

(مقاله پژوهشی)

## تحلیل تجربی خواص مکانیکی آلومینیم ۵۰۸۳ جوشکاری شده به روش MIG پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

محمد رضا هادوی<sup>۱</sup>، فرامرز آشنای قاسمی<sup>۲\*</sup>، حسن جعفری<sup>۳</sup>

f.a.ghasemi@sru.ac.ir

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی  
 ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی  
 ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و علوم میان رشته‌ای، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

### چکیده

در مقاله حاضر، تلاش شده است که به روش تجربی، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ جوشکاری شده با گاز محافظ بی‌اثر توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تحلیل شود. برای این منظور، فرآیند، در سه سرعت چرخش ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و با سرعت پیشروی ۱۰۰ سانتی‌متر در دقیقه صورت گرفت. به منظور دستیابی به میزان تأثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر ریز ساختار آلیاژ مورد آزمایش، نمونه‌های جوشکاری شده و تحت فرآیند قرار گرفته، مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین، ریزسختی و استحکام کششی هر یک از نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. سپس با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، مقدار بهینه سرعت چرخش محاسبه گردید. نتایج حاصل نشان داد که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، ساختار منطقه متأثر از حرارت را بطور قابل توجهی ریزتر می‌کند و علاوه بر این، موجب کاهش مؤثر نقص‌هایی نظیر تخلخل و عدم ترشوندگی ناشی از منطقه ذوب جوش می‌شود. از طرف دیگر، نتایج حاصل از بهینه‌سازی بیانگر آن است که مناسب‌ترین استحکام، در سرعت دورانی ۸۲۰ دور در دقیقه به دست می‌آید. در این سرعت، اندازه دانه‌ها در مقایسه با منطقه متأثر از حرارت در حالت پایه، ۹۶٪ کاهش می‌یابد. تصاویر سطح مقطع شکست نمونه بهینه، بر خلاف نمونه‌های دیگر، نشانگر این است که شکست در قسمت پنجه جوش اتفاق نیفتاده است، که این را می‌توان به حذف حفره‌های موجود در پنجه جوش توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نسبت داد.

واژگان کلیدی: آلیاژ آلومینیم؛ فرآیند اصطکاکی اغتشاشی؛ ریزساختار؛ خواص مکانیکی؛ الگوریتم ژنتیک

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۱۵

## مقدمه

در سرتاسر جهان، پدیده خستگی یک مشکل عمده صنعت ساخت، در شرایط بارگذاری نوسانی است. مطالعه بر روی شکست‌های متعدد صنعتی، نشان داده که خستگی عامل ۷۷٪ از شکست‌ها است [۱].

امروزه آلیاژهای آلومینیوم، به خصوص سری ۵XXX، به جهت نسبت بالای استحکام به وزن خود، مقاومت در برابر خوردگی، شکل‌پذیری و جوش‌پذیری مناسب، به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف، از قبیل خودرو، وسایل نقلیه ریلی، و صنایع دریایی، استفاده می‌شود [۲ و ۳]. از آنجایی که پس از تولید، تنش‌های پسماند ناشی از منطقه حرارتی آسیب دیده در جوشکاری و ناپیوستگی هندسی، استحکام ساختاری و مقاطع تولید شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد، این مساله باید مورد توجه قرار گیرد [۴ و ۵].

در میان فرآیندهای جوشکاری، جوشکاری فلز با حضور گاز بی اثر<sup>۱</sup> (MIG) یک روش جوشکاری گسترده است که برای اتصال قطعات مختلف آلیاژهای آلومینیوم استفاده می‌شود. با این حال، این روش دارای برخی نقایص مانند بروز تخلخل، عدم ترشوندگی، کاهش استحکام، ترک گرم، تنش‌های پسماند و اعوجاج است. این نقص‌ها می‌توانند خواص مکانیکی سازه را کاهش داده و تأثیر بسزایی در استحکام کششی جوش داشته باشند [۶].

برخی از تکنیک‌ها، مانند لایه‌برداری توسط شات بلاست [۷]، ذوب مجدد [۸] و چکش کاری [۹]، برای کاهش تنش باقی‌مانده در ناحیه جوشکاری شده استفاده می‌شوند. اخیراً فرآیند اصطکاکی اغتشاشی<sup>۲</sup> به عنوان یک روش جایگزین برای بهبود خواص مکانیکی، به ویژه رفتار خستگی آلیاژهای آلومینیوم جوشکاری شده معرفی شده است [۱۰ و ۱۱]. زیرا FSP در حین فرآیند، گرما تولید می‌کند و منجر به تغییر شکل پلاستیک موضعی و تبلور مجدد می‌شود تا ساختار ریزدانه را در منطقه فرآیند ایجاد کند و خواص مکانیکی آن منطقه بهبود یابد [۱۲-۱۵].

ال داناف<sup>۳</sup> و همکاران [۱۶] گزارش کردند که از طریق FSP می‌توان به ساختار ریز با اندازه دانه ۱/۶ میکرومتر دست یافت که این امر منجر به افزایش شکل‌پذیری ماده می‌شود. در مورد ترک ناشی از خوردگی تنش کششی نیز

نقش این فرآیند ساخت بسیار پررنگ است. یکی از محتمل ترین نواحی برای ایجاد این نوع ترک، خود جوش است. علاوه بر ترک ناشی از خوردگی کششی، مشکل عمده در جوشکاری آلومینیوم به روش سنتی، بحث کاهش استحکام جوش، بویژه در آلیاژهای سری ۵XXX است که قابلیت جوشکاری کمی دارند. این مشکل با توسعه تکنیک اصلاح جوش، در برخی موارد مرتفع شده است.

در سال‌های اخیر، FSP یک روش نوین برای ایجاد تغییرات میکروساختاری در مواد، است [۱۷]. ال داناف و همکاران [۱۸] برای آلیاژ آلومینیوم ۲۲۵۸، موفق به ارتقای ۳۰ درصدی استحکام کششی و حذف نقایص موجود در منطقه FSP شده شدند. آن‌ها نتیجه گرفتند که خواص مکانیکی مواد پایه در انتخاب متغیرهای فرآیند، تعیین کننده است. متغیرهای فرآیند شامل سرعت چرخش ابزار و سرعت پیشروی ابزار است که سرعت چرخش و قطر ابزار، مقدار چگالی تولید شده در قطعه کار را تعیین می‌کند.

دخسوس<sup>۴</sup> و همکاران [۱۹] نشان دادند که پارامترهای مختلف ابزار، مانند شکل و اندازه پین، برای بهبود مقاومت در برابر خستگی اتصالات جوش کاری شده MIG در آلیاژهای آلومینیوم T651-۶۰۶۲ و H111-۵۰۸۳ مؤثر هستند. لازم به ذکر است که آلیاژ H111-۵۰۸۳، یک آلیاژ مناسب برای تحمل بارگذاری خستگی در محیط‌های خوردنده دریایی است.

