



بررسی اتصال غیر مشابه Al2024-T4 و Al6061-T6

ایجاد شده توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

سیده راضیه انوری^{۱*}

استادیار، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

sr.anvari@daneshpajoohan.ac.ir

صفورا عشاقی^۲

مربی، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

oshaghi@daneshpajoohan.ac.ir

حمیدرضا هاشمی^۳

دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مواد- جوشکاری، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

hhashemi93@yahoo.com

چکیده

آلیاژهای آلومینیم به دلیل داشتن خواص منحصر به فردی مانند نسبت استحکام به وزن بالا، جوش پذیری خوب و شکل پذیری عالی و مقاومت به خوردگی مناسب به شکل گسترده در انواع سازه ها، صنایع هوایی و دریایی استفاده می شوند. از همین رو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اولین بار برای آلیاژهای آلومینیمی که به روش های سنتی قابل جوشکاری نبودند یا به سختی جوشکاری می شدند ابداع شد. هدف از این پژوهش ارزیابی و بررسی اتصالات آلیاژهای آلومینیم ۲۰۲۴ و ۶۰۶۱ ایجاد شده توسط فرایند اصطکاکی اغتشاشی است. در این پژوهش به بررسی پارامترهای مختلف موثر بر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت دستیابی به پارامترهای بهینه پرداخته شد. زاویه انحراف ابزار ۳ درجه در نظر گرفته شد. در این پژوهش جهت بررسی های ریز ساختاری از میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نوری استفاده شد. باتوجه به جوشکاری نمونه ها و بررسی ظاهر اتصالات ایجاد شده، سرعت چرخشی ۸۰۰ rpm و سرعت پیشروی ۶۰ mm/min جهت ایجاد اتصال مناسب انتخاب شد.

واژه های کلیدی: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴، آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۱، سرعت پیشروی، سرعت چرخشی،

ریز ساختار

^۱ - استادیار، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

* نویسنده مسئول: sr.anvari@daneshpajoohan.ac.ir

^۲ - مربی، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو

^۳ - دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مواد- جوشکاری، موسسه آموزش عالی دانش پژوهان پیشرو



۱- مقدمه

گرفته است، هرچند در رابطه با فلزات دیگر نظیر آلایزهای منیزیم، آهن خالص انواع فولاد و غیره نیز تحقیقات انجام شده است (Suryakanta et al. 2021, Mengran et al. 2022). ابزار اصلی فرآیند شامل پین^۲ و شانه^۳ است، این ابزار دارای حرکت دورانی است و با فرو رفتن در داخل قطعه با سرعت ثابت به سمت جلو پیش می رود و فرآیند جوشکاری انجام می شود.

در اثر حرکت ابزار دو اتفاق رخ می دهد: (۱) بالا رفتن دما (۲) حرکت (سیلان) ماده. افزایش دما در حین جوشکاری از دو منبع سرچشمه می گیرد، (الف) اصطکاک میان شانه ابزار و سطح قطعه (ب) تغییر شکل پلاستیک ماده. بالا رفتن دما خود موجب نرم شدن ماده می گردد و در حالیکه دما پایین تر از نقطه ذوب است اتصال بین دو قطعه ایجاد می شود. جهت حرکت ماده از سمت پیشرو^۴ به سمت پسرو^۵ است. در سمت پیشرو حرکت ماده در سطح هم جهت با پیشروی ابزار و در سمت پسرو جهت حرکت ماده در سطح مخالف جهت پیشروی ابزار است. الگوی سیلان ماده بسیار پیچیده است این الگو تابع سه پارامتر است: (۱) هندسه ابزار (طراحی پین، شانه و ابعاد آنها)، (۲) پارامترهای فرآیند (سرعت خطی، سرعت دورانی، عمق نفوذ و زاویه انحراف) و (۳) جنس ماده (Haribalaji and Sampath 2021). شکل ۱ شماتیکی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را نشان می دهد. در این تصویر وضعیت پین، شانه و موقعیت سمت پیشرو و پسرو مشخص شده است. در این مقاله به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر دستیابی به اتصال غیرهمجنس و بدون نقص پرداخته شده است.

آلومینیوم و آلایزهای آن پس از فولاد، از جمله پرمصرف ترین آلایزهای فلزی هستند. ویژگی های بی نظیر آلایزهای آلومینیوم از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی نسبتا خوب و هدایت الکتریکی و گرمایی زیاد، سبب شده که این آلایزها در صنایع مختلف نظیر خودروسازی، هوافضا، ساختمان سازی و بسته بندی مواد غذایی استفاده شوند (Das 2014, Jini, Selvam and Pughalendi 2021, Basavegowda, Mandal and Baek 2020). در میان آلایزهای آلومینیوم، آلایز ۲۰۲۴ رامی توان شناخته شده ترین و در عین حال پرکاربردترین آلایز در صنایع هوافضا دانست (Gara, Ramachandran and Rengaswamy 2021). آلایزهای گروه ۶۰۰۰ با داشتن خواص ویژه نظیر شکل پذیری خوب، جوش پذیری مناسب و مقاومت به خوردگی نسبتا بالا به طور گسترده در صنایع هوافضا و خودروسازی مورد استفاده قرار گرفته اند (Chandla, Kant & Goud 2021, Ogunsanya et al. 2022).

