



# Microstructure evaluation and mechanical properties of friction stir welding of accumulative roll bonded AA2024/AA5083 composite strips

S. Sajjadi Nikoo, F. Qods\*, M. Yousefieh\*

Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Received 12 February 2025 ; Accepted 26 April 2025

## Abstract

In this research, the ultrafine-grained (UFG) composite of AA2024 and AA5083 aluminum alloys was made by accumulative roll bonding (ARB) process and butt-welded by friction stir welding. Friction stir welding (FSW) is the best method for the joining of UFG strips. Microstructural investigations were performed by optical microscope and transmission electron microscope in the stir zone (SZ), thermo-mechanically affected zone (TMAZ) and heat affected zone (HAZ). The fine recrystallized structure with a grain size of about 900 nm was determined in the weldment. Due to the strengthening mechanisms of grain boundaries, nano-meter size precipitates and solid solution strengthening, the high strength of about 403 MPa was achieved. The presence of precipitates with homogeneous distribution in FSWed strips caused a high ductility of about 14% compared to the fabricated composite strips (6.9%). The high hardness of the SZ was caused by the formation of new equiaxed grains and fine precipitates, and also the decrease in the hardness of the HAZ was due to the dissolution and coarsening of T-phase precipitates.

**Keywords:** Accumulative roll bonding, ultrafine-grained composite, friction stir welding, equiaxed grains, continuous dynamic recrystallization.

\*Corresponding Author: F. Qods, [qods@semnan.ac.ir](mailto:qods@semnan.ac.ir); M. Yousefieh, [m.yousefieh@semnan.ac.ir](mailto:m.yousefieh@semnan.ac.ir);



## ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اختلاطی ورق‌های کامپوزیت نورد تجمعی شده AA2024/AA5083

سعید سجادی نیکو، فتح اله قدس\*، محمد یوسفیه\*

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان.

دریافت مقاله: 1403/11/24؛ پذیرش مقاله: 1404/02/06

### چکیده

در این تحقیق کامپوزیت فوق ریزدانه از آلیاژهای آلومینیم AA2024 و AA5083 توسط فرایند اتصال نورد تجمعی ساخته شد و توسط جوشکاری اصطکاکی اختلاطی به صورت سربه‌سر جوشکاری شدند. جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بهترین روش اتصال ورق‌های فوق‌ریزدانه است. بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی عبوری از نواحی اختلاط، ترمومکانیکی و ناحیه متأثر از حرارت انجام شد. ساختار تبلور مجدد یافته ریز در ناحیه جوشکاری شده با اندازه دانه حدود 900 nm مشخص شد. در اثر مکانیزم‌های استحکام‌دهی مرزدانه‌ها، رسوبات نانومتری و استحکام‌دهی محلول جامد، استحکام بالایی در حدود 403 MPa به دست آمد. وجود رسوبات با توزیع همگن در ورق‌های جوشکاری اصطکاکی شده باعث انعطاف‌پذیری بالا در حدود 14% نسبت به ورق‌های کامپوزیت ساخته شده (6/9%) گردید. سختی بالای ناحیه اختلاط ناشی از تشکیل دانه‌های هم‌محور جدید و رسوبات ریز و کاهش سختی ناحیه متأثر از حرارت در اثر انحلال رسوبات T-phase و درشت شدن آن‌ها بود.

**کلمات کلیدی:** نورد تجمعی، کامپوزیت فوق‌ریزدانه، جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، دانه‌های هم‌محور، تبلور مجدد دینامیکی پیوسته.

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: فتح اله قدس، [qods@semnan.ac.ir](mailto:qods@semnan.ac.ir)؛ محمد یوسفیه، [m.yousefieh@semnan.ac.ir](mailto:m.yousefieh@semnan.ac.ir)

### 1- مقدمه

نورد تجمعی و از آنجا که ساخت ورق‌های بزرگ را برای استفاده در صنایع اتومبیل‌سازی و هوافضا مشکل کرده است، نحوه اتصال این ورق‌های فوق‌ریزدانه بسیار مهم است. جوشکاری اصطکاکی اختلاطی از فرایندهای حالت جامد (غیرذوبی) است که برای اتصال ورق‌های آلومینیمی که با فرایندهای جوشکاری ذوبی قابل جوشکاری نبودند به وجود آمد [4-5]. هنگام جوشکاری اصطکاکی آلیاژهای نورد تجمعی شده به دلیل حرارت ورودی کم، مانع رشد دانه‌های

فرایند اتصال نورد تجمعی به عنوان یکی از فرایندهای تغییر شکل پلاستیک، روشی مناسب برای تولید ورق‌های آلومینیمی و فولادی فوق‌ریزدانه (زیر 1 میکرون) معرفی گردید. که استحکام و شکل‌پذیری مناسبی در مقایسه با ورق‌های معمولی می‌دهد و سبب شده در ساخت تجهیزات سبک صنایع اتومبیل‌سازی و صنایع پیشرفته مورد استقبال قرار گیرد [1-3]. به دلیل محدودیت‌های تولید ورق‌های نانوساختار به روش

ناحیه اختلاط بود. یوسفیه و همکاران [16]، بر روی ورق‌های آلیاژ AI-0/2 wt% Sc ریزدانه شده به روش نورد تجمعی، جوشکاری اصطکاکی انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که سرعت دورانی بیشترین تأثیر را بر روی خواص مکانیکی آلومینیم نورد تجمعی شده دارد. تبلور مجدد دینامیکی باعث ایجاد و توسعه دانه‌های هم‌محور می‌شود که ترکیب خوبی از استحکام و چقرمگی را نشان می‌دهد. عملیات اصطکاکی اختلاطی همچنین برای تولید مواد فلزی ریزدانه استفاده می‌شود. تغییر فرم پلاستیک توسط جوشکاری بر روی ورق‌های درشت دانه معمولی، این امکان را می‌دهد که ساختار ریزدانه مشابه ساختار کامپوزیت‌های فوق‌ریزدانه ایجاد شود و خواص مکانیکی را بهبود ببخشد.

