



علوم و فناوری جوئکاری ایران



A novel approach to enhance the joints performance of AA1100 joints fabricated by friction stir welding (FSW)

M. Taheri¹, Gh. Azimiroeen^{2*}

1-Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2-Center of Engineering and Technical Skills Training, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Received 10 April 2026 ; Accepted 2 June 2026

Abstract

In this study, the effect of an additional pass using a pinless tool on the microstructure and mechanical properties of friction stir welding (FSW) AA1100 butt joints was investigated. The microstructure was characterized using optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM), while the mechanical properties were evaluated by tensile and Vickers microhardness tests. The results indicated that applying additional passes led to grain refinement of the microstructure and a reduction in grain size to approximately 1 μm in the stir zone. Moreover, the microhardness in the upper stir zone increased from about 30 HV in the initial joint to nearly 55 HV in the processed sample. Tensile test results also revealed an improvement in mechanical properties, with the ultimate tensile strength (UTS) increasing from 86 MPa to 101 MPa, corresponding to an enhancement of approximately 17%. This improvement was mainly attributed to grain refinement and the increased grain boundary density.

Keywords: Al alloy, Friction Stir Process, Microstructure, Mechanical properties.

 *Corresponding Author: Gh. Azimiroeen, azimi_gh@iut.ac.ir.



رویکردی نوین برای افزایش عملکرد اتصالات آلیاژ آلومینیوم سری 1100 ایجاد شده توسط جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW)

مهدی طاهری¹، قاسم عظیمی رویین^{2*}

1- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 84156-83111، ایران.

2- مرکز آموزش مهارت‌های فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان 84156-83111، ایران

دریافت مقاله: 1405/01/21؛ پذیرش مقاله: 1405/03/12

چکیده

در این پژوهش، تأثیر اعمال پاس اضافی توسط ابزار بدون پین بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لب‌به‌لب آلومینیوم 1100 تولیدشده به روش جوشکاری همزن اصطکاکی بررسی شد. ارزیابی ریزساختار با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و خواص مکانیکی با آزمون کشش و ریزسختی ویکرز انجام گرفت. نتایج نشان داد که اعمال پاس اضافی موجب ریزدانه شدن ساختار و کاهش اندازه دانه‌ها تا حدود 1 میکرومتر در ناحیه همزده می‌شود. همچنین، مقدار ریزسختی در ناحیه همزده بالایی از حدود 30 به 55 ویکرز افزایش یافت. آزمون کشش نیز بهبود خواص مکانیکی را نشان داد؛ به طوریکه استحکام کششی نهایی از 86 به 101 مگاپاسکال افزایش یافت که معادل بهبود حدود 17 درصدی است. این بهبود به ریزدانه شدن ساختار و افزایش تعداد مرزدانه‌ها نسبت داده می‌شود.

کلمات کلیدی: آلیاژ آلومینیوم، فرایند همزن اصطکاکی، ریزساختار، خواص مکانیکی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: قاسم عظیمی رویین، azimi_gh@iut.ac.ir

1- مقدمه

چالش‌های مرتبط با جوشکاری این آلیاژها، به‌ویژه در اتصالات غیرهمجنس، موجب محدودیت در کاربرد آن‌ها شده‌است. جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیوم به علت تفاوت در خواص مکانیکی، فیزیکی و دمای ذوب آن‌ها با دیگر فلزات، فرایندی دشوار و چالش‌برانگیز است. ایجاد چنین اتصالاتی می‌تواند مزایایی از قبیل کاهش آلاینده‌گی محیط زیست، کاهش هزینه، انعطاف‌پذیری طراحی و کاهش وزن سازه به همراه داشته باشد. با این وجود، نرخ سریع گرمایش و سرمایش در حین جوشکاری ذوبی ممکن است منجر به بروز نقص‌هایی نظیر

آلیاژهای آلومینیوم سری Ixxx به دلیل ویژگی‌هایی همچون چگالی کم، سهولت در ساخت، شکل‌پذیری عالی و هدایت الکتریکی بالا، در بسیاری از صنایع مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند [1]. این آلیاژها به طور فزاینده‌ای در صنایع گوناگون از جمله خودروسازی کاربرد دارند [2]. نسبت بالای استحکام به وزن، استحکام کششی مناسب، خواص مکانیکی مطلوب و مقاومت به خوردگی، آلیاژهای آلومینیوم را به گزینه‌ای مناسب برای استفاده در سازه‌های مهندسی بدل کرده‌است. با این حال،

روش FSW بررسی کردند. آن‌ها دریافتند، بهترین خواص مکانیکی در سرعت چرخش 3000 دور بر دقیقه و سرعت جوشکاری 100 میلی‌متر بر دقیقه حاصل می‌شود. در این شرایط، استحکام برشی اتصال 230 مگاپاسکال و ریزسختی 92 ویکرز (HV) گزارش شد. نتایج نشان داد که ابزار بدون پین می‌تواند اتصال‌هایی با خواص مکانیکی مطلوب و حداقل عیوب سطحی ایجاد کند. ژانگ و همکاران [13]، به بررسی اصلاح سطحی آلیاژ آلومینیوم با استفاده از فرایند همزن اصطکاکی با ابزار بدون پین پرداختند. نتایج نشان داد که با اعمال این فرایند، ساختار سطحی آلیاژ به‌طور قابل توجهی ریزدانه شده و ذرات فاز دوم به‌خوبی پراکنده شده‌اند. در سرعت چرخش 1000 دور بر دقیقه، خواص مکانیکی بهینه حاصل شد؛ به‌طوری که استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی به ترتیب 35 و 30 درصد افزایش یافتند و میزان ازدیاد طول تا شکست به 22 درصد رسید. همچنین مقاومت به خوردگی لایه اصلاح‌شده به‌شکل چشمگیری بهبود یافته است. با این وجود به دلیل نو پا بودن این ایده، یعنی استفاده از پاس اضافی با ابزار بدون پین، تحقیقات بسیار کمی در این زمینه به ویژه در مورد تاثیر آن بر روی اتصالات جوشی چه ذوبی و چه غیرذوبی وجود دارد. همچنین تا جایی که ارائه کنندگان این پژوهش اطلاع دارند گزارشی در زمینه تاثیر استفاده از پاس اضافی با ابزار بدون پین بر روی اتصالات آلیاژ آلومینیوم سری 1100، به عنوان یک آلیاژ عمومی و پرکاربرد در صنعت، وجود ندارد. لذا هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر پاس اضافی توسط ابزار بدون پین به عنوان یک رویکرد نوین، بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لب‌به‌لب ورق‌های آلومینیوم سری 1100 ایجاد شده توسط فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW) است.

2- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش ورق‌های آلیاژ آلومینیوم سری 1100 تولیدی شرکت آلومینیوم اراک به ضخامت 5 میلی‌متر با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول (1) به عنوان فلز پایه مورد استفاده

تخلخل و حفره در جوش شود. در برخی موارد نیز نیاز به استفاده از روش‌های پرهزینه برای محافظت از حوضچه مذاب وجود دارد که موجب افزایش هزینه‌های فرایند می‌گردد. از این‌رو، جوشکاری در حالت جامد می‌تواند به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم مطرح شود [3-5].

یکی از روش‌های اتصال در حالت جامد، جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW) است که در سال 1991 توسط مؤسسه جوشکاری انگلستان معرفی شد. این روش به علت ایجاد اتصال با عیب کمتر، پیچیدگی پایین و کیفیت اتصال بالا، به‌ویژه در صنایع خودروسازی، با استقبال زیادی مواجه شده‌است [3، 6 و 7]. فرایند همزن اصطکاکی (FSP)، با بهره‌گیری از تغییر شکل پلاستیک آبی، منجر به ریزدانه‌سازی ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی ماده می‌شود. یکی از پیشرفت‌های جدید در این حوزه، فرایند همزن اصطکاکی بدون پین (PFSP) است. این روش با حذف پین، نقص‌های ناشی از حفره کلیدی را از بین برده و عملکرد بهتری در جوشکاری و بهبود سطح مواد نشان داده‌است. استفاده از این روش در بهبود خواص نظیر سختی، استحکام کششی، مقاومت به خستگی، سایش و خوردگی، همچنین اصلاح ریزساختار سطحی و یکنواختی ترکیب، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌است [8-10]. شانگ و همکاران [11]، اثر پاس اضافی فرایند همزن اصطکاکی بدون پین را بر روی اتصال آلیاژ منیزیم که با روش جوشکاری همزن اصطکاکی ایجاد شده بود، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پاس اضافی FSP منجر به افزایش استحکام اتصال می‌شود که این بهبود ناشی از ریزدانه شدن ساختار به واسطه پدیده دوقلوئی است. همچنین آن‌ها گزارش کردند که سختی ناحیه تحت تاثیر ابزار بدون پین در اتصالاتی که تحت FSP اضافی قرار گرفته‌اند، به دلیل ریزدانه شدن بیشتر، به‌طور محسوسی بالاتر از سختی اتصالات معمولی حاصل از FSW است.

سن و همکاران [12]، اتصال ورق نازک آلومینیومی AA6061-T6 به ضخامت 0/8 میلی‌متر را با ابزار بدون پین به

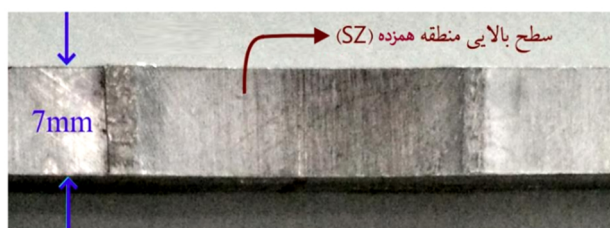
عاری از خط و خش جلا داده شدند. در نهایت، نمونه‌ها به مدت 18 تا 20 ثانیه با دو محلول ترکیبی حکاکی شدند که شامل ترکیبات زیر است:

- محلول اول: 1 میلی لیتر H_2O ، 6 میلی لیتر HNO_3 ، 1 میلی لیتر HF
- محلول دوم: 12 میلی لیتر HF ، 25 میلی لیتر HNO_3 ، 1 گرم H_2CrO_4 ، 10 میلی لیتر H_2O

جدول 2- ویژگی‌های ابعادی بین‌ها و متغیرهای فرایندهای FSP و FSW.

مشخصات	متغیرها	FSW	FSP
ابزار	قطر شانه (mm)	10	10
	قطر بین (mm)	5	-
	ارتفاع بین (mm)	4	-
	عمق رزوها (mm)	0/5	-
فرایند	زاویه رزوها (°)	30	-
	زاویه پیشروی (°)	3	3
	سرعت چرخشی (rpm)	280	1400
	سرعت پیشروی (mm/min)	20	40
	تعداد پاس	1	1

برای بررسی ریزساختار اتصالات، از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. جهت بررسی اثر پاس اضافی FSP بر خواص مکانیکی اتصالات، نمونه‌ها در جهت طولی و به طول 20 میلی متر بر اساس استاندارد ISO 6892-1 ماشین کاری شدند.



شکل 2- نمونه آزمایش توموگرافی اشعه ایکس.

آزمون استحکام کششی اتصالات با نرخ کرنش 0/001 بر ثانیه انجام گرفت و برای هر نمونه، سه بار تکرار شد. علاوه بر این، آزمون ریزسختی اتصالات به منظور بررسی میزان سختی در سطح مقطع هم در راستای طول و هم در راستای عرض با استفاده از سختی سنج ویکرز، با بار 200 گرم نیرو (gf) و زمان

قرار گرفتند. برای ایجاد اتصال ورق‌ها قبل از استفاده با ابعاد مشخص $210 \times 75 \text{ mm}^2$ بریده شدند. به منظور بررسی اثر پاس اضافی توسط ابزار بدون پین، دو نوع نمونه جوشکاری شده، آماده گردید.

جدول 1- ترکیب شیمیایی ورق آلیاژ آلومینیوم 1100 اولیه (درصد وزنی).