یکی از روش های مناسب جهت اتصال آلایزهای آلومینیوم فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی^۱ (FSW) است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرآیند ترمومکانیکال محسوب می شود که برای اتصال قطعات به خصوص قطعات آلومینیوم مورد استفاده قرار می گیرد.

اساس کار فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر پایه تغییر شکل پلاستیک است، هدف انجام آن اتصال دو قطعه است. اکثر تحقیقات انجام شده روی آلایزهای آلومینیوم صورت

^۴- Advancing side

^۵-Retreating side

^۱-Friction Stir Welding (FSW)

^۲-Probe

^۳-Shoulder



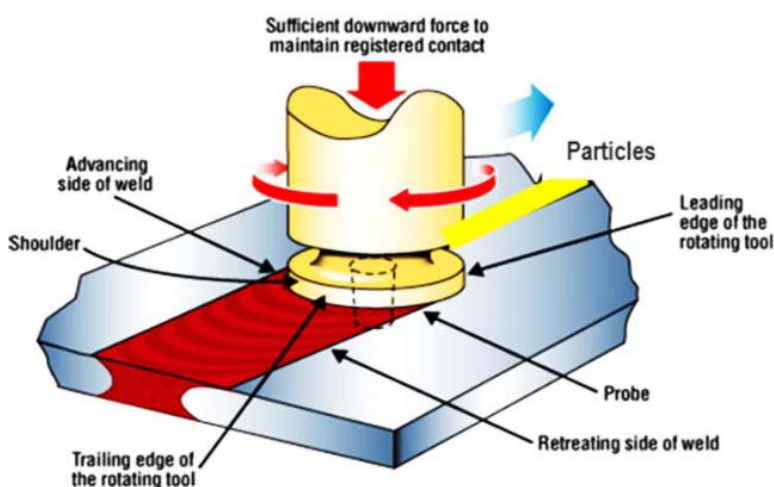
دولت، محسن، کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار و عمران شهری

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش جهت تهیه ی نمونه‌ها با از ورق‌های آلومینیم Al6061-T6 و Al2024-T4 به ضخامت ۲ میلی متر و ابزار از جنس فولاد H13 به قطر ۱۰ میلی متر استفاده شده است. جدول ۱ و ۲ ترکیب شیمیایی بدست آمده از نمونه آلیاژهای آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۶۰۶۱ مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد.

از ورق آلومینیم ۲۰۲۴ و ۶۰۶۱ نمونه‌هایی به ابعاد (۲*۱۲۰*۶۰) میلی متر توسط دستگاه گیوتین بریده شد. ابزار مورد استفاده جهت جوشکاری، استوانه ای شکل و از جنس فولاد H13 است. این فولاد به دلیل برخورداری از سختی و مقاومت به سایش بالا، جهت انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مناسب است. شکل ۲ شماتیک ابزار مورد استفاده را نشان می دهد. شکل ۳ تصویر واقعی از ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را نشان می دهد.

۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها و تجهیزات



شکل (۱). شماتیک فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (Mohammadzadeh Khojastehnezhad 2019)

جدول (۱). ترکیب شیمیایی آلیاژ ۲۰۲۴ بدست آمده از آنالیز شیمیایی

عنصر	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Other
درصد	۹۳/۵	۰/۱	۳/۸ - ۴/۹	۰/۵	۱/۸ - ۱/۲	۰/۹	۰/۲۵	جمعاً ۰/۵
						۰/۳		

جدول (۲). ترکیب شیمیایی آلیاژ ۶۰۶۱ بدست آمده از آنالیز شیمیایی

عنصر	Al	Cr	Cu	Fe	Ti	Mn	Zn	Other
------	----	----	----	----	----	----	----	-------