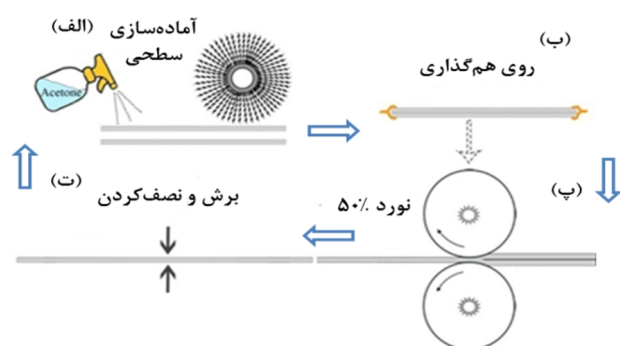
کامپوزیت‌های لایه‌ای غیرهمجنس ساخته شده به روش نورد تجمعی و ساختار فوق‌ریزدانه، استحکام بالاتری نسبت به آلیاژهای پایه خود دارند. همچنین به دلیل مشکل تولید قطعات بزرگتر آلیاژهای فوق‌ریزدانه، لازم است قطعات کوچکتر با یکی از فرایندهای جوشکاری به همدیگر متصل شوند. در این مطالعه، کامپوزیت‌های چند لایه غیرهمجنس فوق‌ریزدانه از آلیاژهای AA2024 و AA5083 برای اولین بار با استفاده از فرایند نورد تجمعی ساخته شدند.

تاکنون هرگونه تحقیقی در زمینه جوشکاری اصطکاکی ورق‌های نورد تجمعی شده انجام گرفته شده است به صورت همجنس بوده و بررسی بر روی جوشکاری اصطکاکی ورق‌های نورد تجمعی شده غیرهمجنس انجام نشده است. بنابراین این مطالعه به جوشکاری اصطکاکی اختلاطی کامپوزیت فوق ریزدانه AA2024/AA5083 تولید شده در چهار سیکل فرایند نورد تجمعی اختصاص یافت. آلیاژها سپس تحت جوشکاری اصطکاکی اختلاطی قرار گرفتند. ارتباط بین خواص مکانیکی و ساختار نواحی مختلف جوش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. چنین اتصال غیرهمجنسی می‌تواند به صورت صنعتی در کاربردهایی که نیاز به استحکام بالاتر آلیاژها بدون تغییر ابعاد و همچنین عملکرد خوردگی و کششی مناسب مورد نظر است مورد استفاده قرار گیرد.

فوق‌ریز شده و از طرفی خود نیز دانه‌های تبلور مجدد یافته ریز در ناحیه اتصال ایجاد می‌کند و خواص دانه‌های نانو ساختار باقی می‌ماند؛ از اینرو بهترین روش جوشکاری برای این ورق‌ها محسوب می‌شود [7 و 6]. در این فرایند ابزاری در حال چرخش شامل پین و شانه ابزار وارد لبه ورق‌ها یا درز بین دو قطعه شده و در طول مسیر اتصال حرکت کرده و قطعات را به همدیگر متصل می‌کند [5، 6 و 8]. آلیاژ آلومینیم 2024 به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و شکل‌پذیری خوب به طور وسیعی در صنایع هوایمایی کاربرد پیدا کرده است [9 و 10]. آلیاژ آلومینیم 5083 به دلیل ویژگی‌های زیادی مانند قیمت کم، استحکام نسبتاً خوب، جوش‌پذیری خوب، تغییر شکل‌پذیری زیاد و مقاومت به خوردگی عالی باعث کاربرد آن در اتصالات اجزاء هوایمیا شده است [11 و 12]. ساتو و همکاران [13]، از آلیاژ آلومینیم AA1100 تحت 6 سیکل فرایند نورد تجمعی، آلومینیم فوق ریزدانه تهیه کرده و آن‌ها را توسط جوشکاری اصطکاکی اختلاطی به همدیگر متصل کردند. نتایج نشان داد که جوشکاری اصطکاکی از رشد زیاد دانه جلوگیری می‌کند. با اینحال مقداری رشد دانه نسبت به نمونه کامپوزیت فوق‌ریزدانه اتفاق می‌افتد که باعث کاهش سختی می‌شود. سان و همکاران [14]، ورق‌های آلومینیم خالص AA1050 فوق‌ریزدانه با ضخامت 2 mm و تهیه شده تحت 5 سیکل نورد تجمعی را در سه گام دورانی (سرعت دورانی / سرعت خطی) تحت جوشکاری اصطکاکی اختلاطی قرار دادند. نتایج نشان داد که اندازه دانه اولیه اثر بسیار زیادی بر روی خواص داشت. تایپک و همکاران [15]، دو آلیاژ آلومینیمی AA1050 و AA6016 را به صورت جداگانه تحت 8 سیکل فرایند نورد تجمعی قرار داده و توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی به صورت مجزا به هم متصل کردند. آن‌ها نشان دادند که جوشکاری اصطکاکی اختلاطی بر روی ورق‌های نورد تجمعی شده باعث ایجاد دانه‌های تبلور مجدد یافته و بزرگتری در ناحیه اختلاط می‌شود. سختی به میزان 20 و 50 درصد به ترتیب در آلیاژهای AA1050 و AA6061 کاهش داشته است. کاهش سختی مربوط به تشکیل دانه‌های تبلور مجدد یافته و تشکیل دانه‌های بزرگتر در

## 2- مواد و روش تحقیق

شده. سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری LBD OLYMPUSU- 25 بررسی شدند. ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی عبوری (FEI Tecnai G2 F20 Super Twin) بررسی شد. به منظور آماده سازی نمونه TEM، فویل نازکی از صفحه عمود بر جهت TD آماده شد. فویل در محلول 300 ml HNO<sub>3</sub> -700 ml CH<sub>3</sub>OH در دمای 30°C- تحت جت پولیش قرار گرفت. نمودار سختی ویکرز از صفحه عمود بر خط مرکزی جوشکاری از ناحیه فلزپایه تا نواحی مختلف جوش تحت نیروی 25 g طی 15 s توسط دستگاه MMT-7 ساخت شرکت BUEHLER تهیه شد. خواص کششی در جهت عمود بر مسیر جوشکاری طبق استاندارد ASTM، E8 تهیه شدند. از دستگاه SANTAM، STM-400 در سرعت ثابت برای انجام آزمایش کشش استفاده شد.