عنصر	Al	Zn	Cr	Mg	Mn	Cu	Fe	Si
آلیاژ آلومینیوم 1100 اولیه	پایه	0/0097	0/004	0/002	0/006	0/012	0/27	0/206

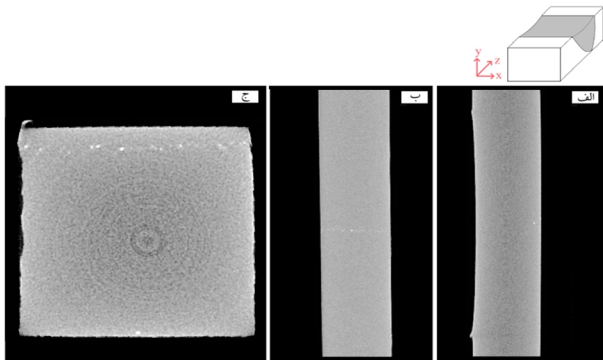
نمونه‌های نوع اول شامل ورق‌هایی بودند که به صورت لب‌به‌لب توسط فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی اتصال داده شدند. در این فرایند، از یک پین استوانه‌ای (شکل 1-الف) ساخته شده از فولاد H13 استفاده شد که ویژگی‌های ابعادی آن در جدول (2) آورده شده است. نمونه‌های نوع دوم پس از انجام فرایند FSW و ایجاد اتصال، با یک پاس اضافی تحت FSP قرار گرفتند. این پاس اضافی با استفاده از ابزاری بدون پین (شکل 1-ب) با عمق فرورفتگی 0/9 میلی متر و ویژگی‌های ابعادی مندرج در جدول (2)، انجام گرفت.



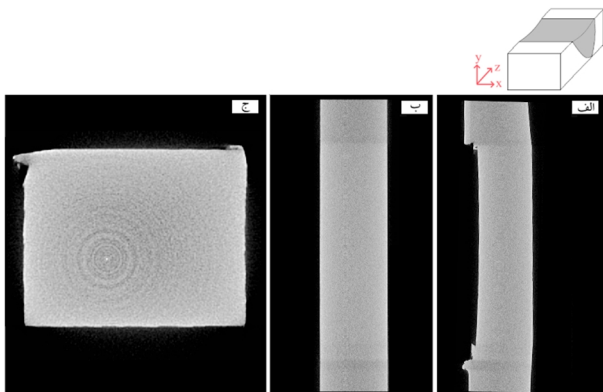
شکل 1- پین‌های استفاده شده در

الف- جوشکاری همزن اصطکاکی و ب- فرایند همزن اصطکاکی.

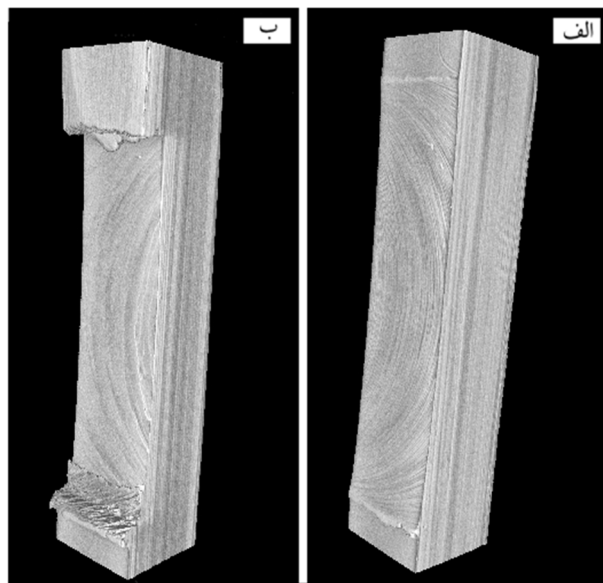
در این پژوهش، برای ارزیابی ریزساختاری مقاطع عرضی اتصالات، نمونه‌هایی با استفاده از دستگاه برش سیم داغ تهیه شدند. نمونه‌ها به صورت متوالی با سنباده‌های شماره 320 تا 5000 صیقل داده شدند و سپس با محلول ذرات معلق آلومینای 0/3 میکرومتر در آب مقطر، برای دستیابی به سطحی براق و



شکل 4- آنالیز توموگرافی اشعه ایکس برای اتصال ایجاد شده با فرایند جویشکاری همزن اصطکاکی در سه جهت x ، y و z .



شکل 5- آنالیز توموگرافی اشعه ایکس برای اتصال فرآوری شده با پاس اضافی توسط ابزار بدون پین در سه جهت x ، y و z .



شکل 6- آنالیز توموگرافی اشعه ایکس سه بعدی برای، الف- اتصال اولیه و ب- اتصال فرآوری شده.

شکل های (7-الف) و (7-ب)، بترتیب تصاویر میکروسکوپی نوری با بزرگنمایی پایین از سطح مقطع عرضی اتصالات اولیه و

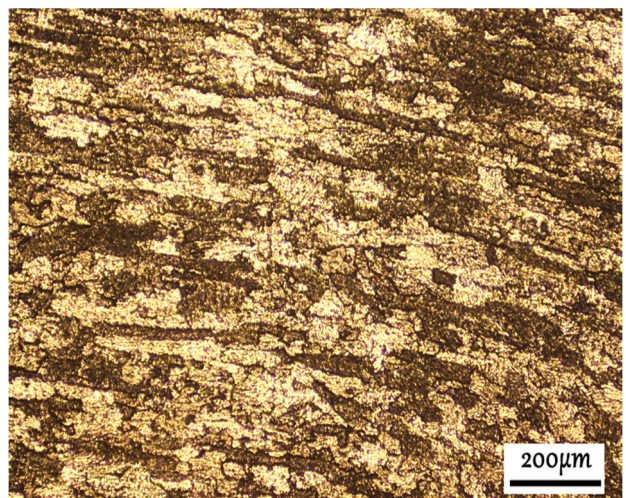
نشست 10 ثانیه انجام شد. همچنین از توموگرافی اشعه ایکس مدل 3-D Microtomograph Nanoton 180 ساخت کشور آلمان جهت کنترل کیفیت و بررسی عیوب موجود در منطقه اتصال استفاده شد. در شکل (2)، تصویری از نمونه تهیه شده جهت توموگرافی اشعه ایکس ارائه شده است.

