



## بررسی تجربی سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر میکرو سختی و ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی

منصور مرد علی زاده<sup>۱\*</sup>، محمد رضا سلیمانی یزدی<sup>۲</sup> و محمد علی صفرخانیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری های نوین، دانشگاه صنایع و معادن ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

<sup>۳</sup> مدرس، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی شهر مجلسی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱/۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۵/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۸

### چکیده

فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، یک فرایند اتصال جامد می‌باشد که در سال ۱۹۹۱ توسط موسسه TWI توسعه داده شد. در پژوهش حاضر فرایند اتصال دهی ورق‌های آلیاژی آلومینیوم ۵۴۵۶ در حالت لبه روی هم، به گونه‌ای که ورق کار سرد شده H321 با ضخامت ۵ میلی‌متر بر روی ورق آنیل با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر قرار می‌گیرد، صورت پذیرفت و تأثیر هم‌زمان پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر ریزساختار و میکروسختی در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرایند اصطکاکی اختلاطی موجب خرد شدن ذرات بین فلزی، همگن شدن ریز ساختار و ریز شدن دانه‌های ناحیه جوش می‌شود. بررسی‌ها نشان داد که افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی (افزایش گام جوشکاری)، سبب افزایش حرارت ورودی، افزایش سیلان عمودی، بزرگی اندازه دانه شده و باعث می‌شود سختی کاهش یابد. با بررسی دقیق‌تر مشاهده گردید با افزایش سرعت دورانی از ۲۵۰ دور بر دقیقه به ۷۵۰ دور بر دقیقه در یک سرعت پیشروی و زاویه استقرار ثابت، اندازه دانه از ۴/۶۵ میکرو متر به ۷/۸۹ میکرو متر افزایش یافته و همچنین با افزایش سرعت پیشروی اندازه دانه‌ها از ۷/۱۱ میکرومتر در سرعت ۲۵ میلی‌متر بر دقیقه به ۴/۷۷ میکرومتر در سرعت ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه کاهش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اختلاطی؛ آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶؛ مخزن تحت فشار؛ اتصال لبه روی هم؛ خواص متالورژیکی.

### Experimental evaluation of the tool rotation speed and feed rate on micro hardness and microstructure in friction stir welding process of aluminum alloy 5456

M. Mardalizadeh<sup>1\*</sup>, M.R. Soleymani Yazdi<sup>2</sup> and M.A. Safarkhanian<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Mech. Eng., Iran University of Industries and Mines, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Imam Hussein University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Lect. Prof., Mat. Eng., Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

### Abstract

Friction stir welding is a solid state process which is developed by Twi institute in 1991. In present study, lap joint welding of 5456 aluminum alloy sheets were carried out whiles hard working H321 sheet with a thickness of 5 mm was on top of a 2.5 mm annealed sheet and the simultaneous effect of rotation speed and tool feed rate parameters on microstructure and micro hardness in friction stir welding were investigated. The results show that the friction stir welding causes crush between metal particles, Microstructure homogenization and fine weld beads. The studies showed that increase of rotation speed and reduction of feed rate (increase of welding pitch) causes increase of heat input, vertical flux, grain size and reduction in hardness. With a closer look It was seen that increase in rotation speed from 250 rpm to 750 rpm in constant feed rate and tool angle, increases the grain size from 4.65 micrometer to 7.89 micrometer and feed rate with increasing, the grain size reduced from 7.11 micrometer in speed of 25 mm/min to 4.77 micrometer in speed of 75 mm/min.

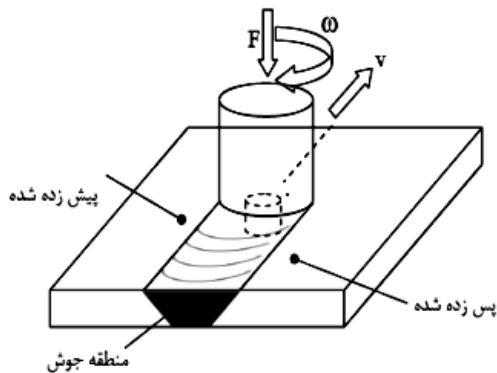
**Keywords:** Friction stir welding; Aluminum alloy 5456; Pressure vessel; Lap joint; Metallurgical properties.

## ۱- مقدمه

منطقه مجزا تشخیص داد. منطقه اتصال<sup>۷</sup>، منطقه تحت تأثیر فرایند ترمومکانیکی<sup>۸</sup> و منطقه متأثر از حرارت<sup>۹</sup> [۲].

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی ورق‌های با ضخامت متفاوت آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ در طرح اتصال لبه روی هم<sup>۱۰</sup>، با افزایش سرعت پیشروی ابزار، اندازه دانه به دلیل کاهش کرنش وارده به فلز پایه کاهش می‌یابد [۳].

آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ از خانواده آلومینیوم گروه ۵۰۰۰ و پر استحکام‌ترین آلیاژ تجاری غیر قابل عملیات حرارتی می‌باشد؛ این آلیاژ حاوی ۰/۸ درصد منگنز، ۵/۱ درصد منیزیم و ۰/۱ درصد کروم می‌باشد. آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ به طور گسترده‌ای در صنایع نظامی، صنایع اتومبیل، ساختمان سازی، مخازن نفت و گاز و خطوط لوله پرفشار که نیاز به مقاومت به خوردگی خوب همراه با استحکام مناسب دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].