شکل 1- شماتیک فرایند نورد تجمعی.

## 3- نتایج و بررسی

## 3-1- مورفولوژی سطحی

معمولا کیفیت سطحی ناحیه جوشکاری شده نشان دهنده کیفیت خوب و استاندارد اتصال است. در اینجا مطابق شکل (2) سطح خط جوش دارای کیفیت خوب و صاف و بدون هیچ عیب ظاهری و همچنین با کمترین تفرع نسبت به فلزپایه است چرا که مقداری تفرع باید در اثر فشار عمودی ناشی از پین وجود داشته باشد تا جریان مواد به بیرون هدایت نشود.

## 3-2- توزیع دمایی

شکل (3) شماتیکی از فرایند جوشکاری اصطکاکی و نحوه

در این پژوهش از ورق‌های AA5083 و AA2024 با ضخامت 1/5 mm استفاده شد. جدول (1) ترکیب شیمیایی AA2024 و AA5083 را نشان می‌دهد. ورق‌های آلومینیم در طول 120 mm و عرض 60 mm بریده شدند. سپس ورق AA5083 و AA2024 در دمای 510 °C به مدت 2 ساعت تحت عملیات آنیل قرار گرفتند.

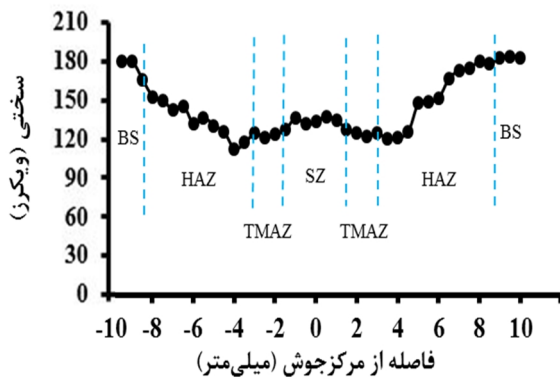
جدول 1- ترکیب شیمیایی آلیاژهای AA5083 و AA2024 مورد استفاده در این تحقیق.

|          | Al | Cu   | Mg   | Mn   | Fe   |
|----------|----|------|------|------|------|
| Balanced |    | 4.65 | 1.51 | 0.67 | 0.24 |
| Balanced |    | 0.03 | 4.78 | 0.65 | 0.27 |

برای شروع نورد تجمعی سطح ورق‌ها بوسیله استون از چربی زدوده شد. سطح تماس ورق‌ها با برس فلزی متصل به دریل خراشیده شد. ورق‌ها بوسیله ایجاد سوراخ در دو سر و با سیم مسی به هم متصل شدند. پس از پیشگرم، نورد با کاهش ضخامت 50% انجام شد. از دستگاه نورد آزمایشگاهی با قطر غلتک نورد 110 mm و سرعت دستگاه 28 rpm استفاده شد. فرایند فوق تا چهار سیکل انجام شد. فرایند نورد تجمعی به صورت شماتیک در شکل (1) نشان داده شده است. برای شروع جوشکاری، کامپوزیت آماده شده در ابعاد 120×30 میلی‌متر بریده شده و لبه‌هایی که قرار بود به هم متصل شوند نیز به صورت صاف آماده‌سازی شدند. سپس به صورت لب به لب در راستای موازی با جهت نورد به وسیله جوشکاری اصطکاکی به همدیگر متصل شدند. ابزار مورد استفاده از جنس فولاد ابزار گرمکار H13 با سختی 62 HRC می‌باشد. ابزار جوشکاری شامل پین مربعی با قطر شانه 10 mm و قطر پین 3/5 mm و طول پین 1/2 mm مورد استفاده قرار گرفت. فرایند جوشکاری اصطکاکی در سرعت دورانی ابزار 655 rpm، سرعت خطی 110 mm/min در زاویه ابزار 3° نسبت به محور عمود انجام گرفت. نمونه‌های جوشکاری شده، ابتدا مانت سرد شدند و سپس تا سمباده شماره 1500 تحت عملیات سمباده‌زنی قرار گرفتند. نمونه جوش‌ها پولیش شده و سپس با اچانت رنگی با ترکیب (190 mL water, 5 mL nitric acid, 2 mL

### 3-3- تغییرات سختی

نمودار ریزسختی نواحی جوش نمونه فوق‌ریزدانه جوشکاری شده در شکل (4) نشان داده شده است. چهار ناحیه فلزپایه، متأثر از حرارت، ترمومکانیکی و ناحیه اختلاط ایجاد شده در اثر حرکت مکانیکی پین و بالارفتن دما مشخص می‌شود [21]. فلزپایه فوق‌ریزدانه میانگین سختی بالایی در حدود 181 ویکرز را نشان می‌دهد. در مقابل ناحیه جوشکاری شده، سختی ویکرز پایین‌تری را نشان داده است. با اینحال سختی ناحیه اختلاط کمی افزایش را نسبت به بقیه نواحی جوش نشان می‌دهد. میانگین سختی در ناحیه اختلاط نمونه جوش حدود 132 ویکرز بدست آمده است. در نمودار سختی شکل (4) به سمت ناحیه متأثر از حرارت مقداری سختی کاهش پیدا کرده و به سمت فلز پایه سختی افزایش پیدا می‌کند.