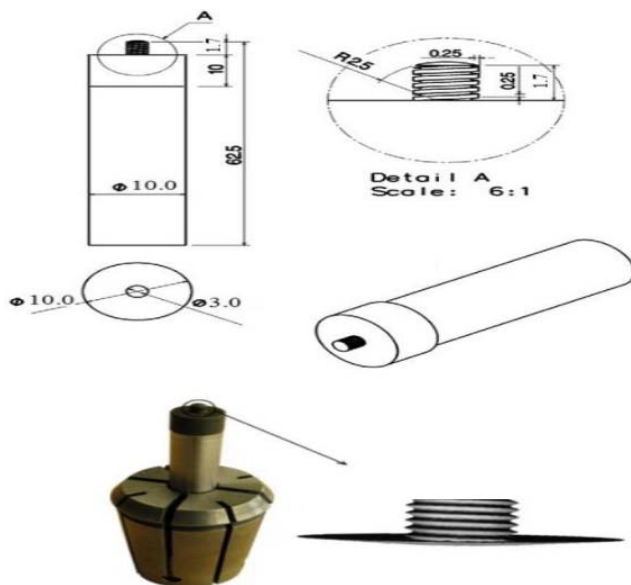
دولت، صنایع، بازرگانی و صنایع دستی

توسعه پایدار و عمران شهری

درصد ۹۵/۶۱ -۰/۴۰ -۰/۱۵ ۰/۷ ۰/۱۵ ۰/۱۵ ۰/۲۵ جمعا ۰/۱۵
۰/۳۵ ۰/۴

جدول ۴ به معرفی پارامترها مختلف و متغیر فرایند که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته اند، پرداخته شده است. در جدول ۵ نمایش نحوه قرار گیری نمونه ها به صورت پیشرو و پسرو ارائه شده است.

جهت انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی از دستگاه فرز FP4M مدل دکل تبریز با سرعت چرخش بین ۵۰ تا ۳۰۰۰ rpm و سرعت پیشروی ۸ تا ۴۰۰ mm/min و جریان برق سه فاز استفاده شد، که در جدول ۳ خصوصیات آن ارایه شده است. در



شکل (۲). تصویر شماتیک و تصویر حقیقی ابزار مورد استفاده

جدول ۳. مشخصات دستگاه جوشکاری

مدل دستگاه	FP4M
سرعت پیشروی	۴۰۰ تا ۸ mm/min
سرعت چرخش	۳۰۰۰ تا ۵۰ rpm
زاویه چرخش	۰ تا ۹۰ درجه
توان دستگاه	۳۸۰ ولت سه فاز



شکل (۳). ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی



دولت، مهندسین، کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار و عمران شهری

جدول (۴). پارامترهای موثر بر فرایند اصطکاکی اغتشاشی مورد استفاده در این پژوهش

ردیف	سرعت چرخش ابزار (rpm)	سرعت پیشروی ابزار (mm/min)	زاویه انحراف ابزار
۱	۴۰۰	۲۵	۳ درجه
۲	۶۰۰	۲۵	۳ درجه
۳	۸۰۰	۴۰	۳ درجه
۴	۱۰۰۰	۴۰	۳ درجه
۵	۸۰۰	۶۰	۳ درجه

جدول (۵). نحوه قرار گیری نمونه ها در جهت های مختلف حین جوشکاری

نمونه شماره ۱	نمونه شماره ۲
قطعه ۶۰۶۱ در جهت پیشرو، قطعه ۲۰۲۴ پسرو	قطعه ۲۰۲۴ در جهت پیشرو، قطعه ۶۰۶۱ پسرو

۲-۲- بررسی های ریز ساختاری

به منظور مطالعه ریز ساختار منطقه جوش، منطقه متاثر از کار مکانیکی و حرارت^۱ (TMAZ) و فلز پایه از میکروسکوپ نوری^۲ استفاده شد. این بررسی ها از نمونه های جوشکاری شده به گونه ای تهیه شد که تمامی نقاط از جمله منطقه جوش، ناحیه متاثر از کار مکانیکی و حرارت و فلز پایه را شامل شود. تهیه نمونه به این صورت انجام شد که ابتدا نمونه ها جهت تست متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی^۳ توسط دستگاه ویرکات به ابعاد (۱۰*۳۰) میلی متر بریده شد و در آزمایشگاه متالوگرافی ابتدا قطعات بوسیله فرایند مانت گرم قالب گیری شدند. سپس

نمونه ها بوسیله ی سنباده های ۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۰۰۰ آماده سازی شدند و پولیش نهایی با استفاده از محلول آلومینا در آب مقطر و صفحه پولیش نمدی انجام شد. نمونه آلومینوم ۲۰۲۴ توسط محلول ۱۹۰ میلی لیتر آب+۳ میلی لیتر اسید هیدروفلوئوریک ۱۰+ میلی لیتر اسید هیدرو کلریدریک به مدت ۱۵ اچ شد، جهت انجام عملیات اچ روی آلیاژ ۶۰۶۱ به دلیل اینکه این آلیاژ دارای مقدار زیادی منیزیم به عنوان عنصر آلیاژی در ساختار خود است، منیزیم در مرز دانه ها رسوب کرده و از خوردگی مرز دانه ها در اثر عملیات اچ کردن جلوگیری می کند، لذا از روش های معمول اچ نمی توان جهت بررسی ریز ساختار در این

³- Scanning electron microscope

¹-Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)