برگو<sup>۵</sup> و همکاران [۲۰] به بررسی تصاویر ریزساختار نمونه‌های آلومینیوم ۵۰۸۳ جوشکاری شده و FSP شده پرداختند. در بررسی ریز ساختارها در قسمت پنجه جوش مشخص گردید که عیوب به‌طور کامل از بین رفته است. آنها با اعمال آزمون کشش به این نتیجه رسیدند که FSP تأثیر چندانی بر روی استحکام مکانیکی جوش ندارد.

در راستای کاهش تعداد آزمون‌ها و رسیدن به اطلاعات دقیق‌تر و بهینه در پژوهش‌ها استفاده از روش‌های محاسباتی است. یکی از روش‌های محاسباتی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از نقاط فضای جواب در هر تکرار محاسباتی، الگوریتم ژنتیک است که به نحو مؤثری نواحی مختلف فضای جواب را جستجو می‌کند. در مکانیزم

شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنباطی فازی - فازی تطبیقی را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، برای بهینه‌سازی چند هدفه، پارامترهای فرآیند سختی به عنوان تابع تناسب با استفاده از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی که از نقاط داده های تجربی به عنوان تابع اولیه برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند، موثرتر از روش فازی در پیش‌بینی عملکرد سخت شده آلیاژ ذرات معلق است.

با مطالعه منابع می‌توان دریافت که در بین گزارش‌های موجود، کمتر به موضوع بررسی تاثیر پارامترهای FSP، مخصوصاً سرعت چرخش ابزار بر استحکام کششی آلومینیوم ۵۰۸۳ پرداخته شده با شد. لذا در مقاله حاضر، تحلیل تجربی ریز ساختار، ریز سختی و استحکام کششی اتصالات جوشکاری شده در آلومینیوم ۵۰۸۳، به روش MIG با اعمال فرآیند FSP در سرعت‌های مختلف چرخش ابزار و بدون آن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. همچنین از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک به منظور دستیابی به استحکام و تحمل تنش بالای قطعه بعد از پروسه جوشکاری استفاده شده است.

### روش تحقیق

در این تحقیق از ورق آلومینیوم ۵۰۸۳ با ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده است. در جدول ۱، ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده با تجزیه شیمیایی از طریق طیف‌سنجی نشر نوری<sup>۴</sup> ارائه شده است. بر اساس استاندارد ASTM<sup>۵</sup> B221 [۲۵] نزدیک‌ترین گرید به ترکیب شیمیایی نمونه مورد بررسی، گرید ۵۰۸۳ مشخص گردید.

جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ [۲۶]

عنصر	Al%	Si%	Fe%	Cu%	Mn%
مقدار	۹۴/۲۸	۰/۰۹۹	۰/۳	۰/۱۶۸	۰/۴۹۶

به منظور اعمال فرآیند جوشکاری به روش MIG، ماده اولیه در ابعاد ۱۲۵۰×۱۲۰×۵۰ میلی‌متر برش زده و مطابق جدول (۲) و شکل (۱) با حالت اتصال لب به لب<sup>۶</sup> از نوع جوش شیاری<sup>۷</sup> آماده‌سازی شد.

جستجو مقدار تابع هدف برای هر نقطه، در متوسط گیری آماری، در کلیه زیر فضاهایی که آن نقطه به آن‌ها وابسته بوده دخالت داده می‌شود.

امتیاز دیگر این الگوریتم آن است که هیچ محدودیتی برای تابع بهینه‌شونده، مثل مشتق‌پذیری یا پیوستگی لازم ندارد و در روند جستجو خود تنها به تعیین مقدار تابع هدف در نقاط مختلف نیاز دارد و از هیچ اطلاعات کمکی دیگری، مثل مشتق تابع استفاده نمی‌کند [۲۱].

پنتی سل<sup>۱</sup> و همکاران [۲۲] با پیشنهاد یک مدل ترکیبی الگوریتم ژنتیک - فازی رفتار و تغییرات ذاتی مربوط به تولید فوم‌های آلومینیومی با استفاده از انحلال و فرآیند تف‌جوشی را بررسی کردند. روش ترکیبی امکان در نظر گرفتن هر دو عدم قطعیت مربوط به مدل و تغییر پذیری فرآیند آماری، با هدف کنترل قابلیت این ماده در جذب انرژی فشار، برای مجموعه مختلفی از پارامترهای فرآیند را فراهم می‌آورد. استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی پشتیبان‌های فازی اجازه می‌دهد تا نتایج اکثر داده‌های تجربی را در ترکیب با کوچک‌ترین تغییرات ذاتی آلومینیوم را به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی اولیه در نظر بگیرد.

کانوموری<sup>۲</sup> و همکاران [۲۳] در یک مطالعه، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی شبکه‌های عصبی مصنوعی، برای پیش‌بینی خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ (فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴) در دماهای بالا، استفاده کردند. در این تحقیق، شبکه‌های عصبی دینامیکی، برای اولین بار برای پیش‌بینی خواص مکانیکی مانند تنش نهایی، تنش تسلیم و کرنش در دماهای بالا به کار گرفته شدند. سپس الگوریتم ژنتیک با مدل شبکه عصبی برای بهینه‌سازی ترکیب گردید و میانگین مربع خطا به عنوان تابع تناسب در نظر گرفته شد تا نتیجه دقیق‌تری برای رسیدن به پاسخ نهایی بدست آید. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی پیشنهادی، شبکه عصبی - ژنتیک روشی دقیق‌تر و موثرتر برای پیش‌بینی خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ در دماهای بالا است.

وبی اوکی<sup>۳</sup> و همکاران [۲۴] برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی هدفمند پارامترهای فرآیند سختی فلزات با استفاده از

5 American Society for Testing and Materials

6 Butt Joint

7 Groove Weld

1 Ponticelli

2 Kanumuri

3 Nwobi-Okoye

4 Optical Emission Spectroscopy

### اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

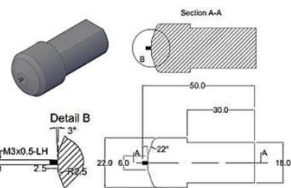
به منظور انجام FSP از دستگاه فرز هیدرولیکی با کلاگی ثابت و میز متحرک، استفاده شد (ساخت کشور ایران مستقر در دانشگاه شریف). دستگاه قادر به ایجاد حرکت دورانی ابزار و پیشروی در مجاورت درز اتصال بوده و مجهز به نگهدارنده برای ثابت نگهداشتن ورق جوشکاری شده است. ورق AA5083 پس از آماده سازی و جوشکاری به روش MIG، قبل از عملیات FSP با استون تمیز گردید و اعمال فرآیند FSP در دو طرف خط جوش با فاصله ۷/۵ میلی‌متر از مرکز جوش انجام شد. سرعت چرخش ابزار متغیر و مطابق جدول (۵) در نظر گرفته شد. برای ساخت ابزار FSP از فولاد ابزار H13، به دلیل قابلیت عملیات حرارتی نسبتاً خوبی که دارد، استفاده گردید. پین ابزار به شکل رزوه‌دار انتخاب شد که شماره رزوه آن بر اساس استاندارد DIN M61 و با گام نیم طراحی شد. مطابق شکل (۲)، برای باقی ماندن بهتر آلیاژ هم‌زده شده زیر شانه، شانه با زاویه ۲۲ نسبت به محور ابزار و به صورت مقعر ساخته شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ H13 مورد استفاده برای ساخت ابزار در جدول (۶) نشان داده شده است.

