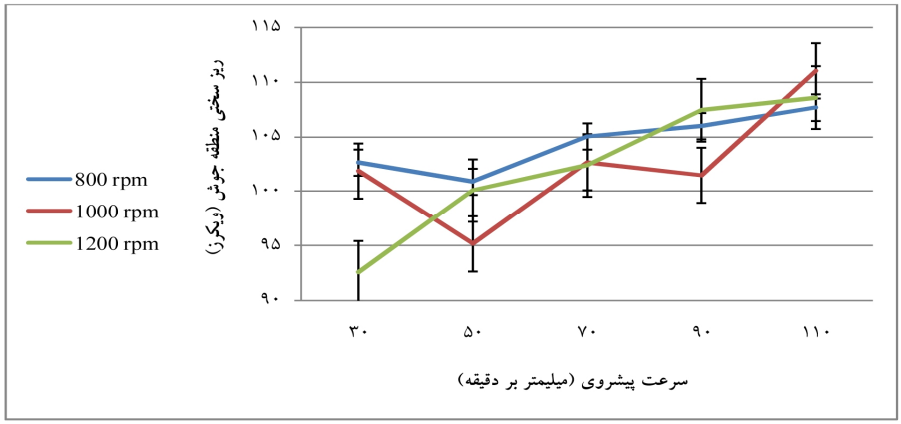
جدول ۸- نتایج آزمون کشش نمونه های جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی.

نمونه	استحکام کششی (N/mm^2)	درصد ازدیاد طول	محل شکست
۱	۱۹۶/۵	۳/۷۵	ناحیه جوش (پسرونده)
۲	۱۹۸/۸۸	۳/۴۹	ناحیه جوش (پسرونده)
۳	۲۰۶	۳/۵۳	ناحیه جوش (پسرونده)
۴	۲۰۲/۳	۳/۵۱	ناحیه جوش (پسرونده)
۵	۲۰۰/۱۳	۳/۵۹	ناحیه جوش (پسرونده)
۶	۲۰۶/۸۸	۳/۵۴	ناحیه جوش (پسرونده)
۷	۱۹۴/۳۸	۳/۵۳	ناحیه جوش (پسرونده)
۸	۲۱۵/۶۳	۲/۹۲	ناحیه جوش (پسرونده)
۹	۲۰۹/۱۳	۳/۲۹	ناحیه جوش (پسرونده)
۱۰	۲۰۹/۱۳	۳/۲۹	ناحیه جوش (پسرونده)
۱۱	۲۰۸/۳	۳/۳۹	ناحیه جوش (پسرونده)
۱۲	۲۰۷/۸۸	۳/۳۶	ناحیه جوش (پسرونده)
۱۳	۲۰۸	۳/۱۵	ناحیه جوش (پسرونده)
۱۴	۲۲۱/۶	۳/۰۱	ناحیه جوش (پسرونده)
۱۵	۲۲۰/۶۳	۳/۱۰	ناحیه جوش (پسرونده)

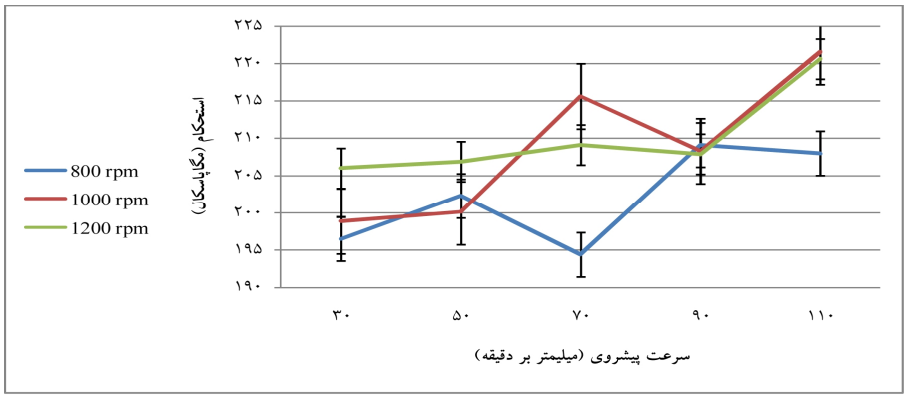
تفاوت میان آلیاژها باعث نوسان سختی در ناحیه اغتشاش و یک کاهش بزرگ هنگام عبور از منطقه متشکل از دو آلیاژ به سمت آلیاژ ۶۰۶۱ می‌شود. پراکندگی مقادیر سختی در ناحیه اغتشاش می‌تواند به دلیل ایجاد الگوهای حلقه پیازی باشد. افزایش سختی در منطقه اغتشاش به دلیل وقوع پدیده تبلور مجدد که منجر به کاهش اندازه دانه می شود. همچنین به وضوح مشخص است که به محض خارج‌شدن از ناحیه اغتشاش مقدار سختی کاهش قابل‌ملاحظه‌ای یافته است که علت آن‌را می‌توان به عدم رخ دادن پدیده تبلور مجدد در خارج از ناحیه اغتشاش نسبت داد. از طرف دیگر نیز می‌توان 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 می‌تواند بالاتر بودن مقدار سختی فلز پایه 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