3- نتایج و بحث

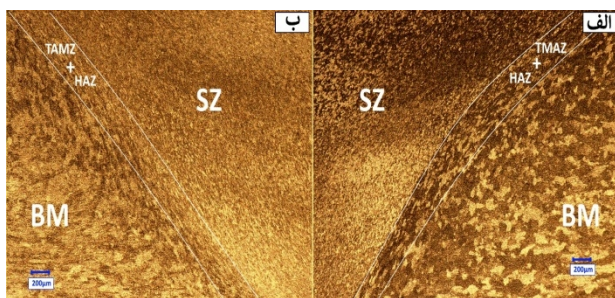
3-1- بررسی ساختار اتصالات

شکل (3)، تصویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار آلیاژ AA1100 را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود، این آلیاژ، یک آلیاژ کار شده با مورفولوژی دانه های کشیده در جهت نورد می باشد.

در شکل های (4) و (5)، به ترتیب توموگرافی اشعه ایکس اتصال اولیه و اتصال فرآوری شده با پاس اضافی توسط ابزار بدون پین، در سه جهت x ، y و z ارائه شده است. تصاویر حاصل از آنالیز توموگرافی اشعه ایکس در سه جهت نشان می دهد که هر دو اتصال اولیه و فرآوری شده سالم و بدون عیب می باشند. از آنجاییکه بررسی و تفسیر عیوب فقط با آنالیز دو بعدی ممکن است گمراه کننده باشد، لذا از آنالیز توموگرافی اشعه ایکس سه بعدی نیز برای بررسی اتصالات استفاده شده که نتایج آن در شکل (6) ارائه شده است. همانطور که در شکل (6-الف و ب) مشاهده می شود آنالیز سه بعدی هم، سالم و بدون عیب بودن هر دو اتصال را تایید می کند.



شکل 3- ریزساختار فلز پایه (AA1100).

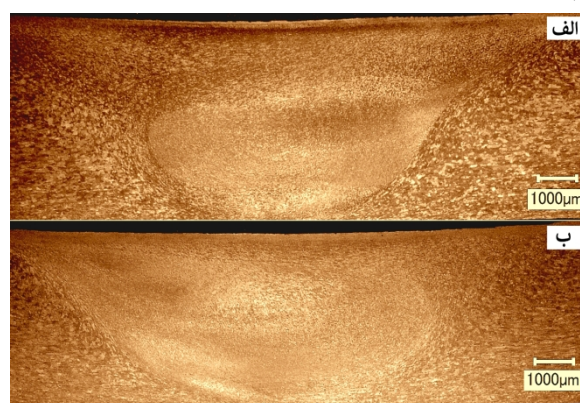


شکل 8- تصاویر میکروسکوپی نوری (بزرگنمایی بالا) از سطح مقطع عرضی اتصالات الف- اولیه و ب- فرآوری شده.

ناحیه TMAZ که مجاور ناحیه SZ است، تحت تغییر شکل پلاستیک متوسط و دماهای کمتر قرار دارد؛ بنابراین، تبلور مجدد در این ناحیه به صورت ناقص و جزئی صورت می‌گیرد. در این ناحیه دانه‌ها کشیده‌تر و درشت‌تر از SZ بوده و پدیده بازیابی دینامیکی غالب است که مانع تبلور کامل می‌شود. در ناحیه HAZ، تغییر شکل پلاستیک تقریباً رخ نمی‌دهد و تغییرات ریزساختاری عمدتاً ناشی از تأثیر گرمای ورودی است که منجر به رشد دانه‌ها می‌شود. این افزایش اندازه دانه در HAZ می‌تواند اثر منفی بر خواص مکانیکی اتصال داشته باشد [14-17]. پاس اضافی در فرایند FSP با ابزار بدون پین تأثیر قابل توجهی بر ریزساختار ناحیه فرآوری شده دارد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بازیابی دینامیکی مکانیزم غالب در فرایند ریزدانه‌سازی طی FSP است؛ زیرا ناحیه فرآوری شده تحت تأثیر نرخ کرنش بالا و دماهای اوج قرار می‌گیرد. در این شرایط، اجرای پاس‌های اضافی با اعمال مکرر حرارت و کرنش، موجب تحریک پی‌درپی فرایند تبلور مجدد دینامیکی شده و در نتیجه کاهش اندازه دانه‌ها و بهبود یکنواختی ریزساختار را به همراه دارد [18 و 19].

مطابق شکل‌های (9-الف) و (9-ب)، تصاویر میکروسکوپی نوری ارائه شده، ساختار اتصال فرآوری شده در تمامی نواحی نسبت به اتصال اولیه دارای دانه‌های ریزتری است. ناحیه همزده در این اتصال به دو بخش همزده بالایی (UZ) و همزده پایینی (LZ) تقسیم می‌شود. در مقایسه با اتصال اولیه، ریزدانه بودن اتصال فرآوری شده در ناحیه UZ به وضوح قابل مشاهده است که نشان‌دهنده وقوع تغییر پلاستیک شدید و تبلور مجدد