شکل ۱- تصویر کلی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی

در این پژوهش بر پایه آزمایش‌های تجربی انجام گرفته در صنعت، فرایند اتصال دهی ورق‌های آلیاژی آلومینیوم ۵۴۵۶ در حالت لبه روی هم، به گونه‌ای که ورق کار سرد شده H321 با ضخامت ۵ میلیمتر بر روی ورق آنیل با ضخامت ۲/۵ میلیمتر قرار می‌گیرد، صورت پذیرفت و تأثیر همزمان برخی پارامترهای اصلی جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (سرعت دورانی ابزار<sup>(ω)</sup> و سرعت پیشروی ابزار<sup>(v)</sup>) در زاویه

فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی<sup>۱</sup>، یک فرایند جوشکاری حالت جامد نسبتاً جدید برای اتصال آلیاژهای فلزی می‌باشد که اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط توماس<sup>۲</sup> و همکارانش در موسسه جوشکاری TWI<sup>۳</sup> [۱] در انگلستان برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم ابداع گشت.

فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نوع خاصی از فرایند جوشکاری حالت جامد می‌باشد که به واسطه مزایایی از قبیل عدم استفاده از مواد مصرفی، سازگار با محیط زیست، راندمان انرژی بالا و فراگیر، سرعت بالای تولید و عدم افت استحکام بعد از جوشکاری، در صنایع مختلف از آن استفاده می‌شود. اصلی‌ترین کاربرد این روش جوشکاری در صنایع مدرن هوا فضا<sup>۴</sup> برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم با استحکام بالا است. همچنین امروزه این روش در صنایع اتومبیل، ریلی، دریایی و در اتصال برخی آلیاژهای فلزی مانند آلیاژهای منیزیم، روی و مس که با روش‌های جوشکاری ذوبی به سختی جوشکاری می‌شوند، استفاده می‌شود [۱ و ۲].

فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی با بستن ورق‌های فلزی روی صفحه‌ای که نگهدارنده نامیده می‌شود آغاز می‌گردد، سپس ورق‌ها باید با نیروی صفحه تقویتی<sup>۵</sup> به خوبی مهار شوند تا از حرکت آنها در جهات مختلف حین جوشکاری جلوگیری به عمل آید. سپس یک ابزار چرخان مصرف نشدنی و مقاوم در برابر سایش متشکل از شانه ابزار<sup>۶</sup> و پین با هندسه خاص، به فصل مشترک قطعات به اندازه پیش بینی شده وارد می‌شود و مواد تحت جوشکاری را می‌فشارد. دوران ابزار باعث گرم و نرم شدن دو ماده در تماس با یکدیگر می‌شود و با حرکت ابزار در طول خط اتصال دو قطعه، ماده نرم شده از دور ابزار به دو طرف حرکت و خط اتصال را محو می‌کند. در شکل ۱ تصویری از روش جوشکاری اصطکاکی اختلاطی نشان داده شده است [۲].

در قطعات جوشکاری شده با روش اصطکاکی اختلاطی می‌توان بر اساس تغییرات ایجاد شده در ریزساختار، سه

<sup>1</sup> Friction Stir Welding (FSW)

<sup>2</sup> Thomas

<sup>3</sup> The welding institute

<sup>4</sup> Aerospace industry

<sup>5</sup> Backing Plate

<sup>6</sup> Shoulder

<sup>7</sup> Stir Zone (SZ)

<sup>8</sup> Thermo Mechanically Affected Zone (TMAZ)

<sup>9</sup> Heat Affected Zone (HAZ)

<sup>10</sup> Lap joint

انجام گرفته بر روی دو ورق متفاوت بود، سختی هر دو ورق به صورت مجزا توسط دستگاه سختی سنج برینل با ساچمه کاربید تنگستنی و نیروی ۶۲/۵ کیلوگرم انجام و آزمون کشش با ظرفیت ۲۰ تن، نرخ کرنش ۲ میلیمتر بر دقیقه و دقت اندازه گیری ۰/۱ نیوتن طبق استاندارد DIN EN 1002 صورت پذیرفت. آنالیز ترکیب شیمیایی به روش کوانتومتری و خواص مکانیکی هر دو ورق در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

## ۲-۲- تجهیزات

به منظور انجام فرایند جوشکاری از دستگاه اتوماتیک جوشکاری اصطکاکی اختلاطی خطی، در حالت نیمه اتومات استفاده شد. شکل ۲ تصویر دستگاه جوشکاری اصطکاکی اختلاطی مذکور را نشان می دهد. همچنین با توجه به نوع فرایند، ابزاری از جنس فولاد گرم کار H13 استفاده گردید. ابزار مورد استفاده پس از طراحی و ماشینکاری جهت رسیدن به خواصی مانند سختی بالا، مقاومت به سایش و افزایش استحکام ابزار، تحت عملیات حرارتی سخت سازی قرار گرفت و سختی ابزار به میزان HRC ۵۰ رسید. مشخصات ابزار مورد استفاده در شکل ۳ و جدول ۳ آورده شده است.