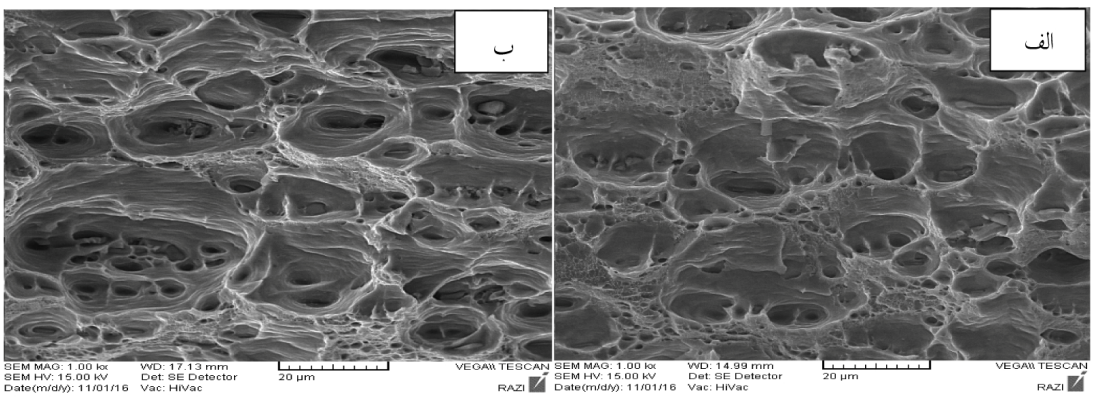
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]



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 ، استحکـام اتصـالات 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 نشـان از شکست حالت نرم دارد. در میان تمامی نمونه‌ها،

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

نمونه ۷ با مقدار ۱۹۴/۳۸ مگاپاسکال دارای کمترین و نمونه ۱۴ با مقدار ۲۲۱/۶ مگا پاسکال دارای بیشترین میزان استحکام کششی هستند. دلیل این تفاوت آن می‌تواند وجود حفره در نمونه ۷ و از طرفی دیگر کوچکتر بودن اندازه دانه در نمونه ۱۴ نسبت به نمونه‌های دیگر باشد. همان‌طور که در شکل(۱۷) مشاهده می‌شود 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 می‌یابد که نهایتا موجب کوچکتر شدن اندازه دانه می گردد. ریز شدن دانه ها باعث افزایش مرزدانه ها و ممانعت بیشتر در مقابل حرکت نابجایی‌ها و در نتیجه سبب افزایش استحکام کششی نمونه ها می شود. می‌توان اینگونه استنباط نمود که، اندازه دانه در منطقه اغتشاش تعیین کننده مقدار استحکام کششی است، بدین صورت که هرچه اندازه دانه ها ریزتر، استحکام کششی بیشتر می‌گردد. جدول(۸) نتایج آزمون کشش نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

برای بررسی بهتر چگونگی شکست نمونه ها از ناحیه جوش، سطح شکست نمونه های ۷ و ۱۴ که به ترتیب دارای پایین‌ترین 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 کنترل متغیرهای جوشکاری اصطکاکی 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 ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ دور بر دقیقه به علت کاهش حرارت ورودی، اندازه دانه‌ها کاهش یافت.

- اندازه و کسر حجمی رسوبات Cu_2FeAl_7 و $(Fe,Cr)_3SiAl_{12}$ 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 مگاپاسکال در سرعت چرخشی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]

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 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-21]