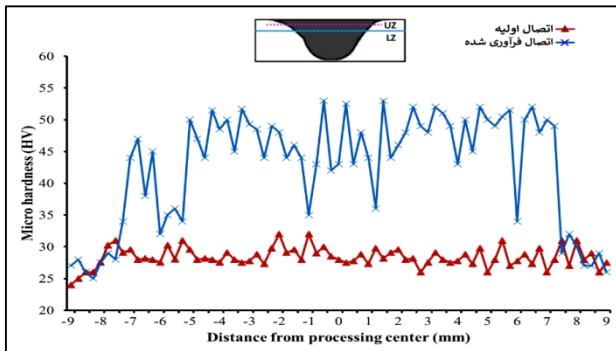
فرآوری شده را نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد در سرعت چرخشی 1400rpm و سرعت انتقالی 40mm/min یک ناحیه همزده عاری از هرگونه عیب و تخلخلی برای هر دو نمونه بدست آمده‌است. ناحیه همزده در هر دو نمونه به وضوح از فلز پایه قابل تشخیص است. همانطور که در بالا ذکر شد، فلز پایه نمونه نورد شده شامل دانه‌های کشیده‌است (شکل 3). با این حال، ناحیه همزده هر دو نمونه از دانه‌های بسیار ریز تشکیل شده‌اند. این تصاویر هم تایید کننده نتایج حاصل از توموگرافی اشعه ایکس می‌باشند (بدون عیب بودن اتصال) و از طرفی هم می‌توان بیان کرد که ابزار و پارامترهای جوشکاری به درستی انتخاب شده‌اند. با مقایسه تصاویر الف و ب در این شکل (شکل 7) به نظر می‌رسد که در نمونه فرآوری شده به ویژه در مناطق نزدیک به سطح ساختار ریزدانه‌تر شده‌است. شکل‌های (8-الف) و (8-ب) نیز تصاویر میکروسکوپی نوری با بزرگنمایی بالا از سطح مقطع عرضی اتصالات اولیه و فرآوری شده را نمایش می‌دهند که نواحی مختلف جوشکاری در آن‌ها به‌طور واضح قابل رویت هستند: ناحیه همزده (SZ)، ناحیه متأثر از حرارت (HAZ)، ناحیه ترمومکانیکی (TMAZ) و فلز پایه (BM).



شکل 7- تصاویر میکروسکوپی نوری (بزرگنمایی پایین) از سطح مقطع عرضی اتصالات الف- اولیه و ب- فرآوری شده.

ناحیه SZ که در مرکز اتصال قرار دارد، تحت بیشترین میزان حرارت و تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرد. این شرایط موجب وقوع تبلور مجدد دینامیکی در این ناحیه شده و در نتیجه دانه‌های ریز و هم‌محوری شکل می‌گیرند که اندازه متوسط آن‌ها نسبت به BM کاهش چشمگیری دارد.

می‌شود. مطابق با تصاویر میکروسکوپی نوری از مقطع عرضی اتصالات اولیه و فرآوری‌شده در شکل (8)، ساختار نواحی SZ، TMAZ و HAZ در اتصال فرآوری‌شده نسبت به اتصال اولیه ریزدانه‌تر است. فرایند FSP با ابزار بدون پین منجر به ایجاد

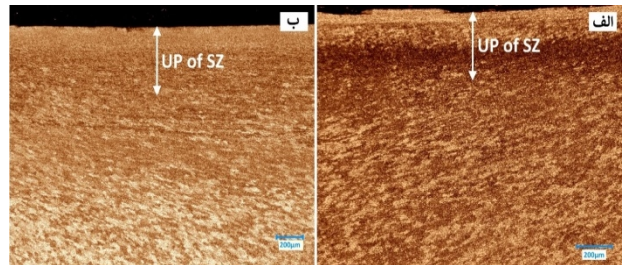


شکل 11- توزیع ریزسختی ویکرز به‌عنوان تابعی از فاصله، برای مقایسه دو اتصال اولیه و فرآوری‌شده در ناحیه UZ.

تغییر شکل پلاستیک شدید و کارسختی در سطح اتصال می‌شود که این امر باعث وقوع تبلور مجدد دینامیکی و در نتیجه ریزدانه شدن ساختار به ویژه در نواحی نزدیک به سطح می‌گردد. ریزدانه شدن موجب افزایش کسر حجمی مرزدانه‌ها شده و این افزایش، مانع حرکت نابجایی‌ها شده و تنش اصطکاک شبکه‌ای را بالا می‌برد؛ در نتیجه، سختی ماده افزایش می‌یابد. علاوه بر این، در نواحی HAZ و TMAZ نیز به دلیل وقوع تبلور مجدد جزئی، ساختار نسبت به فلز پایه ریزدانه‌تر شده و سختی در این نواحی نسبت به BM افزایش می‌یابد، گرچه مقدار سختی آن‌ها هنوز کمتر از ناحیه SZ است که شدیدترین تغییر شکل را تجربه کرده‌است [20 و 21]. همچنین با مشاهده نمودارها در شکل‌های (11) و (12) دیده می‌شود که در نمونه فرآوری‌شده، سختی در ناحیه UZ نسبت به ناحیه LZ افزایش چشمگیری داشته‌است که برای بررسی دقیق‌تر، میزان سختی از پایین درز اتصال تا سطح اتصال (در وسط منطقه همزده) اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل (13) ارائه شده‌است.

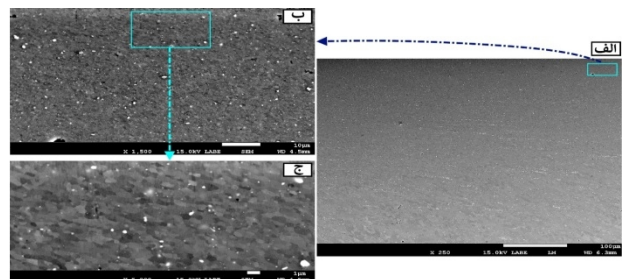
همان‌طور که مشاهده می‌شود، از ابتدای مسیر اندازه‌گیری (قسمت تحتانی درز اتصال) تا مرز بین نواحی LZ و UZ، مقادیر سختی در هر دو نمونه تقریباً مشابه بوده و در محدوده 28 تا 33 واحد ویکرز باقی می‌ماند. با این حال، در ناحیه UZ،

دینامیکی کامل در این ناحیه می‌باشد.



شکل 9- مقایسه‌ای بین نواحی SZ در اتصالات الف- اولیه و ب- فرآوری‌شده.