#### جدول (۵) متغیرهای FSP به کار رفته در این تحقیق

محیط انجام FSP	سرعت دورانی (دور در دقیقه)			سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)
	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۰۰	
هوا				۱۰۰



(ب)



(الف)

شکل (۲) (الف) تصویر ابزار مورد استفاده در FSP. (ب) شماتیک و ابعاد ابزار

#### جدول (۶) ترکیب شیمیایی آلیاژ H13 مورد استفاده برای

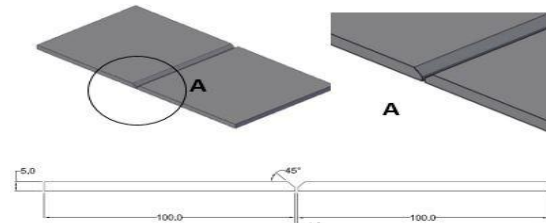
##### ساخت ابزار FSP

عنصر	Fe	Mn	Cr
مقدار	فلز پایه	۰/۳۷	۵/۰۹
عنصر	C	Si	Mo
مقدار	۰/۴	۰/۹۶	۱/۳۹

#### جدول (۲) طرح اتصال و چگونگی جوشکاری با توجه به

##### ضخامت ورق [۲۶]

جهت جوشکاری	فاصله اتصال دو لبه (میلی‌متر)	حالت جوشکاری	ضخامت ورق (میلی‌متر)
بالا	۰-۱/۶	لب به لب	۵



شکل (۱) شماتیک اتصال جهت جوشکاری

#### جوشکاری ذوبی همراه با گاز محافظ و پارامترها آن

برای جوشکاری ورق‌ها، از فیلر ER5356 به عنوان فلز پرکننده بر اساس استاندارد AWS A5.10-80 با قطر ۱/۲ میلی‌متر که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۳) آمده است، استفاده شد. از آنجایی که سرعت جوشکاری به معنی پیشروی سریع قوس و فلز مذاب و ایجاد یک بستر جوش پیوسته و مناسب بدون انقطاع و بریدگی است، مطابق جدول (۴)، سرعت پیشروی ۴۲ سانتی‌متر بر دقیقه و ولتاژ ۲۲ ولت برای طرح اتصال بیان شده، استفاده گردید. فیلر ER5356 برای جوشکاری ترکیباتی که دارای پایه آلومینیمی با حداکثر ۵٪ منیزیم می‌باشند، مورد استفاده قرار می‌گیرد که مقاومت بسیار خوبی در مقابل زنگ‌زدگی و خوردگی آب‌شور دارد.

#### جدول (۳) ترکیب شیمیایی فیلر ER5356 [۲۶]

عنصر	Al	Mg	Ti	Zn
مقدار	فلز پایه	۵/۴-۵/۵	۰/۰-۲/۰۶	۰/۱
عنصر	Cu	Cr	Si	Fe
مقدار	۰/۱	۰/۰-۲/۰۵	۰/۲۵	۰/۴
عناصر دیگر	۰/۱۵			

#### جدول (۴) پارامترهای جوشکاری MIG

فاصله مشعل تا حوضچه (میلی‌متر)	سرعت جوشکاری (سانتی‌متر بر دقیقه)	ولتاژ (ولت)	جریان (آمپر)
۱۵	۳۸-۴۲	۲۱-۲۲	۱۴۶-۱۵۶



شکل (۳) نمونه آزمون [۲۸]

### روش بهینه‌سازی

در تحقیق حاضر بهینه‌سازی تک متغیره<sup>۲</sup> با هدف دستیابی به حداکثر استحکام فلز، بعد از فرآیند جوشکاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک، انجام گرفته است. الگوریتم ژنتیک استفاده شده با در نظر گرفتن پارامترهای MIG به عنوان تابع هدف، از یک روش بهینه‌سازی به نام PIKAIIA که در فرترن ۷۷ معرفی شده است، مشتق شده است [۲۱].

این الگوریتم، مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده و با تقلید از تعدادی از فرآیندهای مشاهده شده در تکامل طبیعی اختراع شده است که به‌طور موثری از معرفت قدیمی موجود در یک جمعیت استفاده می‌کند، تا حل‌های جدید و بهبود یافته را ایجاد کند. فرضیات انجام گرفته برای بهینه‌سازی در جدول (۷) آورده شده است.

### اعتبارسنجی نتایج

جهت راستی آزمایی نتایج به‌دست آمده، به ازای هر پارامتر فرآیند، آزمایشات سه مرتبه بر روی سه نمونه مجزا تکرار گردید و در نهایت نتایج میانگین نمونه‌ها در این مقاله، گزارش شد. همچنین به‌منظور صحت نتایج به‌دست آمده و اعتباردهی به نتایج، ابتدا درستی پارامترهایی نظیر سختی، استحکام تسلیم و کششی نمونه‌های مختلف با و بدون اعمال FSP آزمایش شدند و سپس دقت نتایج آن‌ها با آزمایشات برگو و همکاران [۲۰] مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول (۷) فرضیات در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی

تعداد نسل	ماکزیمم نرخ جهش	مینیمم نرخ جهش	نرخ جهش اولیه	احتمال تقاطع
۶۴	۰/۲۵	۰/۰۰۰۵	۰/۲۵	۰/۸۵

### بررسی ریزساختار

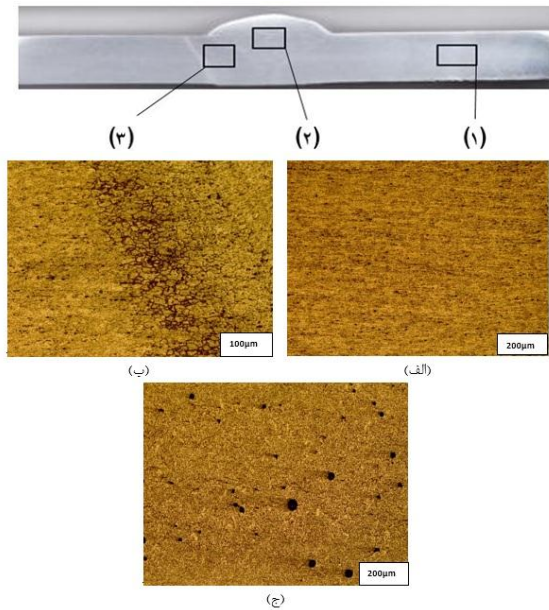
به منظور مطالعه ریزساختار فلز پایه، جوش و مناطق FSP شده، از میکروسکوپ نوری OLYMPUS مدل DP25 استفاده شد. بگونه‌ای که نمونه‌هایی در راستای عمود بر خط جوش با ابعاد  $۵ \times ۱۰ \times ۴۰$  میلی‌متر جهت متالوگرافی با روش استاندارد ASTM E3-01 [۲۷] تهیه و آماده سازی شد. در راستای بررسی تغییرات ریز ساختاری حاصل از FSP، منطقه فصل مشترک اتصال در ناحیه نواری در نزدیکی مرز اتصال؛ از نظر ریزساختار نمونه‌های جوشکاری شده، مقطع‌زنی شده و جهت بررسی، استفاده شد. عملیات آماده‌سازی، با استفاده از سمباده با شماره ۸۰-۴۰۰-۸۰۰-۲۵۰۰-۲۰۰۰-۱۵۰۰-۱۲۰۰ و پولیش مکانیکی و در نهایت پولیش شیمیایی جهت حذف خطوط ظریف در نمونه‌ها انجام شد. برای این کار، نمونه‌ها در محلول HCl  $۲ \text{ ml} + ۱۰۰ \text{ ml}$  متانول ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) به مدت ۵۰ ثانیه، تحت پولیش شیمیایی قرار گرفتند. اندازه‌گیری اندازه دانه با استفاده از نرم‌افزار Clemex Vision و با در نظر گرفتن حدود ۲۵۰-۳۰۰ دانه در هر عکس انجام شد.