انحراف ابزار ثابت ( $\theta$ ) بر خواص مکانیکی، متالورژیکی و شکل گیری عیوب در ناحیه جوش، مورد تحقیق قرار گرفت. در آزمایشهای تجربی، پس از بازرسی چشمی، سیر تکاملی درشت ساختار و ریز ساختار عیوب ایجاد شده در ناحیه جوش و تحت تأثیر شرایط حاکم بر جوشکاری ارزیابی و بر اساس استاندارد AWS D17.3 [۵] مورد تحلیل قرار گرفت.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مواد اولیه مورد تحقیق

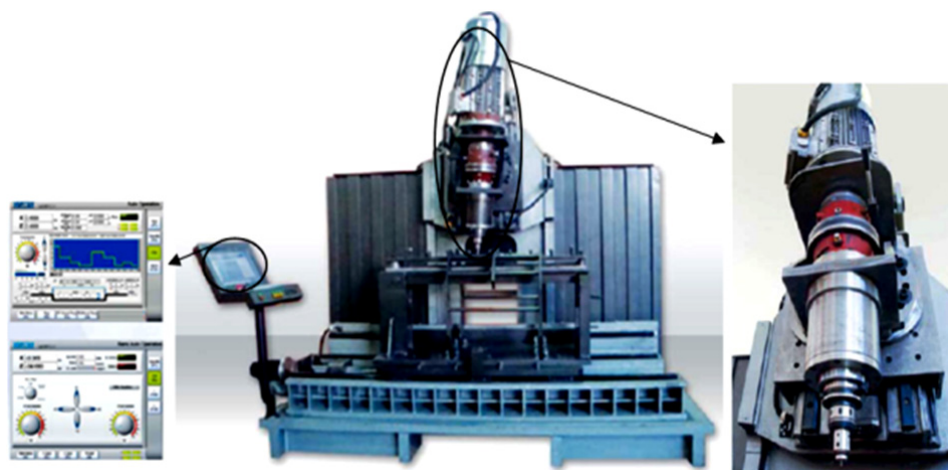
در این پژوهش، از دو ورق آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ با ضخامت ورق پایه (A) و متصل شونده (B) به ترتیب ۵ و ۲/۵ میلیمتر که در صنایع هوافضا کاربرد گسترده دارند، استفاده گردید. شایان ذکر است که اگرچه هر دو ورق از لحاظ آنالیز عنصری مشابه ولی از لحاظ تاریخچه عملیات حرارتی صورت گرفته متفاوت بودند. به گونه ای که ورق ۵ میلیمتری کار سرد شده H321 (مطابق استاندارد ASTM B209 در کار سرد ضخامت ورق ۲۵ درصد کاهش یافته، سپس در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد به مدت دو ساعت حرارت داده و در نهایت در هوا سرد شده بود)، در حالی که ورق ۲/۵ میلیمتری آنیل بود. آنالیز کوانتومتری هر دو ورق توسط دستگاه Jobin Yvon صورت پذیرفت. همچنین از آنجا که نوع عملیات حرارتی

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورقهای مورد استفاده

Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Ni (%)	Zn (%)	Ti (%)	Pb (%)	نمونه
باقیمانده	۰/۰۸۴	۰/۲۰۸	۰/۰۱۴	۰/۶۳۰	۴/۹۱۱	۰/۱۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۲۱	۰/۰۳۰	۰/۰۰۱	ورق A (۵ میلیمتر)
باقیمانده	۰/۱۱۴	۰/۱۸۶	۰/۰۲۵	۰/۵۷۸	۴/۸۱۳	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۴۳	۰/۰۴۲	۰/۰۰۶	ورق B (۲/۵ میلیمتر)

جدول ۲- خواص مکانیکی ورقهای مورد استفاده مطابق استاندارد DINEN10002

نمونه	سختی (HB)	درصد ازدیاد طول (EL) (%)	استحکام تسلیم ( $R_{0.2\%}$ ) (MPa)	استحکام نهایی ( $R_m$ ) (MPa)
ورق A (۵ میلیمتر)	۹۰	۱۲	۲۵۵	۳۶۰
ورق B (۲/۵ میلیمتر)	۸۰	۱۶	۲۱۰	۳۲۵



شکل ۲- تصویری از دستگاه جوشکاری اصطکاکی اختلاطی



شکل ۳- ابزار مورد استفاده در پژوهش

جدول ۳- ابعاد هندسی ابزار مورد استفاده در این پژوهش

عمق رزوه (میلیمتر)	گام رزوه (میلیمتر)	ارتفاع پین (میلیمتر)	قطر بزرگ پین (میلیمتر)	قطر کوچک پین (میلیمتر)	قطر شانه (میلیمتر)
۰/۳	۰/۸	۷	۷	۴	۲۰

جدول ۴- مقادیر اعمال شده پارامترها جهت طراحی آزمون

حداکثر	حداقل	واحد	پارامترهای جوشکاری
۷۵۰	۲۵۰	rpm	سرعت دورانی ابزار
۷۵	۲۵	mm/min	سرعت پیشروی ابزار
۴	۳	degree	زاویه ابزار با قطعه کار

جدول ۵- نمونه‌های آزمایش طراحی شده بر اساس روش رویه پاسخ

ردیف	سرعت دورانی ابزار (rpm)	سرعت پیشروی ابزار (mm/min)	زاویه ابزار با قطعه کار (degree)
۱	۵۰۰	۵۰	۳
۲	۷۵۰	۲۵	۴
۳	۵۰۰	۲۵	۳
۴	۵۰۰	۵۰	۴
۵	۲۵۰	۷۵	۴
۶	۵۰۰	۷۵	۳
۷	۲۵۰	۵۰	۳
۸	۷۵۰	۵۰	۳
۹	۲۵۰	۲۵	۴

لازم به ذکر است که محلول پولتن شامل ۱۲ میلی لیتر اسید کلریدریک، ۶ میلی لیتر اسید نیتریک، یک میلی لیتر اسید فلوئوریک، و یک میلی لیتر آب بود [۶].