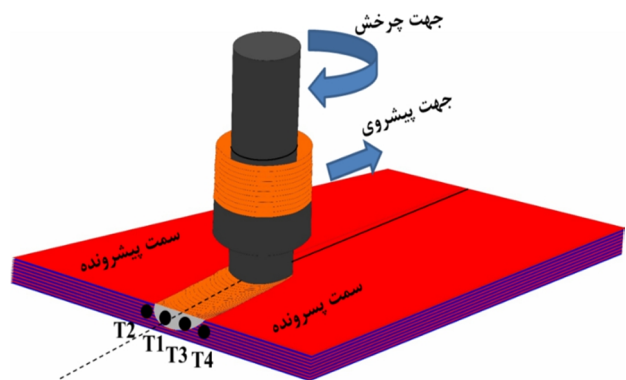
شکل 4- نمودار ریزسختی کامپوزیت نوردتجمعی جوشکاری اصطکاکی شده.

مقادیر چگالی نابجایی در ناحیه جوش حدود  $4/6 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$  بود درحالی‌که در کامپوزیت نوردتجمعی شده تقریباً سه برابر این مقدار بود ( $12/2 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ ). پس بنابراین با افزایش تغییر شکل و حرارت حاصل از پین و شانه ابزار، مقادیر زیادی از نابجایی تبدیل به مرز فرعی و در نهایت مرز اصلی شده و از اینرو از چگالی نابجایی‌ها می‌کاهد. این کاهش چگالی منجر به کاهش سختی خواهد شد. سختی ویکرز معمولاً با کاهش اندازه دانه افزایش می‌یابد که مطابق با رابطه هال-پچ است [22 و 23]. در این نوع ساختار فوق‌ریزدانه اگرچه دارای استحکام خیلی بالایی می‌باشند ولی به محض عملیات حرارتی در اثر

توزیع دمایی در نواحی مختلف اتصال را نشان می‌دهد. توزیع دما در جوشکاری را می‌توان به صورت تجربی بدست آورد. همچنین می‌توان از مدل ریاضی استفاده کرده و به کمک شبیه‌سازی مقادیر دما را در جوش بدست آورد. معمولاً توزیع دمایی را می‌توان توسط ترموکوپل‌هایی که در اطراف خط جوش نصب می‌شوند بدست آورد. بنابراین به طور دقیق دما و حرارت ورودی به جوش قابل اندازه‌گیری است. از اینرو می‌توان با تعیین دما در نواحی مختلف، پارامترهای جوشکاری را طوری تعیین کرد که ریزدانه‌گی ساختار اتصال باقی بماند [17 و 18].



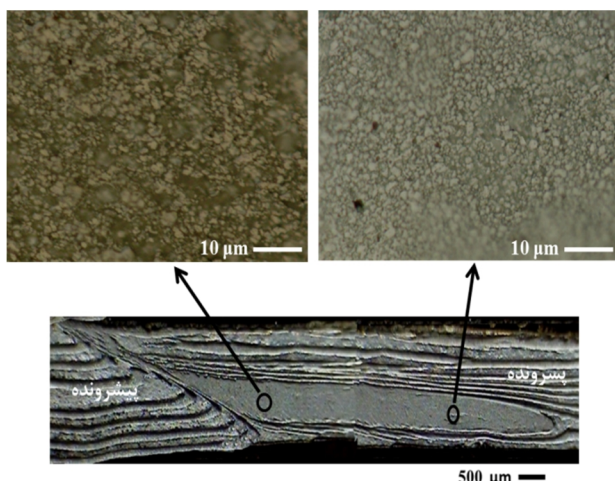
شکل 2- مورفولوژی سطحی جوشکاری اصطکاکی.



شکل 3- شماتیک فرایند FSW و نحوه جایگذاری ترموکوپل‌ها در نواحی جوش.

از ترموکوپل‌های نوع k برای بررسی روند تغییرات دما در اتصال استفاده شد. ترموکوپل 1 و 2 به ترتیب دماهای  $240^\circ\text{C}$  و  $221^\circ\text{C}$  را نشان دادند و ترموکوپل‌های 3 و 4 به ترتیب دماهای  $232^\circ\text{C}$  و  $215^\circ\text{C}$  را نشان دادند. به طور کلی وابسته به پارامترهای جوشکاری، دما در ناحیه پیشرونده بالاتر از ناحیه پسرونده است. هنگامی‌که پین در حال چرخش به محل ترموکوپل‌ها نزدیک می‌شود، تغییرات دما سریع است. با اینحال هنگامی‌که ابزار از محل دور می‌شود، سرعت سرد شدن کمتر است [19 و 20].

ناحیه پیشرونده خیلی بیشتر از پسرونده است [31].



شکل 5- ریزساختار میکروسکوپ نوری ناحیه جوش.

شکل (6) تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از کامپوزیت فوق‌ریزدانه نورد تجمعی شده و نواحی مختلف اتصال جوش اصطکاکی را نشان می‌دهد. شکل 6- الف ریزساختار کامپوزیت نورد تجمعی شده غیرهمجنس با دانه‌های کشیده با میانگین اندازه دانه 500 nm را نشان می‌دهد که در اثر تغییر شکل زیاد، چگالی بالای نابعایی‌ها در مرزها و درون بعضی دانه‌ها مشخص هستند که این توزیع غیرهمگن نابعایی در فرایند نورد تجمعی رخ می‌دهد [32 و 33]. رسوبات بسیار ریز نیز در ساختار وجود دارند (با پیکان مشخص شده اند). این رسوبات شامل  $Al_{20}Cu_2Mn_3$  هستند که در اثر عملیات حرارتی پیشگرم و سیکل‌های حرارتی در طی جوشکاری تشکیل می‌شوند. مکانیزم استحکام‌دهی این کامپوزیت غیرهمجنس AA2024/AA5083 فوق‌ریزدانه شامل استحکام‌دهی مرزدانه توسط دانه‌های فوق‌ریز، استحکام‌دهی نابعایی‌ها، استحکام‌دهی رسوبات و استحکام‌دهی محلول جامد می‌باشد.