²- Optical Microscope



دولت، محسن کفر زن بیشتر

توسعه پایدار و عمران شهری

در این بخش در ابتدا ظاهر نمونه های متصل شده مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۶ ارتباط میان پارامترهای جوشکاری را با ظاهر اتصالات ایجاد شده نشان می دهد. در مقادیر کم سرعت چرخش نسبت به سرعت پیشروی ابزار، اغتشاش به حدی نبوده تا منجر به ایجاد اتصال شود به همین جهت جوشکاری این نمونه ها به صورت معیوب صورت گرفت. در مقادیر بالای نسبت سرعت چرخش ابزار به سرعت پیشروی ابزار حرارت ورودی اضافی، به بالا رفتن دمای جوش می انجامد که در منطقه اغتشاش، ذوب موضعی و تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد را موجب می شود. براساس نتایج به دست آمده مقدار بهینه سرعت چرخش ابزار و سرعت پیشروی ابزار به ترتیب ۸۰۰ دور بر دقیقه و ۶۰ میلی متر بر دقیقه بوده است. شکل ۴ نمونه جوشکاری شده را نشان می دهد که به دلیل عدم رعایت پارامترهای بهینه در جوشکاری قطعه به صورت ناقص و معیوب جوشکاری شده است.

شکل های ۴ و ۵ نحوه قرارگیری نمونه ها نسبت به یکدیگر (پیشرو و پسرو بودن) را نشان می دهد.

جدول (۶). ارتباط میان پارامترهای جوشکاری با ظاهر اتصالات ایجاد شده

ردیف	سرعت چرخش ابزار	سرعت پیشروی ابزار	قطعه جوشکاری شده
1	400	25	تخریب و سوراخ شدن قطعه
2	600	25	جوشکاری ناقص و به صورت کرمی شکل
3	800	40	جوشکاری مناسب و شبیه به پارامتر بهینه
4	1000	40	داغ شدن و اعوجاج قطعه
5 ✓	800	60	جوشکاری با کیفیت و پارامتر بهینه

آلیاژ استفاده کرد. به همین دلیل پس از سمباده زنی نمونه ها تا شماره ۲۰۰۰، نمونه ها با استفاده از الکترولیت اسید پرکلریک در ولتاژ مستقیم ۸۰ ولت الکترو پولیش شدند. با استفاده از عملیات الکتروپولیش بجای پولیش مکانیکی دانه ها در جهت صفحات کریستالی خود پولیش می شوند و این پدیده در آشکار سازی دانه ها با استفاده از میکروسکوپ نوری بسیار موثر خواهد بود.

جهت بررسی های متالوگرافی از دستگاه میکروسکوپ نوری METALLUX با لنز چشمی CANON DS 126431 ساخت ژاپن با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر استفاده شد.

به منظور بررسی فازهای عمومی در بزرگنمایی بیشتر از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به سیستم آنالیز EDX با بزرگنمایی تا 20000 برابر از دستگاه مدل VEGA TEACAN-XMU// استفاده گردید.

۴- نتایج و بحث



دولت، همبستر کنفرانس بین المللی توسعه پایدار و عمران شهری

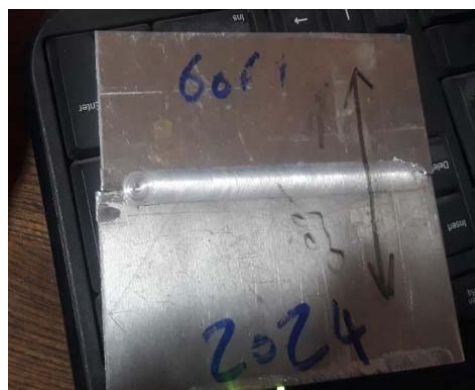
در ادامه به بررسی ریز ساختارهای مناطق مختلف اتصال که شامل تصاویر متالوگرافی با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی پرداخته می شود و در ادامه خواص مکانیکی نظیر ریز سختی سنجی و کشش نمونه ها مورد بررسی قرار می گیرد.



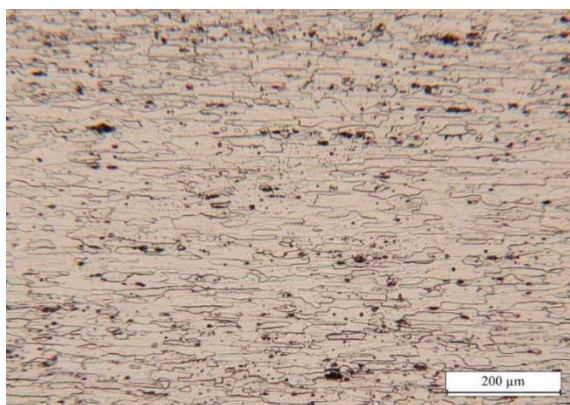
شکل (۴). نمونه جوشکاری شده معیوب

۱-۴- بررسی های ریز ساختاری

جهت بررسی های ریز ساختاری ابتدا فلز پایه، ۲۰۲۴ و ۶۰۶۱ و سپس مناطق مختلف فلز جوش، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه متأثر از کار مکانیکی و حرارت مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۷ ریز ساختار و دانه بندی آلومینیوم ۲۰۲۴ را نشان می دهد.