جهت بررسی تاثیر پارامترها بر روی اندازه دانه در نمونه‌های متالوگرافی ناحیه دکمه جوش هر دو ورق، از دستگاه میکروسکوپ نوری با قابلیت بزرگنمایی  $\times 1000$ ، مجهز به دوربین عکس برداری کیفیت بالا و قابلیت اتصال به کامپیوتر استفاده گردید و اندازه متوسط دانه ها در مرکز دکمه جوش طبق استاندارد ASTM E112 محاسبه شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- متالوگرافی

شکل ۵ تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی جوش اصطکاکی اختلاطی را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می شود به علت تفاوت در ضخامت ورقهای آلومینیومی جوشکاری شده و تفاوت در حرارت ورودی، ناحیه جوش نامتقارن و با توجه به تغییرات ریز ساختاری همواره چهار ناحیه دکمه جوش، منطقه متأثر از حرارت، منطقه متأثر از عملیات ترمومکانیکال و فلز پایه مشاهده گردید.

شکل ۶ تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار ورق ۵ میلیمتری کار سرد شده H321 و  $\frac{2}{5}$  میلیمتری آنیل شده را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در ورق ۵ میلیمتری کار سرد شده H321 دانه بندی کشیده و در راستای نورد می باشد، ولی در ورق  $\frac{2}{5}$  میلیمتری آنیل شده

برای بررسی تاثیر پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی ابزار بر روی کیفیت جوش از روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> و الگوی آماری مکعب مرکزی<sup>۲</sup> جهت طراحی آزمایش استفاده گردید. همچنین پس از گیره بندی ورقها و تنظیم پارامترها، سعی شد تا جوشکاری همه نمونه‌ها تحت شرایط یکسانی انجام شوند. بدین ترتیب که سرعت ورود ابزار به قطعه کار ۲۰ میلیمتر بر دقیقه، مدت زمان توقف ابزار قبل از حرکت و جوشکاری ۱۵ ثانیه و میزان نفوذ شانه ابزار  $\frac{0}{2}$  میلیمتر بود؛ همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، جهت دوران ابزار با توجه به راست گرد بودن رزوه ابزار، پاد ساعتگرد و جهت جوشکاری، عمود بر جهت نورد ورقها بود.

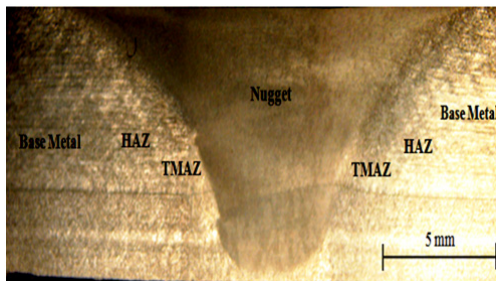
به منظور انجام آزمایش های متالوگرافی (بررسی درشت ساختار، ریزساختار و اندازه دانه)، از کلیه نمونه‌های جوشکاری شده، نمونه ای با ابعاد  $10 \times 40$  میلیمتر در راستای عمود بر خط جوش مطابق استاندارد AWS D 17.3 تهیه شد. جهت راحتی مطالعات میکروسکوپی، کلیه نمونه‌ها مانت شده و سطح تمامی نمونه‌ها با سمباده‌های نرم تا مش ۲۰۰۰ صاف شد و سپس از پودر آلومینای  $\frac{0}{3}$  میکرون، جهت پولیش استفاده گردید. به منظور پدیدار شدن ناحیه جوش، از محلول اچ حاوی ۵۰ میلی لیتر محلول پولتن، ۲۵ میلی لیتر اسید نیتریک غلیظ و ۴۰ میلی لیتر از محلولی که حاوی ۳ گرم اسید کرمیک در ۱۰ میلی لیتر آب بود، استفاده گردید.

<sup>1</sup> Response surface Method (RSM)

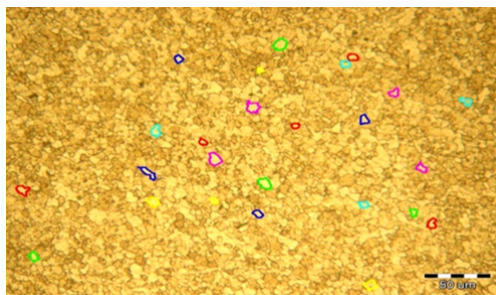
<sup>2</sup> Central Composite Design (CCD)

در منطقه اختلاط با مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی تشکیل می‌شوند [۸].

ناحیه دکمه جوش تحت تغییر شکل پلاستیک قرار گرفته و همچنین گرمای ناشی از عامل اصطکاک در حین فرایند، باعث ایجاد ساختاری دانه ریز و هم محور در این ناحیه می‌شود. دکمه جوش در حقیقت بالاترین دما و تغییر شکل را تجربه می‌کند. اگرچه در این پژوهش دمای فرایند اندازه گیری نشده است، اما بسیاری از تحقیقات نشان داده که حداکثر دما در مرکز جوش در فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، برای آلیاژهای آلومینیوم گروه ۵۰۰۰ بیشتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد نمی‌باشد [۹ و ۱۰].