### آزمون کشش

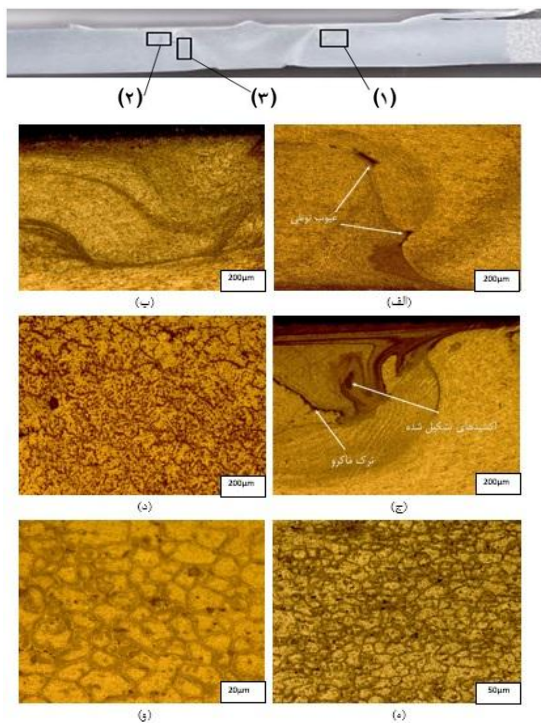
نمونه‌های کشش در ابعاد آزمایشگاهی با استفاده از استاندارد ASTM E8-16 [۲۸] از جنس خود ماده تهیه و آماده شد (شکل (۳)). آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM E8-04 بر روی نمونه‌های جوشکاری و FSP شده، انجام شد. جهت اطمینان از صحت داده‌ها از هر نمونه چهار بار آزمون کشش به عمل آمد.

### آزمون ریزسختی

جهت اندازه‌گیری ریزسختی ویکرز در طول ناحیه جوش، از روش اندازه‌گیری سختی به روش امپدانس تماسی اولتراسونیک<sup>۱</sup>، با استفاده از دستگاه Ogava EEIKI مدل OSK 14218 و بر اساس استاندارد ASTM E384 [۲۹] استفاده شد. برای دستیابی به یک پروفیل و نقشه مناسب از سختی، سطح مقطع در ناحیه FSP و جوش در عمق ۵ میلی‌متر از پایین سطح و ۲ سانتی‌متر از یک سمت ناحیه جوش تا سمت مخالف آن اندازه‌گیری شد.



شکل (۵) فلز پایه، (۲) ناحیه جوشکاری و (۳) مرز بین فلز پایه و ناحیه جوش از مقطع نمونه جوشکاری شده؛ (الف) تصویر ریزساختار فلز پایه، (ب) تصویر ریزساختار ناحیه مرز جوش و فلز پایه، و (ج) تصویر ریزساختار منطقه جوش



شکل (۶) (۱) و (۲) نواحی نواری در دو طرف پنجه جوش و (۳) ناحیه متاثر از حرارت جوش. (الف تا ج) تصاویر ریزساختار منطقه FSP شده در سرعت‌های چرخش به ترتیب ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، (د) منطقه متاثر از حرارت در سرعت چرخش ۷۵۰ دور بر دقیقه، (ه) ناحیه نواری در سرعت چرخش ۷۵۰ دور بر دقیقه (و) منطقه متاثر از حرارت با بزرگ نمایی بیشتر در سرعت چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

برای حفظ پایداری، تمامی شرایط در نظر گرفته شده نظیر ابعاد قطعه کار و ابزار، خصوصیات مواد و نیروی وارده بر ابزار از مقادیر تحقیق برگو و همکارانش استفاده گردید. تنها پارامتری که در پژوهش حاضر متغیر بود، سرعت چرخش ابزار بود که در پژوهش برگو و همکاران، به صورت ثابت و برابر با ۱۲۰۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شده بود. در حالی که در تحقیق حاضر، آزمایشات در سه سرعت چرخش ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه انجام پذیرفت.

## نتایج و بحث

### ریزساختار

شکل (۵) تصویر مقطع نمونه جوشکاری شده به روش MIG را نشان می‌دهد. منطقه (۱) فلز پایه، منطقه (۲) ناحیه جوشکاری و منطقه (۳) مرز بین فلز پایه و ناحیه جوش که متأثر از حرارت است را نشان می‌دهند. شکل (الف) تصویر ریزساختار فلز پایه را نشان می‌دهد. فلز پایه شامل دانه‌هایی تقریباً هم محور است که اندکی در جهت نورد کشیده شده‌اند. میانگین اندازه دانه‌ها در این منطقه در حدود ۲۴ میکرومتر است. شکل (ب) تصویر ریزساختار ناحیه مرز جوش و فلز پایه را نشان می‌دهد. این ناحیه ساختار متفاوتی از فلز پایه و فلز جوش دارد و در اثر حرارت رشد دانه‌ها اتفاق افتاده است [۳۰ و ۳۱].

حداقل اندازه دانه‌ها در این شکل ۱۰ میکرومتر و حداکثر ۱۲۰ است. حداکثر فراوانی اندازه دانه‌ها در این منطقه بین ۲۰ تا ۴۰ میکرومتر و اندازه کل این منطقه حدود ۷۸۰ تا ۱۲۰۰ میکرومتر اندازه‌گیری شد. میانگین اندازه دانه‌ها در این ناحیه ۳۵ میکرومتر محاسبه گردید که نسبت به فلز پایه در حدود ۳۹ درصد رشد داشته است. ذکر این نکته لازم است که مرز بین منطقه جوش و فلز پایه به صورت چشمگیری تخریب شده که در شکل (۵) قسمت (ب) قابل ملاحظه است. رشد دانه در منطقه متأثر از حرارت، می‌تواند موجب افت خواص مکانیکی شود [۳۰ و ۳۱]. شکل (۵) قسمت (ج) ساختار منطقه جوش را نشان می‌دهد. این ناحیه شامل دانه‌های دندریتی حاصل از انجماد جوش است.