شکل (۵). وضعیت قرار گیری نمونه ها نسبت به یکدیگر (آلیاژ ۲۰۲۴ در سمت پیشرو)



شکل (۷). ریز ساختار فلز پایه آلومینیوم ۲۰۲۴

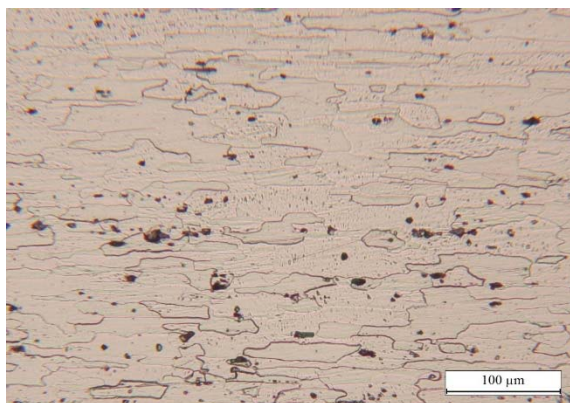
به منظور بررسی تاثیر فرآیند FSW بر ساختار فلز پایه ریز ساختار نواحی مختلف آن با کمک میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. ریز ساختار فلز پایه قبل از اعمال فرآیند FSW به خوبی کشیدگی دانه ها که حاصل از فرآیند نورد به روی ورق های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ است را نشان می دهد. ریز ساختار فلز پایه شامل دانه های کشیده است همانطور



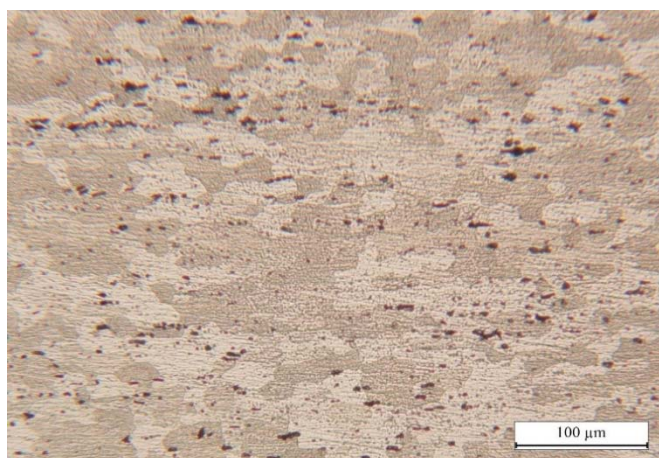
شکل (۶). وضعیت قرار گیری نمونه ها نسبت به یکدیگر (آلیاژ ۶۰۶۱ در سمت پیشرو)



دولت، محسن، کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار و عمران شهری



شکل (۹). ریز ساختار آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ بعد از انجام جوشکاری FSW

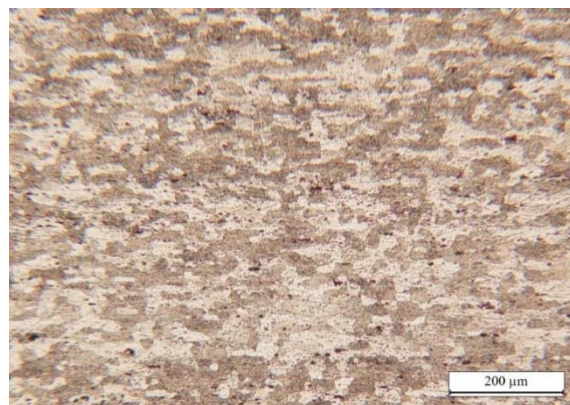


شکل (۱۰). ریز ساختار آلیاژ ۶۰۶۱ بعد از انجام جوشکاری FSW

شکل ۱۱ ریز ساختار منطقه اتصال را نشان می دهد. در این تصویر نواحی موجود در محل اتصال دو قطعه به یکدیگر مشخص شده‌اند، ناحیه شماره (۱) مربوط به ناحیه متأثر از کار مکانیکی و حرارت و ناحیه شماره (۲) ناحیه اغتشاش است. مطابق این تصویر، ملاحظه می شود که در مناطق مختلف در واقع گرادیانی از تغییر شکل و سیکل حرارتی که در طی فرایند برای این نواحی رخ می دهد سبب تفاوت های ساختاری

که در شکل مشاهده می شود، رسوبات با رنگ تیره در ساختار دیده می شوند و در بزرگنمایی بالاتر ملاحظه می شود که در داخل دانه و مرزدانه پراکنده شده اند.