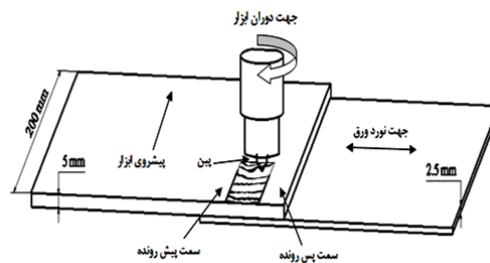
شکل ۵- تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی



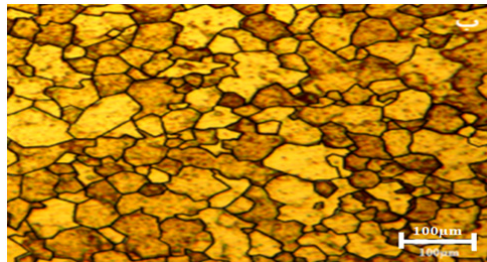
شکل ۷- تصویر ریز ساختار ناحیه دکمه جوش تحت پارامترهای ( $\omega=500 \text{ rpm}$ ,  $V=25 \text{ mm/min}$ ,  $\theta=2^\circ$ )

بر خلاف ورق کار سرد شده، دانه‌ها هم محور و نسبتاً درشت می‌باشند.

کری و همکاران [۷] بیان نموده اند که اندازه دانه در دکمه جوش اصطکاکی اختلاطی، حداقل ۱۰ بار کوچکتر از فلز پایه است. دکمه جوش در حین فرایند جوشکاری تحت دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد ولی کمتر از نقطه ذوب قرار می‌گیرد. به همین دلیل مواد در دکمه جوش تحت تاثیر اختلاط ابزار، متبلور می‌شوند که منجر به تولید دانه‌های ریز و هم محور می‌گردد. در حقیقت بدلیل کار مکانیکی شدید و دمای بالا حین فرایند جوشکاری، دانه‌های بسیار ریز



شکل ۴- تصویری از نحوه عملیات جوشکاری اصطکاکی اختلاطی



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ نوری از ریز ساختار فلز پایه (الف) آلیاژ ۵۴۵۶-H321 (ب) آلیاژ ۵۴۵۶-O

سرعت کمتری اتفاق می افتد و اندازه دانه کاهش می‌یابد [۱۲].

### ۳-۲- ریز سختی

در شکل ۱۰ نمونه ای از توزیع سختی بدست آمده از سطح مقطع ورق ۵ میلیمتر کار سرد شده H321 و ورق ۲/۵ میلیمتر آنیل شده، در نمونه جوشکاری شده با سرعت دورانی ۲۵۰ دور بر دقیقه، سرعت جوشکاری ۲۵ میلیمتر بر دقیقه و زاویه استقرار ۴ درجه نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در ورق ۵ میلیمتر کار سرد شده، سختی از مقدار تقریبی ۱۰۳ ویکرز مربوط به فلز پایه در منطقه تحت تأثیر حرارت با سختی تقریبی ۸۳ ویکرز کاهش می‌یابد. با وارد شدن به منطقه متأثر از ترمومکانیکال مقدار سختی افزایش می‌یابد تا در نهایت در ناحیه دکمه جوش، سختی در حدود ۸۹ ویکرز خواهد بود.

مطابق شکل ۱۰، در ورق کار سرد شده به دلیل کرنش سختی حاصل از فرایند نورد، سختی به نسبت بالایی به دلیل قفل شدن نایجایی‌ها در اثر اعمال کار مکانیکی مشاهده می‌گردد. احتمالاً در ناحیه متأثر از حرارت به دلیل گرمای جوشکاری، مقداری عملیات آنیل صورت گرفته که باعث کاهش سختی شده است. علاوه بر این، از آنجا که این ناحیه تحت تأثیر کار مکانیکی حاصل از دوران ابزار نمی باشد، تنها گرمای اصطکاکی وارد این ناحیه می‌گردد؛ لذا کمترین مقدار سختی در فلز کار سرد شده، در این ناحیه مشاهده می‌شود. با وارد شدن به ناحیه متأثر از ترمومکانیکال به دلیل کرنش پلاستیک حاصل از چرخش ابزار، مقداری از کاهش سختی ناشی از گرمای بالای فرایند جوشکاری جبران می‌شود. ولی بایستی توجه داشت که در هر صورت، سختی ناحیه متأثر از ترمومکانیکال و دکمه جوش نسبت به فلز پایه کار سرد شده، در مقادیر پایین‌تری است. به نظر می‌رسد با ورود به ناحیه دکمه جوش، به دلیل تغییر فرم پلاستیک شدید در منطقه اختلاط و کاهش چگالی نایجایی‌ها در این منطقه، سختی افزایش می‌یابد. علت دیگر افزایش سختی در دکمه جوش، ممکن است بدلیل کاهش اندازه دانه یا غلبه مکانیزم کرنش سختی بر تبلور مجدد باشد.

همچنین مطابق شکل ۱۰ تغییرات توزیع سختی در سطح مقطع عرضی ورق آنیل (۲/۵ میلیمتر) نسبت به ورق

شکل ۷ تصویر میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی  $200 \times$  از ریز ساختار دکمه جوش در نمونه تحت پارامترهای  $(\omega=500 \text{ rpm}, V=25 \text{ mm/min}, \theta=2^\circ)$  را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این ناحیه دارای ریز ساختاری با دانه بندی ریز و کاملاً هم محور قابل شناسایی می‌باشد. در حقیقت دانه‌ها در این ناحیه بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی را تجربه می‌کنند. همچنین به خوبی قابل قبول است که در اثر انجام پدیده اختلاط در ناحیه دکمه جوش، دانه بندی درشت و کشیده فلز پایه به دانه‌های ریز، هم محور و یکنواخت تبدیل می‌گردد.

در شکل ۸ تأثیر سرعت دورانی ابزار بر ریز ساختار ناحیه دکمه جوش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت دورانی در یک سرعت پیشروی و زاویه استقرار ثابت، اندازه دانه از  $4/65$  میکرو متر در سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه به  $7/89$  میکرو متر در سرعت ۷۵۰ دور بر دقیقه افزایش یافته است.