شکل (۶) تصاویر ریزساختار نمونه جوشکاری شده پس از اعمال FSP با سرعت دورانی ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد.

این ترک‌ها می‌تواند به دلیل سرعت چرخش بالا، که باعث اغتشاش بیش از اندازه در ناحیه نواری شده است و یا به سبب تشکیل اکسیدهای شکننده در دمای بالا باشد [۳۰ و ۳۱].

شکل (۶) قسمت (د) نیز ناحیه متأثر از حرارت را در بزرگ‌نمایی بالاتر با سرعت دورانی ۷۵۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. میانگین اندازه دانه در این ناحیه در حدود ۳۴/۳ میکرومتر است. این درحالی‌است که مطابق با شکل (۶) (د)، اندازه دانه در ناحیه نواری ۱/۴ میکرومتر است که ۹۶ درصد بهبود اندازه دانه را نشان می‌دهد و به طور واضح تأثیر چشم‌گیر فرآیند FSP مشهود است. در شکل (۶) (و) منطقه متأثر از حرارت با بزرگ‌نمایی بیشتر برای نمونه FSP شده با ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نشان داده شده است که در این حالت ۹۲/۶٪ درشت‌تر از منطقه نواری است.

#### بهینه‌سازی

بر اساس الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی برای تابع هدف از پارامترهای تنش تسلیم، استحکام کششی و کرنش تعیین شده است. بر اساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی مورد نظر، شرایط بهینه به دست آمده برای هر پارامتر حاصل گردید. به طوری که دور بهینه برای دستیابی به استحکام کششی مطلوب ۸۲۰ تعیین شده است. بنابراین با توجه به دور بهینه تعیین شده، مقادیر استحکام کششی ۲۷۱ مگاپاسکال، تنش تسلیم ۱۴۶ مگاپاسکال و کرنش بهینه ۱۵/۱ درصد به دست آمده است.

شکل (۷) تصویرمقطع نمونه جوشکاری شده پس از اعمال FSP با سرعت دورانی ۸۲۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. مناطق (۱) و (۲) شکل (۷) بترتیب ناحیه جوش و FSP در نمونه با سرعت چرخش ۸۲۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. تصویر (الف) ریزساختار مرز بین فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش است و تصویر (ب) ریزساختار ناحیه نواری سمت چپ نمونه است. همانند ۵۰۰ و ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، در این حالت نیز به دلیل پدیده تبلور مجدد دینامیکی، ساختار ناحیه نواری نسبت به سایر نواحی، ریزدانه‌تر است. میانگین اندازه دانه در ناحیه نواری ۲/۵۵ میکرومتر است که به ترتیب ۵۶/۸٪ و ۴۵/۱٪ و ۴۵٪ از اندازه دانه در ناحیه نواری نمونه‌های ۵۰۰ و ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه بیشتر است.

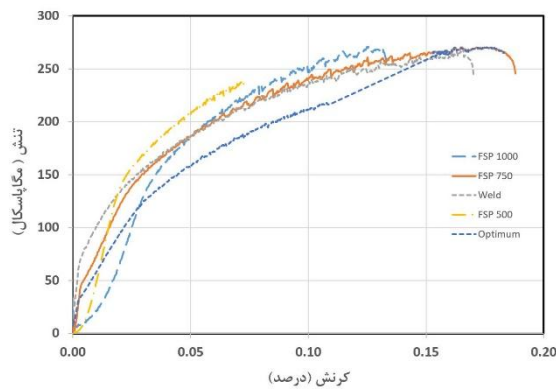
مناطق (۱) و (۲) شکل (۶) تصاویر ناحیه نواری یا هم‌خورده را در دو طرف پنجه جوش نشان می‌دهند. دانه بندی در این ناحیه نسبت به سایر نواحی بسیار ریزتر است. این دانه‌های بسیار ریز و هم‌محور در ناحیه نواری به دلیل وجود باز یابی دینامیکی، سبب تبلور مجدد دینامیکی هندسی و تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته در حین اعمال FSP می‌گردد [۳۰ و ۳۱]. منطقه (۳) از شکل (۶) ناحیه متأثر از حرارت جوش را نشان می‌دهد. شکل (۶) قسمت (الف)، تصویر ریزساختار ناحیه نواری، نمونه جوشکاری شده پس از اعمال FSP با سرعت دورانی ۵۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. در این دور، حرارت کافی ایجاد نشده و عیوب تونلی در منطقه نواری بوجود آمده است. جهت عدم مشاهده این عیب لازم است یا سرعت چرخش افزایش یابد یا سرعت پیشروی کاهش یابد تا میزان حرارت ورودی افزایش یابد. اما افزایش بیش از حد سرعت چرخش جهت حصول حرارت ورودی بیشتر هم، باعث درشت‌تر شدن دانه‌ها در ناحیه نواری شکل می‌گردد. شکل (۶) قسمت (ب) تصویر ریزساختار ناحیه نواری نمونه جوشکاری شده پس از اعمال FSP با سرعت دورانی ۷۵۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در اثر پدیده تبلور مجدد مکانیکی، دانه‌بندی ریزی در منطقه نواری ایجاد شده است. در این حالت، ناحیه نواری کاملاً هم‌خورده و بدون هیچ‌گونه عیبی است. این امر بیان‌گر مناسب بودن پارامترهای فرآیند است. شکل (۶) قسمت (ج) تصویر ریزساختار ناحیه نواری نمونه جوشکاری شده پس از اعمال FSP با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. همانند سرعت ۵۰۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه، در این حالت نیز به دلیل پدیده تبلور مجدد دینامیکی ساختار ناحیه نواری نسبت به سایر نواحی ریزتر است. میانگین اندازه دانه در ناحیه نواری ۲/۵۵ میکرومتر اندازه‌گیری شد که به ترتیب ۵۶/۸٪ و ۴۵/۱٪ از اندازه دانه در ناحیه نواری نمونه‌های FSP شده با سرعت ۵۰۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه بیشتر است.

نکته قابل توجه در این حالت وجود ترک‌های ماکروسکوپی در ناحیه نواری شکل است. همان‌طور که در شکل مشخص است، این ترک‌ها در مرز مشترک بین فلز و ناحیه نواری، شکل نگرفته، بلکه در مرکز ناحیه نواری رخ داده‌اند. وجود

در دقیقه به ترتیب  $12/2\%$  و  $11/8$  درصد کاهش در استحکام کششی ایجاد شده است (شکل ۸).