شکل (6-ب) ریزساختار ناحیه اختلاط کامپوزیت لایه‌ای جوشکاری شده را نشان می‌دهد. در ریزساختار ناحیه اختلاط آلیاژهای آلومینیم که تحت عملیات جوشکاری اصطکاکی قرار گرفته‌اند، تبلور مجدد دینامیکی پیوسته رخ داده است. جوشکاری اصطکاکی منجر به تشکیل دانه‌های بزرگتر در ناحیه اختلاط می‌شود که هم‌محور نیز هستند. اندازه دانه در ناحیه

جوشکاری ناپایدار هستند. رسوب ناحیه جوش دارای ترکیب T-phase ( $Al_{20}Cu_2Mn_3$ ) می‌باشد که در آلیاژهای آلومینیم مشابه در اثر سیکل عملیات حرارتی تشکیل می‌شود [24 و 25]. درشت شدن یا فرایبری رسوبات باعث عدم استحکام‌دهی مواد شده و منجر به کاهش سختی در ناحیه جوش می‌شود که این کاهش سختی در سایر آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر نیز گزارش شده است [26 و 27]. دلایل این کاهش سختی ریزساختار تبلور مجدد یافته در ناحیه اختلاط، حذف نابعایی‌ها و توزیع رسوبات معرفی می‌شود. در ناحیه ترمومکانیکی، حرارت ورودی زیادی متحمل شده و اندازه دانه در این ناحیه درشت‌تر از ناحیه اختلاط است. در ناحیه متأثر از حرارت کمترین سختی را نشان می‌دهد و سختی با فاصله گرفتن از این ناحیه افزایش می‌یابد. تغییرات سختی در آلیاژهای آلومینیم رسوب سخت شونده تا حدودی به اندازه دانه‌ها و بیشتر وابسته به اندازه رسوب و چگونگی توزیع آن‌ها می‌باشد [15 و 28].

### 3-4- ریزساختار

تصویر ماکروگرافی و ریزساختار نوری اتصال جوشکاری اصطکاکی شده در شکل (5) نشان داده شده است. در تصویر ماکرو، جوش سالم و بدون عیب با تمایل جریان مذاب از سمت پسرونده به سمت ناحیه پیشرونده مشاهده شد. در ناحیه اختلاط منطقه کاملاً تغییر فرم پلاستیک یافته و تبلور مجدد دینامیکی پیوسته در شکل (5) نشان داده شده است. دانه‌های ریز جدید در اثر حرارت موضعی این ناحیه و تغییر شکل زیاد ایجاد شدند. در اینجا به دلیل کرنش و دمای بالا دانه‌های کشیده شده اولیه ساختار کامپوزیت شکسته می‌شوند. همچنین نابعایی‌های جدید ایجاد شده در اثر تغییر فرم پلاستیک و نابعایی‌های موجود در اثر تبلور مجدد دینامیکی پیوسته، منجر به تشکیل دانه‌های هم‌محور جدید و ریزتری در این ناحیه می‌شوند [29 و 30].

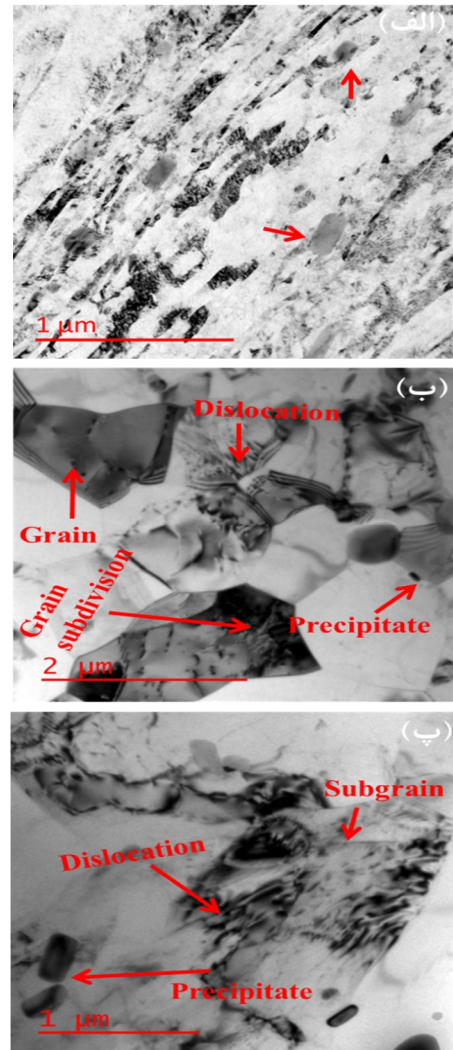
در سمت پیشرونده، سرعت دورانی و سرعت خطی هم جهت هستند ولی در سمت پسرونده، سرعت دورانی و سرعت خطی عکس یکدیگر هستند بنابراین تغییر شکل پلاستیک در