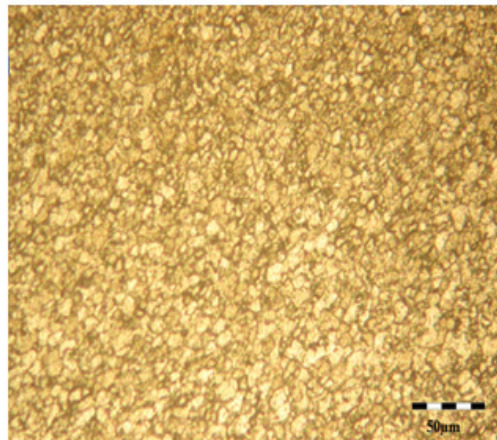
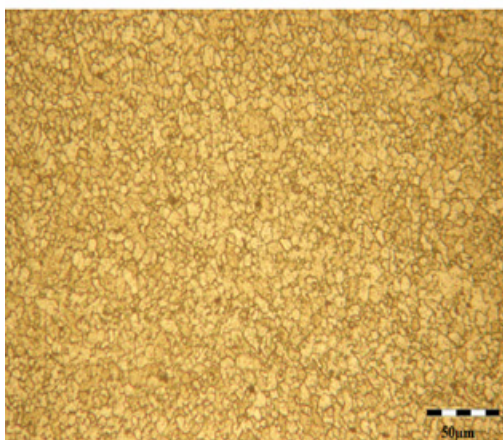
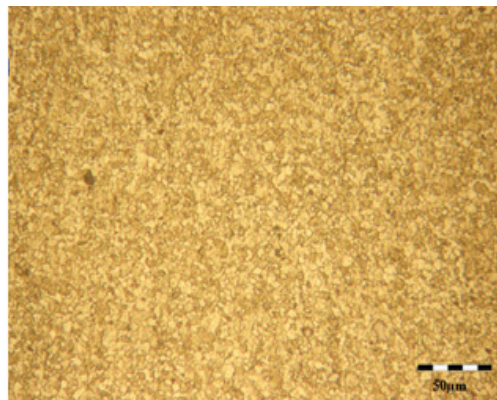
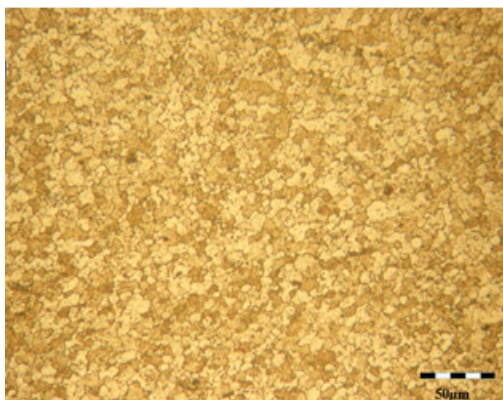
بوفاً<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۱] بیان نموده اند با افزایش سرعت دورانی، هر ذره‌ای از ماده فلز پایه مجبور می‌شود که با ابزار دورانی در یک مسیر بزرگتری بچرخد و کرنش بیشتری را تحمل می‌کند. در حقیقت به نظر می‌رسد، افزایش سرعت دورانی ابزار سبب افزایش حرارت ورودی فرایند و منجر به افزایش اندازه دانه‌های تبلور مجدد یافته به علت رشد دانه‌ها در دمای بالا شده و باعث می‌شود فلز پایه کرنش بیشتری را حین فرایند جوشکاری اصطکاکی تحمل می‌کند.

شکل ۹ تأثیر سرعت پیشروی ابزار، بر ریز ساختار ناحیه دکمه جوش را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی در یک سرعت دورانی و زاویه استقرار ثابت، اندازه دانه‌ها از  $7/11$  میکرو متر در سرعت ۲۵ میلیمتر بر دقیقه به  $4/77$  میکرو متر در سرعت ۷۵ میلیمتر بر دقیقه کاهش یافته است. در واقع به نظر می‌رسد که افزایش سرعت پیشروی ابزار، باعث کاهش مقدار چرخش (کرنش) در واحد طول شده و در نتیجه همراه با حرارت کمتر، دانه‌ها ریز تر می‌شوند. در حقیقت چون گرمای ورودی فرایند در دکمه جوش کمتر می‌باشد، در حین فرایند تبلور مجدد مکانیکی، پدیده رشد دانه‌ها با

<sup>1</sup> Buffa

۱۱ و ۱۲ به ترتیب تغییرات توزیع سختی ورق ۵ میلیمتری کار سرد شده و ورق ۲/۵ میلیمتری آنیل شده را بر اثر تغییرات سرعت دورانی ابزار در سرعت پیشروی و زاویه استقرار ثابت نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت دورانی ابزار، سختی دکمه جوش کاهش می‌یابد. علت کاهش سختی، درشت شدن دانه‌های متبلور شده دکمه جوش به دلیل افزایش گرمای ورودی فرایند در اثر افزایش سرعت دورانی می‌باشد. شکل ۱۲ تغییرات توزیع سختی بر اثر افزایش سرعت دورانی ابزار در ورق آنیل شده را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است، با افزایش سرعت دورانی حداقل سختی که مربوط به ناحیه متأثر از حرارت می‌باشد، بیشتر