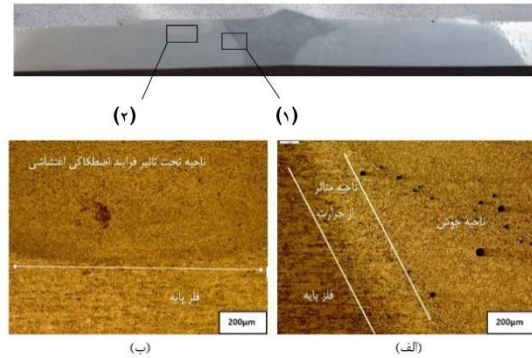
در نمونه بهینه با اعمال FSP با  $820$  دور در دقیقه، منطقه HAZ از نظر ریزساختار ریزتر شده است، اما منطقه جوش که ضعیف‌ترین قسمت فلز است و شکست در این ناحیه اتفاق می‌افتد همچنان دست نخورده و بدون اصلاح ریزساختار باقی مانده است. به همین دلیل با اعمال FSP در دور بهینه، بر روی پنجه جوش که عملاً قسمتی از منطقه HAZ را نیز شامل می‌شود، به واسطه فاصله‌ای که با منطقه FSP دارد بهبودی در استحکام کششی فلز جوش خورده حاصل نگردید. در شکل (۸) نمودار تنش - کرنش نمونه‌های مختلف و نمونه بهینه‌سازی شده آورده شده است. در جدول (۸)، مقادیر استحکام کششی، تسلیم و ازدیاد طول نمونه با اعمال FSP و بدون اعمال آن با نتایج تحقیق برگو و همکاران [۲۰]، مقایسه گردیده است.



شکل (۸) نمودار تنش-کرنش نمونه‌های مختلف به همراه نمونه بهینه شده

جدول (۸) استحکام تسلیم و کششی نمونه‌های مورد آزمایش و همچنین گزارش شده توسط برگو و همکاران [۲۰]

نمونه	استحکام کششی (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	کرنش (درصد)
فلز پایه	۳۰۸	۱۵۸	۱۹/۳
MIG	۲۶۹	۱۴۰	۱۶/۸
MIG+FSP500	۲۳۷/۶	۱۳۸	۷/۲
MIG+FSP750	۲۷۰/۴	۱۵۵	۱۸/۶
MIG+FSP820	۲۷۱	۱۴۶	۱۵/۱
MIG+FSP1000	۲۷۱/۴	۱۴۲	۱۳/۲
Borrego et al. [20]	۲۹۵	۱۴۴	۱۲



شکل (۷) (۱) و (۲) بترتیب ناحیه جوش و FSP شده نمونه با سرعت چرخش  $820$  دور بر دقیقه، (الف) تصویر ریز ساختار مرز بین فلز پایه، ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه جوش. (ب) تصویر ریزساختار ناحیه نواری

نکته قابل توجه، عدم وجود ترک‌های ماکروسکوپی در ناحیه نواری شکل بدلیل ایجاد حرارت مناسب حاصل از اعمال FSP در این شرایط است. اندازه دانه‌ها در منطقه متأثر از حرارت  $91\%$  درشت‌تر از منطقه نواری است.

### استحکام کششی

استحکام کششی برای فلز پایه،  $307$  مگاپاسکال اندازه‌گیری شد ولی بعد از فرآیند جوشکاری استحکام کششی در حدود  $12/7$  درصد کاهش یافته و به  $269$  مگاپاسکال رسیده است. یکی از دلایل این کاهش استحکام، گرمای ورودی در اثر جوشکاری است که باعث تبلور مجدد در منطقه HAZ می‌شود و دانه‌هایی با اندازه ریزتر در منطقه جوش تولید شده است [۳۰]. این امر باعث کاهش استحکام اولیه فلز شده است که در اثر کار سرد تولید شده است. یکی دیگر از دلایل افت استحکام کششی عیوبی است که در اثر جوشکاری در فلز جوش بوجود می‌آید.

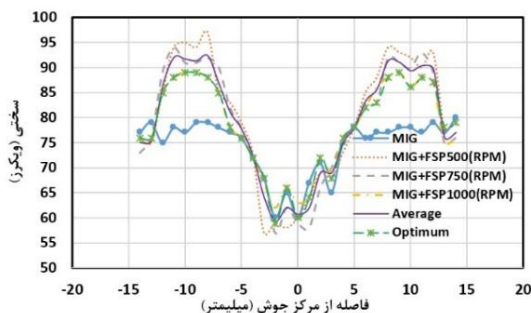
لازم به ذکر است که در آلیاژهای غیر عملیات حرارت‌پذیر، بعد از فرآیند جوشکاری استحکام کششی منطقه HAZ به واسطه انحلال رسوبات تضعیف نمی‌گردد، بلکه آسیب‌های ریزساختاری نظیر بازیابی، تبلور مجدد، رشد دانه‌ها در این منطقه اتفاق می‌افتد و اثرگذار است [۳۰]. در نمونه MIG+FSP500 به دلیل وجود ناپیوستگی و نقص در ناحیه FSP شده، بطور قابل توجهی استحکام کاهش می‌یابد که در مقایسه با آلیاژ پایه، حدود  $22/8\%$  دچار افت گردیده است. در مقابل برای نمونه‌های  $750$  و  $1000$  دور



FSP با سرعت چرخش متفاوت، برای رسیدن به سختی بالاتر، اندازه دانه کوچک‌تری را در منطقه ناگت ایجاد می‌کند. در مقایسه با آلیاژ پایه، افزایش سرعت چرخش حاصل از FSP، باعث افزایش دمای داخلی و در نتیجه رشد دانه شده که منجر به سختی بیشتر می‌شود.

نمونه FSP شده در ۱۰۰۰ دور در دقیقه کمترین سختی را نسبت به نمونه‌های FSP شده با سرعت چرخش پایین‌تر، به دست می‌دهد. سختی در فواصل بین ۴- تا ۴ میلی‌متر از مرکز جوش نسبت به سایر مناطق کمتر است زیرا منطقه ذکر شده تحت تأثیر تغییر شکل پلاستیک حاصل از اعمال FSP قرار نمی‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی رفتار فلز پایه و نمونه‌های جوشکاری شده با اعمال FSP دارای رفتار یکسان ولی با شدت و پیک متفاوت هستند. این پدیده ناشی از هم‌فاز بودن ناحیه جوشکاری شده و فلز پایه و عدم تشکیل فاز جدید طی فرآیند FSP است. در هر دو حالت تطابق خوبی از نظر مقدار داده‌ها بین نتایج تحقیق حاضر و نتایج برگو و همکاران وجود دارد.

در شکل (۱۰) پروفیل میانگین مقادیر سختی در نمونه‌های مختلف نمایش داده شده است. مقدار میانگین داده‌ها به سرعت چرخش ۸۲۰ دور بر دقیقه نزدیک‌تر است. با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده، سختی در حالت MIG جهت دستیابی به افزایش استحکام منطقه مجاور با حرارت حاصل از جوش به عنوان شاخص مقایسه انتخاب شده است. همچنین در فاصله‌های دور از مرکز نزدیک‌ترین مقادیر سختی به نمونه MIG در دوره‌های ۱۰۰۰ و ۸۲۰ دور بر دقیقه است. اما هرچه حرکت به مرکز جوش نزدیک‌تر شود، این مقادیر با داده‌های برگرفته از سرعت چرخش ۷۵۰ و ۸۲۰ دور بر دقیقه هم‌پوشانی چشم‌گیری را نشان می‌دهد.