می‌گیرند. از آنجایی که جوش به صورت لب به لب و متقارن است در هر دو سمت پیشرونده و پسرونده، ناحیه متأثر از حرارت و ترمومکانیکی وجود دارد و توزیع رسوبات و اندازه و شکل دانه‌ها در این مناطق با یکدیگر متفاوت هستند [35 و 36]. شکل 6- پ ناحیه متأثر از حرارت در ناحیه جوش را نشان می‌دهند. در ناحیه ترمومکانیکی مجاور ناحیه متأثر از حرارت که تحت حرارت ناشی از پین و تغییر شکل پلاستیک است، ساختار به طور جزئی تبلور مجدد یافته مشاهده می‌شود. ناحیه ترمومکانیکی در اثر سرعت گردش ابزار، تحت گرمای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک قرار دارد. دانه‌های فوق‌ریزدانه در مواد نورد شده شامل نابعی‌ها و مرزهای فرعی با زاویه زیاد هستند [37 و 38]. نابعی‌های تولید شده توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی در طی سیکل سرد شدن بازیابی می‌شوند در نتیجه چگالی نابعی‌ها کاهش می‌یابد. همچنین بعضی رسوبات در ناحیه اختلاط نیز حل می‌شوند. رسوبات فرایر شده باعث کاهش اثر استحکام‌دهی کامپوزیت می‌شوند. ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت به طور جزئی در طی جوشکاری اصطکاکی پیر شده و دانه‌ها در این ناحیه رشد یافتند. به دلیل حرارت بیشتر در ناحیه پیشرونده، حذف نابعی‌ها و تشکیل مرزدانه‌های فرعی در این ناحیه بیشتر و همچنین چگالی نابعی‌ها کمتر از ناحیه پسرونده است. بنابراین ترکیبی از نابعی‌ها و مرزهای فرعی در ناحیه متأثر از حرارت مشاهده می‌شود.

### 3-5- خواص مکانیکی

مقادیر استحکام نهایی کششی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت نوردتجمعی و جوشکاری شده در شکل (7) نشان داده شده است. نمونه جوشکاری دارای استحکام کمتر و انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به کامپوزیت فوق‌ریزدانه است. استحکام کششی از 667 MPa در ورق کامپوزیت نوردتجمعی به 403 MPa در ورق جوشکاری اصطکاکی شده کاهش یافت. همچنین انعطاف‌پذیری از 6/9% در کامپوزیت نوردتجمعی شده به حدود 14% در نمونه جوشکاری اصطکاکی شده افزایش یافت.

اختلاط حدود 900 nm بود. ناحیه اختلاط جوش دارای چگالی کم نابعی‌ها نسبت به نمونه‌های نوردتجمعی شده یا کامپوزیت هستند. همچنین مرزدانه‌های اصلی سالم و تعدادی رسوبات به طور همگن توزیع شده‌اند.



شکل 6- تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری الف- کامپوزیت نوردتجمعی شده، ب- ناحیه اختلاط و پ- ناحیه متأثر از حرارت کامپوزیت جوشکاری اصطکاکی شده.

در ناحیه اختلاط علاوه بر تغییر شکل پلاستیک شدید چون دما بالاست رشد دانه رخ می‌دهد بنابراین نسبت به کامپوزیت نوردتجمعی شده، دانه‌ها درشت‌تر می‌شوند [34 و 14]. دمای جوشکاری در ناحیه جوش حدوداً تا 250 °C بالا می‌رود از اینرو رسوبات دچار فرایری می‌شوند و رسوبات حل نشده تحت دمای بالا و در زمان کوتاه در معرض رشد بیشتر قرار

در نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی شده کاهش استحکام کششی و سختی مطابق با رابطه هال-پچ است که به طور معکوس با ریشه دوم اندازه دانه در ناحیه جوشکاری رابطه مستقیم دارد [41]. به طور کلی استحکام کششی و استحکام تسلیم اتصال کاهش یافته و تغییر طول با شکست در ناحیه جوش افزایش یافته است. از آنجایی که استحکام کامپوزیت فوق ریزدانه حدود 667 MPa بود بنابراین استحکام جوش حدود 60% استحکام آلیاژ فوق ریزدانه بود و کمی کاهش داشت.

#### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق ورق‌های نوردتجمعی از آلیاژهای AA2024 و AA5083 توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی به همدیگر متصل شدند که نتایج به شرح زیر است:

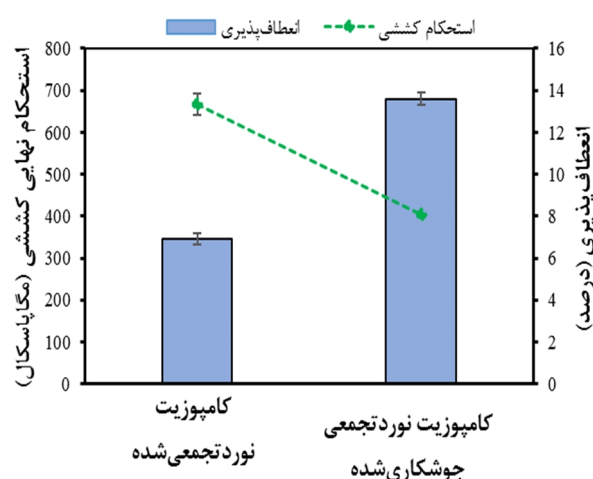
- به کمک فرایند تغییر شکل نوردتجمعی، کامپوزیت لایه‌ای فوق ریزدانه غیرهمجنس AA5083/AA2024 با اندازه دانه 500 nm و سختی و استحکام بالا ساخته شد.

- افزایش استحکام جوش ناشی از مکانیزم‌هایی شامل مرز دانه‌های هم‌محور ریز، استحکام‌دهی رسوبات ریز و استحکام‌دهی نابجایی‌ها و محلول جامد بوده که در اثر اختلاط مناسب ناشی از پین ابزار و تشکیل دانه‌های ریز جدید و همچنین کاهش حرارت ورودی در سرعت دورانی پایین و سرعت خطی بالا است.

- در بررسی‌های ریزساختاری نواحی فلزپایه، متأثر از حرارت، ترمومکانیکی و ناحیه اختلاط مشخص شدند. ساختار تبلور مجددیافته از دانه‌های ریز در ناحیه اختلاط به وضوح مشخص هستند. به دلیل دمای بالای 250 °C ساختارهای نابجایی و اندازه دانه حدود 900 nm مشاهده شد. بنابراین ساختار فوق ریزدانه تا حدودی با این روش جوشکاری باقی می‌ماند. همچنین رسوب با ترکیب  $Al_{20}Cu_2Mn_3$  در داخل دانه و مرز دانه‌ها به طور یکنواخت توزیع شدند.