شکل ۸ ریز ساختار و دانه بندی آلومینیم ۶۰۶۱ را نشان می دهد. نواحی روشن در زمینه دانه‌های هم محور آلومینیم و نقاط تیره موجود در تصویر ذرات ناهمگن و رسوبات (Mg_2Si) را مشخص می کند. شکل ۹ ریز ساختار آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ در نمونه شماره (۲) بعد از انجام جوشکاری FSW را نشان می دهد. با بررسی این تصویر و مقایسه آن با حالت قبل از جوشکاری مشخص شد در اثر انجام فرایند FSW در این ناحیه تغییرات ریز ساختاری چندانی رخ نداده است. با بررسی تصویر میکروسکوپ نوری از فلز پایه طرف قطعه ۶۰۶۱ مطابق شکل ۱۰ در نمونه شماره (۱) و مقایسه آن با حالت قبل از جوشکاری (شکل ۸) مشخص شد در اثر انجام فرایند FSW در این ناحیه تغییرات ریز ساختاری چندانی رخ نداده است.



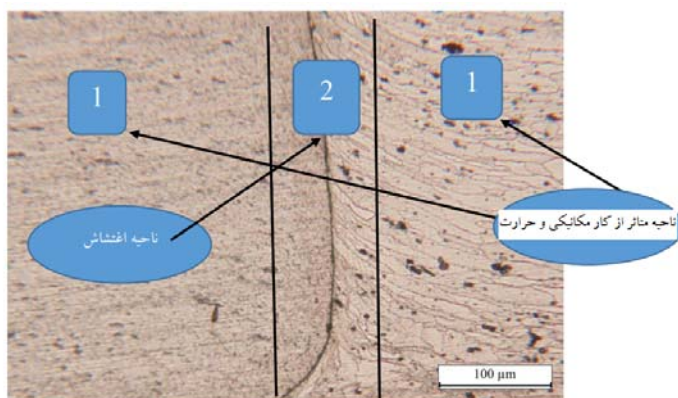
شکل (۸). ریز ساختار فلز پایه آلومینیم ۶۰۶۱



دولت، مهندس کشاورزی پیشرو توسعه پایدار و عمران شهری

ریزساختار ناحیه مرکزی فرایند شامل دانه های ریز هم محور ناشی از تبلور مجدد دینامیکی هستند. همچنین دیگر اثری از رسوبات درشت نیست. بخشی از این رسوبات در اثر افزایش دما در حین فرایند انحلال یافته اند و بخش دیگری از آنها در اثر وجود تنش برشی در این ناحیه خرد شده و آنقدر ریز شده اند که توسط میکروسکوپ نوری قابل مشاهده نیستند (ابن النصیر ۱۳۸۷).

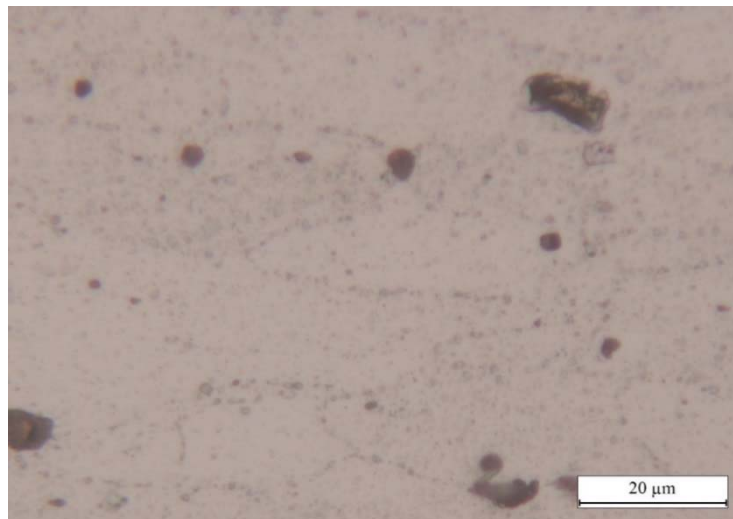
می شود. بر این اساس در ناحیه مرکزی فرآیند (ناحیه اغتشاش) به علت حرکت دورانی پین، تغییر شکل شدید پلاستیکی رخ می دهد، که توأم با افزایش دما ناشی از این تغییر شکل و همچنین اصطکاک میان شانه ابزار و سطح ورق، شرایط مساعد برای وقوع تبلور مجدد دینامیکی را فراهم می آورد. با دور شدن از مرکز فرآیند از میزان افزایش دما و همچنین تغییر شکل کاسته می شود، به طوری که در منطقه متأثر از حرارت هیچ تغییر شکلی رخ نمی دهد (زحمتکش ۱۳۸۹).



شکل (۱۱). ریزساختار محل اتصال در نمونه شماره ۱

مرکزی و همچنین فصل مشترک ابزار و قطعه است. تغییر شکل کمتر سبب شده است که میزان تبلور مجدد نسبت به ناحیه مرکزی بسیار کمتر باشد و تنها در بخش نزدیک تر به ناحیه مرکزی به صورت جزئی (در برخی دانه ها) رخ داده است. همچنین به دلیل عدم وجود تنش برشی، خرد شدن رسوبات رخ نداده است و در اثر بالا بودن دما در این ناحیه درشت شدن رسوبات حادث شده است (ابن النصیر ۱۳۸۷).