شکل (10)، تصاویر SEM از سطح مقطع اتصال فرآوری‌شده را در بزرگنمایی‌های مختلف نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اندازه دانه‌ها در ناحیه UZ اتصال فرآوری‌شده به حدود 1 میکرومتر کاهش یافته و نسبت به اتصال اولیه به‌طور قابل‌توجهی ریزتر شده‌اند. این ریزدانه‌شدن نتیجه تأثیر فرایند FSP بدون پین و وقوع مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه فرآوری‌شده است. در واقع چرخش ابزار بدون پین بر روی سطح و ورود جزئی آن به سطح باعث حرارت اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیکی موضعی شدید می‌شود.



شکل 10- تصاویر SEM (با بزرگنمایی‌های متفاوت) از سطح مقطع اتصال فرآوری‌شده.

3-2- خواص مکانیکی اتصالات

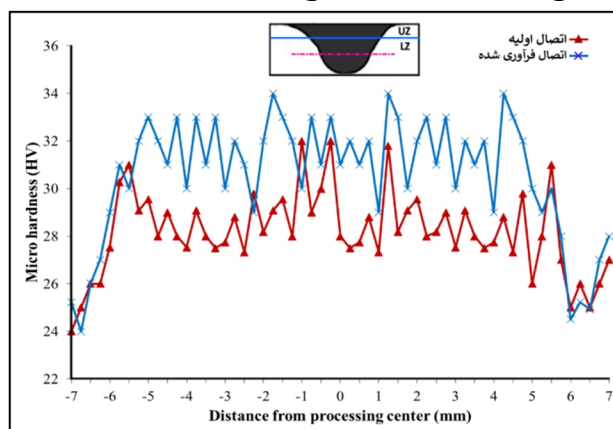
شکل‌های (11) و (12)، به ترتیب نتایج آزمون ریزسختی ویکرز را به‌عنوان تابعی از فاصله از مرکز جوش در اتصالات اولیه و فرآوری‌شده در نواحی LZ و UZ نشان می‌دهند. برای مقایسه قابل ذکر است که میانگین سختی مربوط به زمینه آلومینیومی استفاده شده در این تحقیق 21 HV می‌باشد. همان‌طور که قابل مشاهده است ایجاد جوش توسط فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی باعث افزایش سختی در اتصال

شده دارای استحکام نهایی 101 مگاپاسکال می‌باشد که از استحکام اتصال اولیه (86 مگاپاسکال)، بالاتر است. جالب است این نکته ذکر شود که منحنی تنش- کرنش مهندسی اتصال فرآوری شده نشان می‌دهد که این اتصال انعطاف‌پذیری خوبی هم از خود نشان داده‌است (کرنش شکست بیش از 21/1 درصد). این عقیده وجود دارد که این امر به بهبود ساختار مرتبط است.

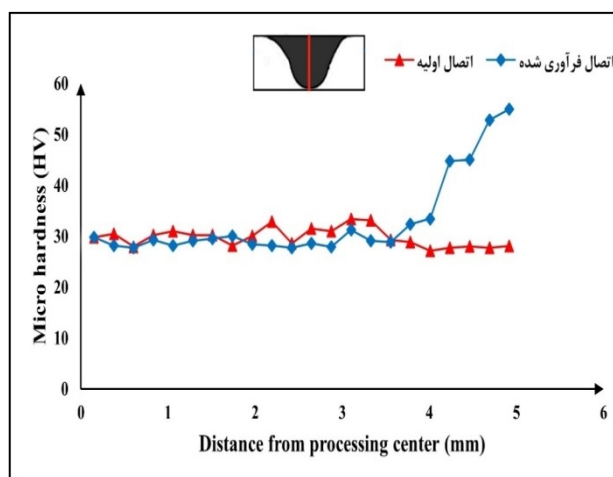
در حقیقت فرآوری اتصال با ابزار بدون پین به‌عنوان یک عملیات اصلاح ریزساختار پس از جوشکاری، تأثیر قابل توجهی بر بهبود خواص مکانیکی ناحیه جوش دارد. عبور ابزار از روی سطح جوش بدون ایجاد ذوب، موجب اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید و تولید حرارت کنترل‌شده می‌شود که به وقوع تبلور مجدد دینامیکی و ریزدانه‌سازی قابل توجه در نواحی سطحی منطقه همزده و ناحیه مجاور آن می‌انجامد. برطبق رابطه هال‌پیچ، استحکام بخشی اندازه دانه را می‌توان بصورت $kd^{-1/2}$ نوشت که d اندازه دانه و $k=74 \text{ MPa}\sqrt{\mu\text{m}}$ است [22]. در واقع مطابق با این رابطه، ساختار ریزدانه ناشی از فرایند FSP منجر به افزایش تعداد مرز دانه‌ها و ایجاد مانع در برابر حرکت نابجایی‌ها می‌شود، که نتیجه آن افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی (UTS) است و همچنین همزمان منجر به همگن‌سازی ریزساختار و کاهش عیوب احتمالی ناشی از فرایند جوشکاری اولیه می‌گردد. در نهایت می‌توان گفت فرآوری اتصال با ابزار بدون پین با ایجاد ریزدانه‌سازی سطحی گسترده‌تر، افزایش چگالی نابجایی‌ها، اصلاح ساختار و القای تنش‌های پسماند فشاری در نواحی سطحی، منجر به فعال‌سازی هم‌زمان چندین مکانیزم استحکام بخشی می‌شود [23 و 24].

همچنین قابل ذکر است که اتصال آلیاژ آلومینیوم 1100 بدون فرآوری با پاس اضافی، دارای کرنش مهندسی بالایی می‌باشد. نتایجی نزدیک به نتایج این تحقیق (کرنش مهندسی بالا) را قبلاً کی و همکاران [25] برای آلیاژ آلومینیوم 1060 فرآوری شده با روش همزن اصطکاکی گزارش کرده‌اند. جهت توجه کرنش مهندسی بالا می‌بایست ذکر شود که گزارش شده که تعداد کمی آخال در ریزساختار این نوع آلیاژ آلومینیوم وجود دارد، که این

اتصال فرآوری‌شده به دلیل ریزدانه‌تر شدن ساختار ناشی از فرایند FSP، روند افزایشی قابل توجهی در مقدار سختی از پایین به بالا نشان می‌دهد و مقدار سختی تا 55 واحد ویکرز افزایش می‌یابد. این در حالی است که اتصال اولیه در همین ناحیه تغییر محسوسی در مقدار سختی ندارد و تقریباً مقدار ثابتی را حفظ کرده‌است. می‌توان نتیجه گرفت که کار سطحی انجام شده بر روی درز اتصال موجب افزایش قابل توجه سختی در سطح و نواحی نزدیک به سطح شده‌است.