- در اثر حرارت ناشی از پین اصطکاکی و ایجاد دانه‌های درشت در ناحیه جوش، ناحیه جوشکاری شده سختی پایینی را نسبت به کامپوزیت فوق ریزدانه نشان داد. همچنین در اثر رشد

اندازه دانه در ناحیه جوش بزرگتر از فلزپایه نوردتجمعی شده است و در ناحیه متأثر از حرارت که دچار درشت دانگی و نرم‌شدگی است شکست رخ می‌دهد. اندازه دانه در ناحیه اختلاط جوش ورق فوق ریزدانه، بزرگتر از فلزپایه فوق ریزدانه است [13 و 16]. همچنین به دلیل تولید حرارت در ناحیه جوش اصطکاکی، چگالی نابجایی‌ها کاهش یافته و همچنین رسوب‌های ساختاری دچار پیری می‌شوند؛ چنین روندی معمولاً در نمودارهای سختی اتصالات جوشکاری اصطکاکی اختلاطی مشاهده می‌شود. انعطاف‌پذیری با افزایش اندازه دانه و مقادیر مرزهای فرعی افزایش می‌یابد. مطابق مشاهدات ساختاری در شکل (6)، کامپوزیت‌های نوردتجمعی شده شامل مقادیر زیاد چگالی نابجایی و دانه‌های فوق ریز هستند که استحکام بالاتری را نشان می‌دهند. از طرفی به دلیل وجود دانه‌های خیلی ریز دارای سطح مناسبی از انعطاف‌پذیری نیز هستند. با اینحال جوشکاری و اندازه دانه بیشتر، استحکام را کاهش داده و انعطاف‌پذیری را افزایش می‌دهد. کامپوزیت جوشکاری شده مقادیر زیادی کارسختی را نشان می‌دهند که گواه بر پیشرفت گلوبی با افزایش تنش در هنگام افزایش تغییر شکل است. می‌توان گفت که ناحیه اختلاط در طی جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار دارد و ترکیبی از استحکام و انعطاف‌پذیری مناسب بدست می‌آید [39 و 40].



شکل 7- استحکام کششی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت نوردتجمعی و جوشکاری اصطکاکی شده.

Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. (1):39-49.

12-Niu PL, Li WY, Chen DL. 2018. Strain hardening behavior and mechanisms of friction stir welded dissimilar joints of aluminum alloys. *Materials Letters*. 231:68-71.

13-Sato YS, Kurihara Y, Park SHC, Kokawa H, Tsuji N. 2004. Friction stir welding of ultrafine grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding. *Scripta Materialia*. 50(1):57-60.

14-Sun Y, Fujii H, Takada Y, Tsuji N, Nakata K, Nogi K. 2009. Effect of initial grain size on the joint properties of friction stir welded aluminum. *Materials Science and Engineering A*. 527(1-2):317-21.

15-Topic I, Höppel HW, Göken M. 2009. Friction stir welding of accumulative roll-bonded commercial-purity aluminium AA1050 and aluminium alloy AA6016. *Materials Science and Engineering A*. 503(1-2):163-6.

16-Yousefieh M, Tamizifar M, Boutorabi SMA, Borhani E. 2018. An investigation on the microstructure, texture and mechanical properties of an optimized friction stir-welded ultrafine-grained Al-0.2 wt% Sc alloy deformed by accumulative roll bonding. *Journal of Materials Science*. 53(6):4623-34.

17-Verma S, Meenu, Misra JP. 2017. Study on temperature distribution during Friction Stir Welding of 6082 aluminum alloy. *Materials Today: Proceedings*. 4(2):1350-6.

18-Mehdi H. 2020. Influence of Friction Stir Processing on Weld Temperature Distribution and Mechanical Properties of TIG-Welded Joint of AA6061 and AA7075. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 7:1773-1788.

19-Mehdi H, Mishra RS. 2020. Investigation of mechanical properties and heat transfer of welded joint of AA6061 and AA7075 using TIG + FSP welding approach. *Journal of Advanced Joining Processes*. 1:100003.

20-Mehdi H. 2020. Effect of friction stir processing on mechanical properties and heat transfer of TIG welded joint of AA6061 and AA7075. *Defence Technology*. 17:715-727.

21-Murr LE, Liu G, McClure JC. 1997. Dynamic recrystallization in friction-stir welding of aluminium alloy 1100. *Journal of Materials Science Letters*. 6:1801-3.

22-Fujii H, Cui L, Tsuji N, Ueji R, Nakata K, Nogi K. 2005. Mechanical properties of friction stir welds of ultrafine grained steel and other materials. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2005:22-6.

23-Meyers MA, Mishra A, Benson DJ. 2006. Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*. 51(4):427-556.

24-Malekjani S, Hodgson PD, Cizek P, Sabirov I, Hilditch TB. 2011. Cyclic deformation response of UFG 2024 Al alloy. *International Journal of Fatigue*. 33(5):700-9.

رسوبات، درشت شدن دانه‌های اصلی و کاهش نابجایی‌های درون دانه‌ای، کمترین سختی در ناحیه متأثر از حرارت بود.

وجود دانه‌های ریز جدید و همچنین مقادیر رسوبات ریزنانومتری در ناحیه اختلاط، باعث افزایش انعطاف‌پذیری در اتصال جوشکاری شده شد. پین ابزار، باعث توزیع همگن رسوبات می‌شود. به طوری که کامپوزیت جوشکاری شده ترکیبی از استحکام و انعطاف‌پذیری مناسب را نشان داد.