در بررسی ریز ساختار مربوط به ناحیه متأثر از کار مکانیکی و حرارت مطابق شکل ۱۲ مشاهده شد که اندازه دانه ها تغییرات کمی داشته باشند در توضیح این موضوع می توان این گونه بیان کرد که: همانطور که پیشتر گفته شد تغییر شکل در ناحیه متأثر از کار مکانیکی و حرارت بسیار کم و ناشی از همبستگی ساختار با ناحیه مرکزی فرآیند است همانطور که در شکل دیده می شود در این ناحیه دانه ها به سمت ناحیه مرکزی کشیده شده اند افزایش دما در این ناحیه ناشی از انتقال حرارت از ناحیه

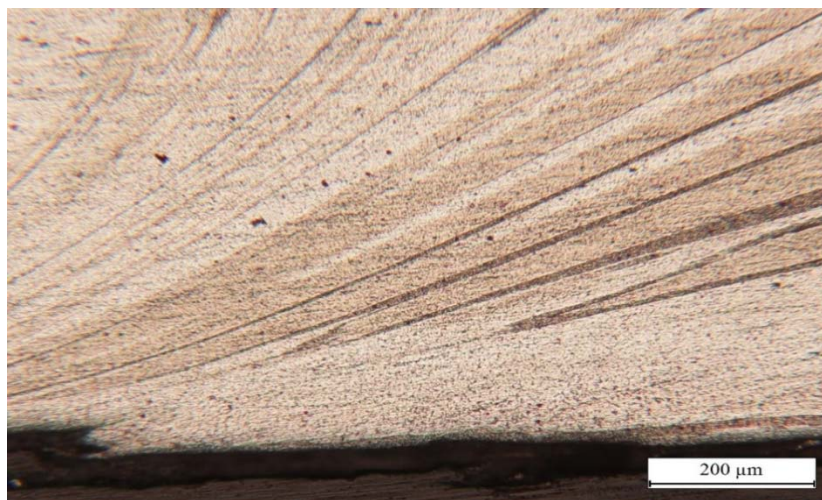


شکل (۱۲). ریز ساختار (نمونه شماره ۱) در منطقه TMAZ

یکی دیگر از خصوصیات منطقه اغتشاش، ایجاد حلقه هایی است مطابق شکل ۱۳ که به حلقه های پیازی^۴ معروف است. این حلقه ها در اثر ایجاد حرارت ناشی از شانه ابزار و همچنین اکستروژن شدن مواد در اثر حرکت ابزار بر روی ورق ایجاد می شود. ضخامت این حلقه ها در وسط منطقه اغتشاش زیاد و با دور شدن به سمت لبه ها از ضخامت آنها کاسته می شود. فاصله میان دو حلقه ارتباط مستقیم با سرعت حرکت ابزار بر روی نمونه و ارتباط عکس نسبت به سرعت چرخشی ابزار دارد (ابن النصیر ۱۳۸۷). از آنجا که سرعت پیشروی در پارامترهای بهینه انتخابی نسبتا بالاست، لذا این حلقه ها به راحتی در ریز ساختار منطقه اغتشاش مشاهده می شود.

در توضیح تاثیر فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روی ناحیه متأثر از حرارت می توان گفت که، ناحیه متأثر از حرارت تنها تحت تأثیر افزایش دمای ناشی از انتقال حرارت از ناحیه مجاور خود (ناحیه متأثر از کار مکانیکی و حرارت) قرار گرفته است و به همین دلیل تغییرات چندانی در مورفولوژی رسوبات ملاحظه نمی شود، همچنین به دلیل همبستگی با ناحیه مجاور میزان کشیدگی کمی در دانه ها ملاحظه می شود و میزان تغییر شکل بسیار کمتر از ناحیه متأثر از کار مکانیکی و حرارت است. به طور کلی ناحیه متأثر از حرارت ریزساختار شبیه به فلز پایه دارد و در واقع ناحیه گذر از تغییر شکل شدید پلاستیک به سمت فلز پایه است (Kissell and Ferry 2002).

⁴ -Onion Rings



شکل (۱۳). پدیده حلقه های پیازی در نمونه فاقد نانو ذرات

۵- نتیجه گیری

و زاویه انحراف ابزار ۳ درجه بهترین شرایط برای جوشکاری مطلوب و کمترین عیب است.

۲- نمونه های جوشکاری شده با سرعت پیشروی کمتر از پارامتر بهینه به دلیل پایین بودن دما، ماده به خوبی خمیری نشده و این موضوع باعث افزایش چگالی نابجایی ها شده و در نتیجه سیلان خوبی بوجود نمی آید که این موضوع باعث ایجاد عیوبی چون پر نشدن سطحی و یا نقص تونلی می شود.

در این پژوهش به بررسی تاثیر سرعت چرخشی و سرعت پیشروی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر ریز ساختار اتصال غیر همجنس Al2024-T4 و Al6061-T6 پرداخته شد.