شکل 12- توزیع ریزسختی ویکرز به‌عنوان تابعی از فاصله، برای مقایسه دو اتصال اولیه و فرآوری‌شده در ناحیه LZ.



شکل 13- توزیع ریزسختی ویکرز به‌عنوان تابعی از فاصله، از پایین به بالا دو اتصال اولیه و فرآوری شده.

شکل‌های (14-الف) و (14-ب)، به ترتیب منحنی‌های تنش- کرنش مربوط به اتصالات اولیه و فرآوری‌شده را نمایش می‌دهند. همانطور که در شکل دیده می‌شود اتصال فرآوری

اتصال لب به لب ورق های آلومینیوم سری 1100 ایجاد شده توسط فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- بررسی های میکروسکوپی نشان داد که ساختار اتصال فرآوری شده در تمامی نواحی به ویژه در نواحی سطحی و نزدیک به سطح نسبت به اتصال اولیه دارای دانه های ریزتری است که نشان دهنده وقوع تغییر پلاستیک شدید و تبلور مجدد دینامیکی کامل می باشد. اجرای پاس اضافی با ابزار بدون پین موجب کاهش اندازه ی دانه های سطحی تا حدود 1 میکرومتر می شود.

- نتایج آزمون ریزسختی نشان داد که ساختار ریزدانه تر حاصل از فرایند FSP موجب افزایش قابل توجه سختی، به ویژه در ناحیه همزده بالایی (UZ) می شود؛ به طوری که مقدار سختی در این ناحیه از حدود 30 ویکرز در نمونه اولیه به حدود 55 ویکرز در نمونه فرآوری شده افزایش یافته است.

- نتایج حاصل از آزمون استحکام کششی نمونه های اتصال اولیه و فرآوری شده نشان داد که اعمال پاس اضافی توسط ابزار بدون پین، منجر به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی اتصال شده است.

بر اساس منحنی های تنش کرنش، استحکام کششی نهایی (UTS) در نمونه فرآوری شده از 86 به 101 مگاپاسکال افزایش یافته است که معادل افزایش حدود 17 درصدی در استحکام کششی اتصال است.

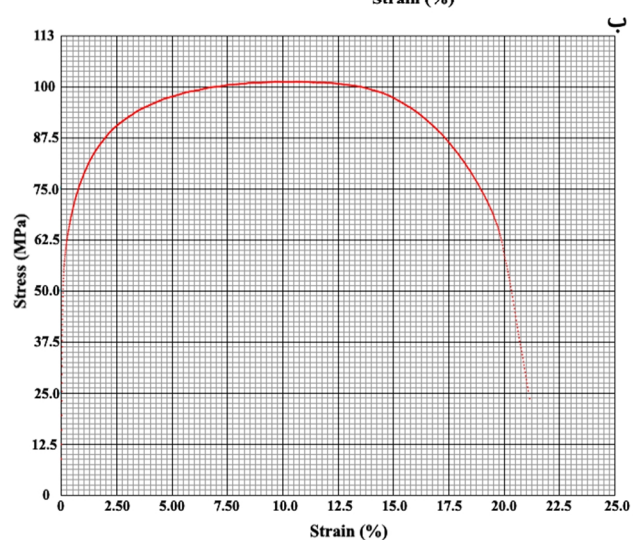
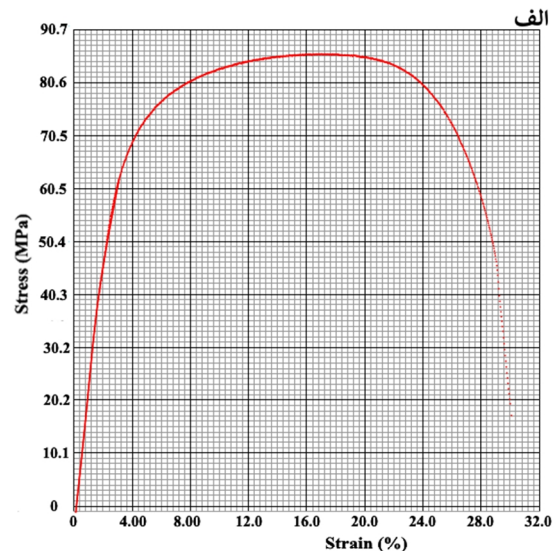
- استحکام بخشی FSP اضافی ناشی از ریزدانه کردن و اصلاح ریزساختار می باشد که منجر به افزایش تعداد مرز دانه ها و ایجاد مانع در برابر حرکت نابجایی ها می شوند، که در نتیجه آن افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی را به همراه دارد.

در مجموع می توان بیان کرد که در مقایسه با سایر روش های بهبود اتصال، استفاده از فرآوری همزن اصطکاکی با ابزار بدون پین، می تواند به عنوان یک روش ساده و کاربردی برای افزایش عملکرد اتصالات آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

1-Ahmed MMZ, Seleman MME-S, Eid RG, Albaijan I, Touileb K. The influence of tool pin geometry and speed

آخال ها به اصلاح ساختار در طی روش همزن اصطکاکی کمک خواهند نمود [26] و در نتیجه اصلاح ساختار باعث افزایش انعطاف پذیری خواهد شد. در واقع فرایند همزن اصطکاکی به علت ماهیت همزدنی که دارد باعث می شود تا این آخال ها خرد شده و به صورت ذرات بسیار ریزی در ساختار منطقه همزده پراکنده شوند. اندازه بسیار ریز و توزیع یکنواخت این آخال ها که معمولا از ذرات سرامیکی هستند بعنوان تقویت کننده عمل کرده و لذا منجر به بهبود استحکام و انعطاف پذیری می شوند.