#### منابع

1-Azushima A, Kopp R, Korhonen A, Yang DY, Micari F, Lahoti GD. 2008. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 57(2):716-35.

2-Lee SH, Saito Y, Sakai T, Utsunomiya H. 2002. Microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy processed by accumulative roll-bonding. *Materials Science and Engineering A*. 325(1-2):228-35.

3-Tsuji N, Saito Y, Utsunomiya H, Tanigawa S. 1999. Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process. *Scripta Materialia*. 40(7):795-800.

4-Reihanian M, Bagherpour E, Ebrahimi R, Tsuji N. 2018. Ten Years of Severe Plastic Deformation (SPD) in Iran, Part II: Accumulative Roll Bonding (ARB). *Iranian Journal of Materials Forming*. 5:1-25.

5-Mahoney MW, Rhodes CG, Flintoff JG, Spurling RA, Bingel WH. 1998. Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 29(7):1955-64.

6-Debbarma S, Sarkar A, Saha SC. 2012. a Comparative Study on the Hardness Behaviour of Friction Stir Welding AA6063 alloy. *Advanced Technologies and Materials*. 37(2):153-160.

7-Tsuji N, Ito Y, Saito Y, Minamino Y. 2002. Strength and ductility of ultrafine grained aluminum and iron produced by ARB and annealing. *Scripta Materialia*. 47(12):893-9.

8-Colegrove PA and HRS. 2007. Process Modelling, Chapter 10 in *Friction Stir Welding and Processing*. Friction Stir Welding and Processing American Society for Metals International. 187-217.

9-Sutton MA, Yang B, Reynolds AP, Taylor R. 2002. Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum. *Materials Science and Engineering A*. 323(1-2):160-6.

10-Cheng YHZ, Zhu YTT, E. Ma, Cheng S, Zhao YH, Zhu YTT, et al. 2007. Optimizing the strength and ductility of fine structured 2024 Al alloy by nano-precipitation. *Acta Materialia*. 55(17):5822-5832.

11-Paik J kee. 2009. Mechanical prooperties of friction stir welded aluminum alloys 5083. *International*

- 34-Topic I, Höppel HW, Göken M. 2008. Deformation behaviour of accumulative roll bonded and friction stir welded aluminium alloys. *Materials Science Forum*. 584-586:833-9.
- 35-Moradi MM, Jamshidi Aval H, Jamaati R, Amirkhanlou S, Ji S. 2018. Microstructure and texture evolution of friction stir welded dissimilar aluminum alloys: AA2024 and AA6061. *Journal of Manufacturing Processes*. 32:1-10.
- 36-Zhang C, Huang G, Cao Y, Zhu Y, Huang X, Zhou Y, et al. 2020. Microstructure evolution of thermo-mechanically affected zone in dissimilar AA2024/7075 joint produced by friction stir welding. *Vacuum*. 179:109515.
- 37-Toroghinejad MR, Jamaati R, Dutkiewicz J, Szpunar JA. 2013. Investigation of nanostructured aluminum/copper composite produced by accumulative roll bonding and folding process. *Materials and Design*. 51:274-9.
- 38-Mofrad MS, Borhani E, Yousefieh M, Aminian H. 2022. Surface morphology and Rietveld refinement characterisation of aluminium/titania nanocomposite produced by atmospheric plasma spraying and accumulative roll bonding. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 62:204-220.
- 39-Wang W, Qiao K, Wu JL, Li TQ, Cai J, Wang KS. 2017. Fatigue properties of friction stir welded joint of ultrafine-grained 2024 aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*. 22(2):110-9.
- 40-Hosseini M, Danesh Manesh H. 2010. Immersed friction stir welding of ultrafine grained accumulative roll-bonded Al alloy. *Materials and Design*. 31(10):4786-91.
- 41-Yousefieh M, Tamizifar M, Boutorabi SMA, Borhani E. 2016. Taguchi Optimization on the Initial Thickness and Pre-aging of Nano-/Ultrafine-Grained Al-0.2 wt.%Sc Alloy Produced by ARB. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 25(10):4239-48.
- 25-Zheng R, Bhattacharjee T, Shibata A, Tsuji N, Ma C. 2016. Effect of Accumulative Roll Bonding (ARB) and Subsequent Aging on Microstructure and Mechanical Properties of 2024 Al Alloy. *Materials Transactions*. 57(9):1462-70.
- 26-Zhang C, Huang G, Cao Y, Zhu Y, Liu Q. 2019. On the microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar AA7075 and AA2024 friction stir welding joints: Effect of rotational speed. *Journal of Manufacturing Processes*. 37:470-87.
- 27-Amancio-Filho ST, Sheikhi S, dos Santos JF, Bolfarini C. 2008. Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4. *Journal of Materials Processing Technology*. 206(1-3):132-42.
- 28-Genevois C, Deschamps A, Denquin A, Doisneau-Cottignies B. 2005. Quantitative investigation of precipitation and mechanical behaviour for AA2024 friction stir welds. *Acta Materialia*. 53(8):2447-58.
- 29-Ma ZY, Feng AH, Chen DL, Shen J. 2018. Recent Advances in Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 43(4):269-333.
- 30-Kwon YJ, Shigematsu I, Saito N. 2003. Production of ultra-fine grained aluminum alloy using friction stir process. *Materials Transactions*. 44(7):1343-50.
- 31-R.S.Mishra MK. Friction stir welding of high-strength 7xxx aluminum alloys. Butterworth-Heinemann. 2016.
- 32-Sajjadi Nikoo S, Qods F, Yousefieh M. 2023. Microstructure evolution and mechanical properties of the AA2024/AA5083 ultra-fine grained composite fabricated via accumulative roll bonding (ARB) method. *Journal of Materials Research*. 38:2519-2533.
- 33-Wang YM, Ma E. 2004. Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal. *Acta Materialia*. 52(6):1699-709.