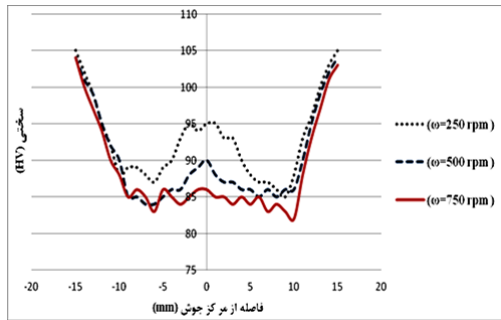
کار سرد شده ناچیز است. به گونه‌ای که مقدار سختی فلز پایه که در حدود ۸۶ ویکرز است، با ورود به منطقه متأثر از حرارت تا ۸۰ ویکرز کاهش می‌یابد. از آنجا که این ورق آنیل می‌باشد، کاهش اندک سختی در ناحیه متأثر از حرارت را می‌توان به بزرگ شدن دانه‌ها در این ناحیه به دلیل گرمای ورودی فرایند جوشکاری نسبت داد. سپس مقدار سختی در منطقه متأثر از ترمومکانیکال به ۸۸ ویکرز و در ناحیه دکمه جوش افزایشی تا حدود ۹۱ ویکرز از خود نشان می‌دهد. به گونه‌ای که می‌توان گفت سختی دکمه جوش از فلز پایه اندکی بیشتر است. دلیل این افزایش سختی، تبلور مجدد دینامیکی در دکمه جوش و تشکیل دانه‌های ریز هم محور نسبت به دانه‌های درشت‌تر فلز پایه می‌باشد. در شکل‌های



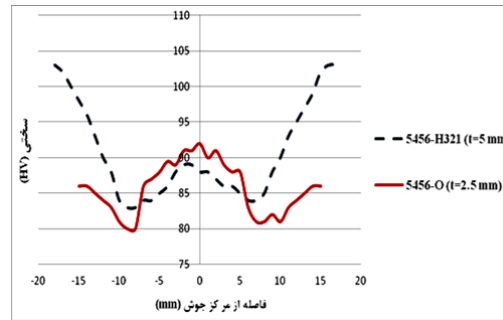
شکل ۹- تأثیر افزایش سرعت پیشروی ابزار بر ریز ساختار ناحیه دکمه جوش

شکل ۸- تأثیر افزایش سرعت دورانی ابزار بر ریز ساختار ناحیه دکمه جوش

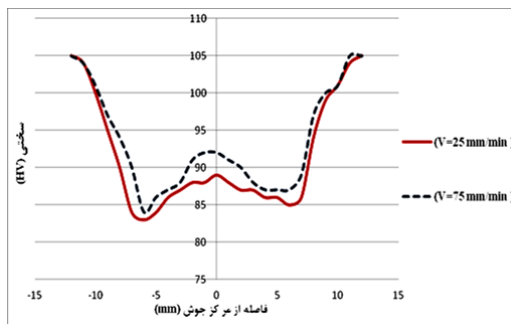




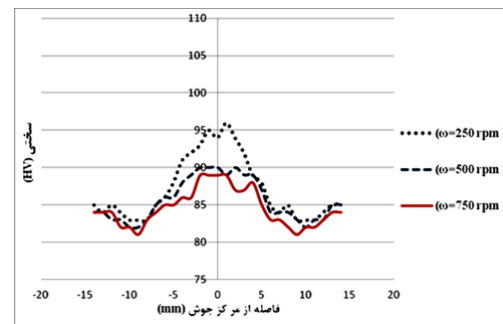
شکل ۱۱- تأثیر سرعت دورانی بر تغییرات توزیع سختی ورق ۵ میلیمتر کار سرد شده در سرعت پیشروی ثابت  $(V=50 \text{ mm/min})$  و زاویه ثابت  $(\theta=3^\circ)$



شکل ۱۰- توزیع سختی بدست آمده از سطح مقطع ورق ۵ میلیمتر کار سرد شده و ورق ۲/۵ میلیمتر آنیل شده



شکل ۱۳- تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر تغییرات توزیع سختی ورق ۵ میلیمتر کار سرد شده در سرعت دورانی ثابت  $(\omega=250 \text{ rpm})$  و زاویه استقرار ثابت  $(\theta=4^\circ)$



شکل ۱۲- تأثیر سرعت دورانی ابزار بر تغییرات توزیع سختی ورق ۲/۵ میلیمتر آنیل شده در سرعت پیشروی ثابت  $(V=50 \text{ mm/min})$  و زاویه استقرار ثابت  $(\theta=3^\circ)$

سرعت پیشروی ابزار، گرمای ورودی کاهش یافته و در حین فرایند تبلور مجدد مکانیکی، پدیده رشد دانه ها با سرعت کمتری اتفاق می افتد و اندازه دانه کاهش و در نتیجه سختی افزایش می یابد.

#### ۴- نتایج

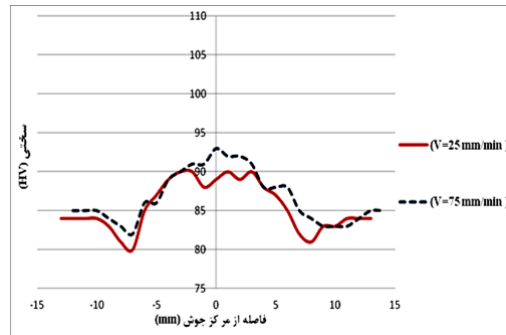
در این پژوهش فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بر روی ورقهای آلومینیومی با ضخامت متفاوت مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت که نتایج بصورت خلاصه در زیر آمده است:

۱- افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی ابزار (افزایش گام جوشکاری)، سبب افزایش حرارت ورودی فرایند، افزایش سیلان عمودی مواد و بزرگی اندازه دانه شده، و باعث کاهش سختی می شود.