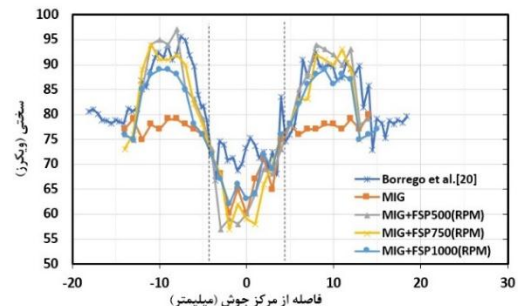


شکل (۱۰) نمودار سختی نمونه MIG و MIG+FSP با سرعت چرخش مختلف و بهینه‌شده

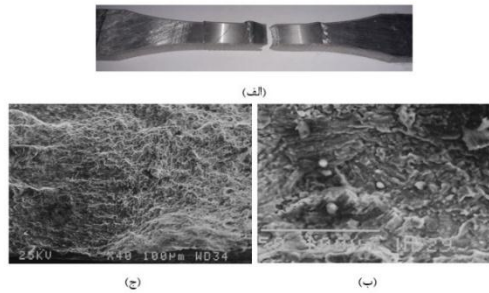
همان‌طور که اشاره شد، برای حفظ پایداری، تمامی شرایط اولیه جهت انجام آزمایشات یکسان بوده و تنها پارامتر متغیر، سرعت چرخش ابزار بود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بین نتایج تحقیق حاضر و تحقیق برگو و همکاران، تقریباً ۲ درصد اختلاف وجود دارد. با توجه به تغییر در سرعت چرخش ابزار ۷۵۰ دور در دقیقه برای کار حاضر و ۱۲۰۰ دور در دقیقه برای آزمایشات برگو و همکاران و همچنین وجود خطاهای موجود در ثبت نتایج تجربی، اختلاف اشاره قابل قبول به نظر می‌رسد.

### سختی

شکل (۹) پروفایل سختی نمونه با و بدون اعمال FSP را برای نمونه‌های تحقیق حاضر و نتایج آزمایش‌های برگو و همکاران [۲۰] را نشان می‌دهد. سختی حاصل از اعمال FSP در مجاورت ناحیه جوش MIG، به دلیل تغییر شکل پلاستیک به‌طور قابل توجهی در ناحیه ناگت افزایش می‌یابد. سختی فلز پایه در حدود ۷۵-۸۰ ویکرز است. میانگین سختی در نمونه‌های FSP شده و FSP نشده در ناحیه ذوب (جوش)، در فاصله ۴- تا ۴ میلی‌متر به ۶۷ ویکرز رسیده است که تقریباً ۱۲ درصد افت نسبت به فلز پایه داشته است. پیک‌های ایجاد شده در ناحیه ذوب شده به دلیل رسوباتی است که در هنگام سرد شدن مجدداً تشکیل می‌شوند [۳۰]. همچنین حداکثر سختی در نمونه ۵۰۰ دور در دقیقه به دست می‌آید که به‌طور معمول بین ۹۰ تا ۹۷ ویکرز و به‌طور متوسط تا ۹۴ ویکرز است که مربوط به منطقه‌ای واقع در فاصله بین ۷- تا ۱۲- میلی‌متر و ۷ تا ۱۱ میلی‌متر از مرکز جوش است، سختی متوسط ناحیه مذکور برای نمونه‌های ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه به ترتیب ۹۲ و ۸۷/۵ ویکرز به‌دست آمده است.



شکل (۹) پروفایل سختی نمونه با اعمال FSP و بدون اعمال FSP در سرعت‌های مختلف چرخش در پژوهش حاضر و سرعت چرخش ۱۲۰۰ دور بر دقیقه برگو و همکاران [۲۰]



شکل (۱۱) (الف) نمونه شکسته شده قطعه FSP شده در سرعت چرخش ۸۲۰ دور بر دقیقه بعد از انجام آزمون کشش. (ب و ج) تصاویر سطح مقطع شکست آن

ج) FSP به دلیل تغییر فرم پلاستیک شدید، سختی منطقه FSP شده را بهبود می بخشد. به نحوی که ساختار ناحیه نواری نسبت به ناحیه متأثر از جوش به دلیل پدیده تبلور مجدد دینامیکی ریزتر می شود، اما در مقایسه با آلیاژ پایه، با اعمال FSP، سختی افزایش می یابد. میانگین سختی در نمونه های FSP شده و نشده در ناحیه جوش، در فاصله ۴- تا ۴ میلی متر به ۶۷ ویکرز رسید که تقریباً ۱۲ درصد افت نسبت به فلز پایه داشته است.

د) اعمال FSP در قسمت پنجه جوش و منطقه HAZ باعث افزایش شعاع انحناء و کاهش تمرکز تنش در قسمت پنجه جوش شده و در نتیجه باعث بهبود ریزساختار در منطقه HAZ می شود.

ه) با تعیین محدوده کرنش می توان روش های جوشکاری را جهت افزایش استحکام ناحیه متأثر از جوش بهینه سازی نمود. برای کرنش های پایین، چون شیب تنش حاصل از فرآیند FSP در نمونه ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نسبت به نمونه های دیگر آزمون کشش شیب ملایم و آرامی است و احتمال شکست قطعه کمتر است. میزان کاهش استحکام کششی در این سرعت، ۱۱/۸ درصد نسبت به فلز پایه است. با توجه به سرعت بهینه تعیین شده، مقادیر استحکام کششی ۲۷۱ مگاپاسکال، تنش تسلیم ۱۴۶ مگاپاسکال و کرنش بهینه ۱۵/۱ درصد به دست آمد.

### قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق قرارداد شماره ۱۱۱۴ مورخ ۹۸/۱/۲۸ انجام گردیده است.

### شکست

شکل (۱۱) نمونه شکسته شده MIG+FSP820 را بعد از انجام آزمون کشش نشان می دهد. آنچه در شکست این نمونه قابل توجه است این است که شکست نه در قسمت پنجه جوش بلکه در منطقه جوش اتفاق افتاده است. که می توان نتیجه گرفت فرآیند اصطکاکی اغتشاشی توانسته است حفره های موجود در پنجه جوش را که در تصویر سطح مقطع شکست شکل (۱۱) قسمت (ج) قابل مشاهده است، از بین ببرد. از طرفی اعمال FSP در قسمت پنجه جوش و منطقه HAZ هم باعث افزایش شعاع انحناء و کاهش تمرکز تنش در قسمت پنجه جوش و هم باعث بهبود ریز ساختار در منطقه HAZ می شود [۳۰].

فرآیند جوشکاری به روش منتخب با استفاده از استانداردهای موجود انجام شد [۲۶]. با توجه به ناحیه شکست نمونه ها شکل (۸) می توان از روش های جوشکاری، محدوده کرنش جدول (۹) تعیین کرد و برای هر محدوده یکی از روش های جوشکاری رو از نظر بهینه سازی مفید دانست. برای مثال، برای کرنش های پایین چون شیب تنش حاصل از فرآیند FSP در نمونه ۱۰۰۰ دور بر دقیقه نسبت به نمونه های دیگر آزمون شیب ملایم و آرامی است می توان در زمان های اولیه تنش کمتری به قطعه وارد کرده و احتمال شکست قطعه کمتر است و از دیدگاه بهینه سازی روش مناسبی است.