شکل 14- نتایج آزمون استحکام کششی اتصالات (الف) فرآوری شده، (ب) اولیه.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر اثر پاس اضافی توسط ابزار بدون پین به عنوان یک رویکرد نوین، بر ریزساختار و خواص مکانیکی

- microstructure, mechanical properties, tribological and corrosion behaviors: A review. *J Mater Res Technol.* 2022;20:1940-1975.
- 15-Chen P, Zou S, Chen J, Qin S, Yang Q, Zhang Z, et al. Effect of rotation speed on microstructure evolution and mechanical properties of nugget zone in 2195-T8 Al-Li alloy friction stir welding joints. *Mater Charact.* 2021;176:111079.
- 16-Saju TP, Narayanan RG. Dieless friction stir lap joining of AA 5050-H32 with AA 6061-T6 at varying pre-drilled hole diameters. *J Manuf Process.* 2020;53:21-33.
- 17-Moradi K, Mirsalehi SE. Dissimilar joining of low-carbon steel to 6061-T6 aluminum alloy by novel method of pinless friction stir spot welding-brazing. *Met Mater Int.* 2023;29(1):174-190.
- 18-Zainelabdeen H, Al-Badour FA, Suleiman RK, Adesina AY, Merah N, Ghaith FA. Influence of friction stir surface processing on the corrosion resistance of Al 6061. *Materials (Basel).* 2022;15(22):8124.
- 19-Meng X, Huang Y, Cao J, Shen J, dos Santos JF. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding. *Prog Mater Sci.* 2021;115:100706.
- 20-Chu Q, Li WY, Yang XW, Shen JJ, Vairis A, Feng WY, et al. Microstructure and mechanical optimization of probeless friction stir spot welded joint of an Al-Li alloy. *J Mater Sci Technol.* 2018;34(10):1739-1746.
- 21-Zhang GF, Su W, Zhang J, Wei ZX, Zhang JX. Effects of shoulder on interfacial bonding during friction stir lap welding of aluminum thin sheets using tool without pin. *Trans Nonferrous Met Soc China.*
- 22-Yu C, Kao P, Chang C. Transition of tensile deformation behaviors in ultrafine-grained aluminum. *Acta Mater.* 2005;53:4019-4028.
- 23-Ren R, Fan J, Wang B, Zhang Q, Li W, Dong H. Hall-Petch relationship and deformation mechanism of pure Mg at room temperature. *J Alloys Compd.* 2022;920:165924.
- 24-Ahmed MMZ, El-Sayed Seleman MM, Zidan ZA, Ramadan RM, Ataya S, Alsaleh NA. Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded AA2024-T4/AA7075-T6 T-butt joints. *Metals (Basel).* 2021;11(1):128.
- 25-Ke L, Huang C, Xing L, Huang K. Al-Ni intermetallic composites produced in situ by friction stir processing. *J Alloys Compd.* 2010;503:494-499.
- 26-Liu L, Nakayama H, Fukumoto S, Yamamoto A, Tsubakino H. Microstructural evolution in friction stir welded 1050 aluminum and 6061 aluminum alloy. *Mater Trans.* 2004;45:2665-2668.
- on the mechanical properties of the bobbin tool friction stir processed AA1050. *Materials (Basel).* 2022;15:4684.
- 2-Alaeibehmand S, Mirsalehi SE, Ranjbarnodeh E. Pinless FSSW of DP600/Zn/AA6061 dissimilar joints. *J Mater Res Technol.* 2021;15:996-1006.
- 3-Öchsner A, Altenbach H, editors. *Mechanical and Materials Engineering of Modern Structure and Component Design.* Cham: Springer; 2021.
- 4-Ge X, Jiang D, Song W, Wang H. Effects of tool plunging path on the welded joint properties of pinless friction stir spot welding. *Lubricants.* 2023;11(3):150.
- 5-Tamizi M, Mirsalehi SE, Bakhtiari F, Jamali A. Effects of pin length and welding parameters on metallurgical structure and mechanical behavior of AA6061 friction stir spot welded joints. *SSRN Electron J.* 2022.
- 6-Zhao Z, Bai P, Du W, Liu B, Pan D, Das R, et al. An overview of graphene and its derivatives reinforced metal matrix composites: Preparation, properties and applications. *Carbon.* 2020;170:302-326.
- 7-Farhang M, Farahani M, Nazari M, Daliri OS. Experimental correlation between microstructure, residual stresses and mechanical properties of friction stir welded 2024-T6 aluminum alloys. *Int J Adv Des Manuf Technol.* 2022;15(3):1-9.
- 8-Kumar V, Goyat V. A review on reinforcement strategies of friction stir processing to fabricate metal matrix composites. *Mater Today Proc.* 2023;82:285-294.
- 9-El-Zathry NE, Akinlabi S, Woo WL, Patel V, Mahamood RM. Friction stir-based techniques: An overview. *Weld World.* 2025;69(2):327-361.
- 10-Prangnell PB, Bakavos D. Novel approaches to friction spot welding thin aluminium automotive sheet. *Mater Sci Forum.* 2010;638-642:1237-1242.
- 11-Shang Q, Ni DR, Xue P, Xiao BL, Wang KS, Ma ZY. An approach to enhancement of Mg alloy joint performance by additional pass of friction stir processing. *J Mater Process Technol.* 2019;264:336-345.
- 12-Sen M, Puri AB. An experimental investigation on micro-friction stir welding (μ FSSW) process using pinless tool. *J Mater Eng Perform.* 2025.
- 13-Zhang H, Liu X, Wang Y, Duan J. Effect of pinless friction stir processing on microstructure and properties of surface modification layer of 2024 aluminum alloy. *Surf Topogr Metrol Prop.* 2024;12(4):045010.
- 14-Wu B, Ibrahim MZ, Raja S, Yusof F, Abdul Razak BB, Muhamad MRB, et al. The influence of reinforcement particles friction stir processing on