کاهش می یابد. به نظر می رسد درشت شدن دانه ها در اثر افزایش گرمای ورودی در این ناحیه علت این امر باشد. علاوه بر این، سختی دکمه جوش نیز با افزایش سرعت دورانی کاهش می یابد. کاهش سختی دکمه جوش در اثر افزایش سرعت دورانی به این دلیل است که افزایش گرمای ورودی و به دنبال آن افزایش دمای فرایند، سبب می شود که در حین تبلور مجدد دینامیکی، دانه ها رشد بیشتری داشته باشند.

در شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب تغییرات توزیع سختی ورق ۵ میلیمتر کار سرد شده و ورق ۲/۵ میلیمتر آنیل شده را بر اثر تغییرات سرعت پیشروی ابزار جوشکاری در سرعت دورانی و زاویه استقرار ثابت نشان داده شده است. همانطور که در شکل های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می شود، با افزایش سرعت پیشروی ابزار، سختی ناحیه دکمه جوش افزایش می یابد. به نظر می رسد دلیل آن این می تواند باشد که با افزایش

- [۳] شیرازی شیرازی ح، خیراندیش ش، صفرخانیان م (۱۳۹۱)، تاثیر سرعت پیشروی ابزار جوشکاری اصطکاکی اختلاطی (Lap-Joint) بر ریزساختار اتصال لبه روی هم (FSW) ورقهای با ضخامت متفاوت آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶. سومین کنفرانس بین المللی عملیات حرارتی مواد، اصفهان.
- [4] Hua C, Keng Y, Tao L, Shan C, Yong Zh (2006) The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. Mater Sci Eng A: 64-69.
- [5] American Welding Society D17.3 (2010) Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Hardware.
- [6] Kathleen M (1985) Metals Handbook: Metallography and Microstructure. ASME, Vol.9, Ninth edition: 352-354.
- [7] Cerri E, Leo P (2011) Mechanical properties evolution during post-welding heat treatments of double lap Friction Stir Welded joints. Mater Des: 3465-3475.
- [8] R Fonda R, Paoa P, Jonesa H, Fenga C, Connollyb B (2009) Microstructure, mechanical properties, and corrosion of friction stir welded Al 5456. Mater Sci Eng A: 1-8.
- [9] Caizhi Zh, Xinqi Y, Guohong L (2006) Investigation of microstructures and fatigue properties of friction stir welded Al-Mg alloy. Mater Chem Phys: 285-290.
- [10] Etter A, Baudin T, Fredj N, Penelle R (2007) Recrystallization mechanisms in 5251 H14 and 5251 O aluminum friction stir welds. Mater Sci Eng A: 94-99.
- [11] Buffa G, Campanile G, Fratini L (2009) Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties. Mater Sci Eng A: 19-26.
- [12] Xiao B, Wang D, Ma Z (2010) Effect of heat input on tensile properties and fracture behavior of Friction Stir Welded Mg-3Al-1Zn alloy. Mater Sci Eng A: 708-714.
- [13] Dubourg L, Merati A, Jahazi M (2010) Process optimization and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin. Mater Des: 3324-3330.
- [14] M. Sahin, H. Erol Akata, T. Gulmez. Sahin M (2007) Characterization of mechanical properties in AISI 1040 parts welded by friction welding. Mater Charact: 1033-1038.
- [15] Midling O, Kvåle J (1999) Industrialization of the Friction Stir welding technology in panels' production for the maritime sector. In: The 1st International Symposium on FSW, USA.
- [16] Schillin C, Santos J (2004) Method and Device for Joining at Least Two Adjoining Work Pieces by Friction Welding. U.S. Patent, No 6,722,556.



شکل ۱۴- تأثیر سرعت پیشروی ابزار بر تغییرات توزیع سختی ورق ۲/۵ میلی‌متر آیل شده در سرعت دورانی ثابت ( $\omega=250$  rpm) و زاویه ثابت ( $\theta=4^\circ$ )

- ۲- دانه‌ها در ناحیه دکه جوش بسیار ریز و کاملاً هم محور می‌باشند و اندازه آنها متناسب با متغیرهای جوشکاری، به طور میانگین بین ۴/۶۵ تا ۷/۸۹ میکرومتر تغییر می‌کند. در حقیقت دانه‌ها در این ناحیه بازایی و تبلور مجدد دینامیکی را تجربه می‌کنند.
- ۳- افزایش سرعت دورانی ابزار به دلیل افزایش سیلان پلاستیک مواد، سبب افزایش حرارت ورودی فرایند شده و منجر به افزایش اندازه دانه‌های تبلور مجدد یافته به علت رشد دانه‌ها در دمای بالا می‌شود و سختی کاهش می‌یابد.
- ۴- افزایش سرعت پیشروی ابزار، سبب کاهش حرارت ورودی فرایند شده و باعث می‌شود پدیده رشد دانه‌ها با سرعت کمتری اتفاق افتد و در نتیجه اندازه دانه کاهش و سختی افزایش می‌یابد.

### تقدیر و تشکر

از زحمات و همکاری پرسنل محترم گروه مهندسی مواد صنایع صنایع به خصوص جناب آقایان مهندسین رنجبرکی، رضایی، دهقانی، قاسمی، تظهیری و علیزاده که در انجام آزمایش‌ها پشتیبان اینجانب بودند، سپاسگزاری می‌نمایم.

### مراجع

- [1] Thomas W, Nicholas D, Needham J, Murch M, (1991) Patent Application. No. 9125978.8.
- [2] Mishraa R, Mab Z (2005) Friction stir welding and processing. Mater Sci Eng: 50: 1-78.