### نتیجه گیری

در مقاله حاضر، تلاش شده است تا خواص مکانیکی قطعات جوشکاری شده به روش MIG از جنس آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳، با انجام FSP در منطقه HAZ ارتقا یابد. مهمترین نتایج به دست آمده عبارتند از:

الف) سرعت چرخش پایین تر، باعث ریزتر شدن دانه بندی می شود، هرچند که در سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه به دلیل عدم تولید حرارت کافی، عیوب تونلی بوجود می آید. البته سرعت چرخش بیش از اندازه نیز باعث ایجاد عیوب می شود.

ب) منطقه نواری عاری از عیوب در سرعت بهینه مناسب و برای دستیابی به استحکام کششی مطلوب، ۸۲۰ دور در دقیقه به دست آمد. در این سرعت، اندازه دانه ها در مقایسه با منطقه متأثر از حرارت در حالت پایه، ۹۶٪ کاهش یافت.

## منابع

- [14] Barati M, Abbasi M, Abedini M. "The effects of friction stir processing and friction stir vibration processing on mechanical, wear and corrosion characteristics of Al6061/SiO<sub>2</sub> surface composite", *Journal of Manufacturing Processes*, 2019.
- [15] Wang Y, Li R, Yuan T. "Microstructure and mechanical properties of Al-Si-Ni coating on Cu-Cr substrate prepared by multi-permeation and friction stir processing", *Nano Materials Science*, 2019.
- [16] El-Danaf EA, El-Rayes MM, Soliman MS. "Friction stir processing: An effective technique to refine grain structure and enhance ductility", *Materials & Design*, 2010.
- [17] Nascimento, F., et al. "Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys", *Materials Science and Engineering*, 2009.
- [18] El-Danaf A, El-Rayes M, Soliman S. "Friction stir processing: an effective technique to refine grain structure and enhance ductility", 2010.
- [19] De Jesus JS, Loureiro A, Costa JM, Ferreira JM. "Effect of tool geometry on friction stir processing and fatigue strength of MIG T welds on Al alloys", *Journal of Materials Processing Technology*. 2014.
- [20] Borrego LP, Costa JD, Jesus JS, Loureiro AR, Ferreira JM. "Fatigue life improvement by friction stir processing of 5083 Aluminum alloy MIG butt welds", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2014.
- [21] Deb, K, Pratep, A, Agarwal, S & Meyarivan, T. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE transactions on evolutionary computation*. 2002.
- [22] G. S. Ponticelli, S. Guarino, O. Giannini, F. Tagliaferri, S. Venettacci, and F. Trovalusci. "Aluminium foam production control by using a combined fuzzy-genetic algorithm model," *Procedia CIRP*. vol. 88, pp. 503-508. 2020.
- [23] L. Kanumuri, D. Pushpalatha, A. S. Naidu, and S. K. Singh. "A hybrid neural network-genetic algorithm for prediction of mechanical properties of ASS-304 at elevated temperatures", *Materials Today*. vol. 4, no. 2, pp. 746-751. 2017.
- [24] C. C. Nwobi-Okoye, B. Q. Ochieze, and S. Okiy. "Multi-objective optimization and modeling of age hardening process using ANN, ANFIS and genetic algorithm: Results from aluminum alloy A356/cow horn particulate composite", *Journal of Materials Research and Technology*. vol. 8, no. 3, pp. 3054-3075, 2019.
- [25] ASTM B221. "Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles, and Tubes", 2014.
- [26] An American National Standard. "Specification for Bare Aluminum and Aluminum-Alloy Welding Electrodes and Rods ", 2002.
- [1] E.Delmotte, N. Micone and De Waele. "Testing methodologies for corrosion fatigue", 2015.
- [2] Han Y, Xue S, Fu R, Zhang P. "Effect of hydrogen content in ER5183 welding wire on the tensile strength and fracture morphology of Al-Mg MIG weld", *Vacuum*, 2019.
- [3] Wang BB, Xue P, Xiao BL, Wang WG, Liu YD, Ma ZY. "Achieving equal fatigue strength to base material in a friction stir welded 5083-H19 aluminium alloy joint. *Science and Technology of Welding and Joining*", 2020.
- [4] Khan NU, Rajput S, Gupta V, Verma V, Soota T. "To study mechanical properties and microstructures of MIG welded high strength low alloy steel", *Materials Today: Proceedings* , 2019.
- [5] Moreira P, De Figueiredo M, De Castro P. " Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys", *Theoretical and applied fracture mechanics*, 2007.
- [6] Qin G, Ao Z, Chen Y, Zhang C, Geng P. " Formability behavior of Al/steel MIG arc brazed-fusion welded joint. *Journal of Materials Processing Technology*", 2019.
- [7] Sherafatnia K, Farrahi GH, Mahmoudi AH. " Effect of initial surface treatment on shot peening residual stress field: Analytical approach with experimental verification", *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018.
- [8] Wei K, Lv M, Zeng X, Xiao Z, Huang G, Liu M, Deng J. " Effect of laser remelting on deposition quality, residual stress, microstructure, and mechanical property of selective laser melting processed Ti-5Al-2.5 Sn alloy", *Materials Characterization*, 2019.
- [9] Hönnige JR, Colegrove P, Williams S. " Improvement of microstructure and mechanical properties in Wire + Arc Additively Manufactured Ti-6Al-4V with Machine Hammer Peening", *Procedia Engineering*, 2017 .
- [10] Kumar N, Mishra RS, Huskamp CS, Sankaran KK. "The effect of friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of equal channel angular pressed 5052Al alloy sheet", *Journal of Materials Science*, 2011.
- [11] Sharma SR, Ma ZY, Mishra RS. "Effect of friction stir processing on fatigue behavior of A356 alloy", *Scripta Materialia*. 2004.
- [12] Wang T, Komarasamy M, Shukla S, Mishra RS. "Simultaneous enhancement of strength and ductility in an AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high-entropy alloy via friction stir processing", *Journal of Alloys and Compounds*, 2018.
- [13] Bharti S, Dutta V, Sharma S, Kumar R. "A study on the effect of Friction Stir Processing on the hardness of Aluminum 6000 series", *Materials Today: Proceedings*, 2019.

- 
- [27] ASTM E3. "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens", 2011 .
- [28] ASTM E8. " Standard Test methods for Tention Testing of Metallic Materials".
- [29] ASTM E384. "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials", 2017.
- [30] Del Valle JA, Rey P, Gesto D, Verdera D, Jimenez JA, Ruano OA. "Mechanical properties of ultra-fine grained AZ91 magnesium alloy processed by friction stir processing", Materials Science and Engineering. 2015.
- [31] Bauri R, Yadav D. " Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing: Butterworth-Heinemann", Chapter 2 - Introduction to Friction Stir Processing (FSP). 2018.