نتایج بدست آمده در این تحقیق عبارتند از:

۱- نمونه جوشکاری شده با پارامترهای بهینه سرعت چرخش ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، سرعت پیشروی ۶۰ میلی متر بر دقیقه

مراجع

Basavegowda, N., T. K. Mandal, and K. H. Baek. 2020. Bimetallic and Trimetallic Nanoparticles for Active Food Packaging Applications: A Review, Food and Bioprocess Technology 13: 30-44.

Gara, N., V. Ramachandran, and J. Rengaswamy. 2021. Analytical and FEM Analyses of High-Speed Impact Behaviour of Al 2024 Alloy, Aerospace, 8(10), 281:1-21.

Das, S. 2014. Design and Weight Optimization of Aluminium Alloy Wheel, International Journal of Scientific and Research Publications 4(6): 1-12.

Jini, R. R., P. P. Selvam, and M. Pughalendi. 2021. A Review of Aluminum Alloys in Aircraft and Aerospace Industry, Journal of Huazhong University of Science and Technology 50(4):1-



6061 /Al₂O₃-TiB₂ Hybrid Nano-Composite Layer Produced via Friction Stir Processing Using Optimized Process Parameters. Ph.D. Thesis, Eastern Mediterranean University.

Chandla, N. K., S. Kant and M. M. Goud. 2021. Mechanical, tribological and microstructural characterization of stir cast Al-6061 metal/matrix composites—a comprehensive review 46(47): 1-38.

زحمتکش، بابک . ۱۳۸۹. توسعه نانو کامپوزیت سطحی Al-
Al₂O₃ بر روی آلیاژ Al2024 با استفاده از فرایند اصطکاکی
اغتشاشی و ارزیابی رفتار تریبولوژیکی آن. پایان نامه کارشناسی
ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

Ogunsanya, O. A., A. A. Akinwande , O. A. Balogun , V. Romanovski and M. S. Kumar. 2022. Mechanical and damping behavior of artificially aged Al 6061/TiO₂ reinforced composites for aerospace applications:1-13. [DOI:10.1080/02726351.2022.2065652](https://doi.org/10.1080/02726351.2022.2065652)

ابن النصیر، عباس. ۱۳۸۷. توسعه کامپوزیت سطحی Al
6061-Al₂O₃ با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی
و مشخصه یابی آن. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی
اصفهان.

Suryakanta, S., O. Mypati, K. P. Surjya, M. Shome, and P. Srirangam. 2021. Effect of weld parameters on joint quality in friction stir welding of Mg alloy to DP steel dissimilar materials Author links open overlay panel. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 35: 502-516. [DOI:10.1016/j.cirpj.2021.06.012](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.06.012)

Kissell, J. R., and R. L. Ferry. 2002. Aluminium Structures, Second Edition. NEW York.

Mengran, Zh., G. Chen, J. Wu ,Q. Liu, B. Lei, and Y. Gao. 2022. The Cu/Fe magnetic yoke with novel interface and excellent mechanical properties by friction stir welding. Science and Technology of Welding and Joining 27(5): 339-352. [DOI:10.1080/13621718.2022.2053396](https://doi.org/10.1080/13621718.2022.2053396)

Haribalaji, V. , and B. Sampath . 2021. Influences of Welding Parameters on Friction Stir Welding of Aluminum and Magnesium: A Review. Materials Research Proceedings 19:222-230.

Mohammadzadeh Khojastehnezhad, V. 2019. Microstructures and Mechanical Properties of Al



Investigation of Dissimilar Joining between Al2024-T4 and Al6061-T6 Created by Friction Stir Welding

Sayede Razieh Anvari

Assistant Professor, Danesh Pajoohan Pishro Higher Education Institute
sr.anvari@daneshpajoohan.ac.ir

Safoura Oshaghi

Lecturer, Daneshpajoohan Pishro Higher Education Institute
oshaghi@daneshpajoohan.ac.ir

Hamid Reza Hashemi

M.Sc. Graduated, Daneshpajoohan Pishro Higher Education Institute
hhashemi93@yahoo.com

Abstract

Aluminum alloys are widely used in many industries like construction industry, aerospace and marine industries due to their unique properties such as high strength-to-weight ratio, good weldability and excellent formability and suitable corrosion resistance. Therefore, friction stir welding was invented for the first time for aluminum alloys that could not be welded by general methods or were difficult to weld. The purpose of this research is to evaluate the joints of aluminum alloys 2024 and 6061 created by the friction stir process. In this research, various parameters affecting the friction stir welding process were investigated in order to achieve optimal parameters. The deviation angle of the tool was considered to be 3 degrees. In this research, scanning electron microscope and optical microscope were used for microstructural investigations. According to the welding of the samples and checking the appearance of the created joints, the rotational speed of 800 rpm and the travelling speed of 60 mm/min were selected to create a suitable joint.

Key Words: Friction Stir Welding, 2024 Aluminium Alloy, 6061 Aluminium Alloy, Travelling Speed, Rotational Speed, Microstructure.