E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 11, Number 1, 2025



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 ; M. Yousefieh, m.yousefieh@semnan.ac.ir;

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.19]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال یازدهم، شماره1، بهار و تابستان 1404



ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اختلاطی ورق‌های کامپوزیت نورد تجمعی‌شده 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 تبلورمجددیافته ریز در ناحیه جوشکاری‌شده 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 اصطکاکی‌شده باعث انعطاف‌پذیری بالا در حدود 14% نسبت به ورق‌های کامپوزیت ساخته‌شده (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، تبلورمجدد دینامیکی پیوسته.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: فتح اله قدس، qods@semnan.ac.ir؛ محمد یوسفیه، m.yousefieh@semnan.ac.ir.

1- مقدمه

فرایند اتصال نورد تجمعی به عنوان یکی از فرایندهای تغییرشکل پلاستیک، روشی مناسب برای تولید ورق‌های آلومینیمی و فولادی فوق‌ریزدانه (زیر 1 میکرون) معرفی گردید. که استحکام و شکل پذیری مناسبی در مقایسه با ورق‌های معمولی می‌دهد و سبب شده در ساخت تجهیزات سبک صنایع اتومبیل سازی و صنایع پیشرفته مورد استقبال قرار گیرد [1-3]. به دلیل محدویت‌های تولید ورق‌های نانوساختار به روش نوردتجمعی و از آنجا که ساخت ورق‌های بزرگ را برای استفاده در صنایع اتومبیل سازی و هوافضا مشکل کرده است، نحوه اتصال این ورق‌های فوق ریزدانه 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 تجمعی‌شده به دلیل حرارت ورودی کم، مانع رشد دانه‌های

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.19]

فوق‌ریز شده و از طرفی خود نیز دانه‌های تبلورمجدد یافته ریز در ناحیه اتصال ایجاد می‌کند و خواص دانه‌های نانوساختار باقی می‌ماند؛ از اینرو بهترین روش جوشکاری برای این ورق‌ها محسوب می‌شود [7و6]. در این فرایند ابزاری درحال 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[8،6،5]. آلیاژ آلومینیم 2024 به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و شکل‌پذیری خوب به طور وسیعی در صنایع هواپیمایی کاربرد پیدا کرده است [9و10]. آلیاژ آلومینیم 5083 به دلیل ویژگی‌های زیادی مانند قیمت کم، استحکام نسبتاً خوب، جوش‌پذیری خوب، تغییرشکل پذیری زیاد و مقاومت به خوردگی عالی باعث کاربرد آن در اتصالات اجزاء هواپیما شده است [11و12]. ساتو و همکاران [13]، از آلیاژ آلومینیم AA1100 تحت 6 سیکل فرایند نوردتجمعی، 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. تاپیک و همکاران [15]، دو آلیاژ آلومینیمی AA1050 و AA6016 را به صورت جداگانه تحت 8 سیکل فرایند نوردتجمعی 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 تجمعی‌شده باعث ایجاد دانه‌های تبلورمجددیافته 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 تبلورمجددیافته و تشکیل دانه‌های بزرگتر در ناحیه اختلاط بود. یوسفیه و همکاران [16]، بر روی ورق‌های آلیاژ Al–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 تجمعی‌شده دارد. تبلورمجدد 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. تغییرفرم 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 نوردتجمعی‌شده انجام گرفته شده است به صورت همجنس بوده و بررسی بر روی جوشکاری اصطکاکی ورق‌های نوردتجمعی‌شده 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 قرارگرفتند. 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 موردنظر است مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.19]

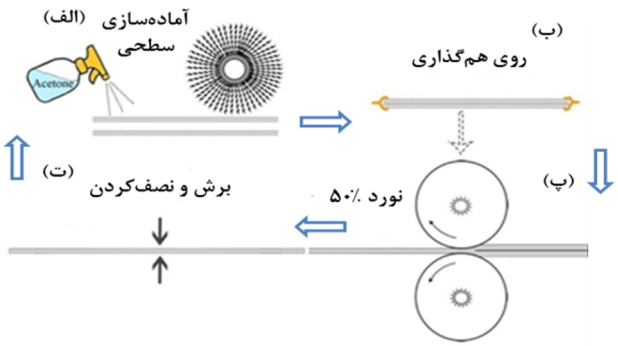
2-مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ورق‌های AA2024 و AA5083 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 مورداستفاده 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 30×120 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 می باشد. 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 سنباده‌زنی قرارگرفتند. نمونه جوش‌ها پولیش شده و سپس با اچانت رنگی با ترکیب (190 mL water, 5 mL nitric acid, 2 mL hydrofluoric acid and 3 mL hydrochloric acid) حکاکی شدند. 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 HNO3 -700 ml CH_3OH 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 E8، ASTM تهیه شدند. از دستگاه SANTAM, STM-400 در سرعت ثابت برای انجام آزمایش کشش استفاده شد.



شکل1- 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 تقعر نسبت به فلزپایه است چرا که مقداری تقعر 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

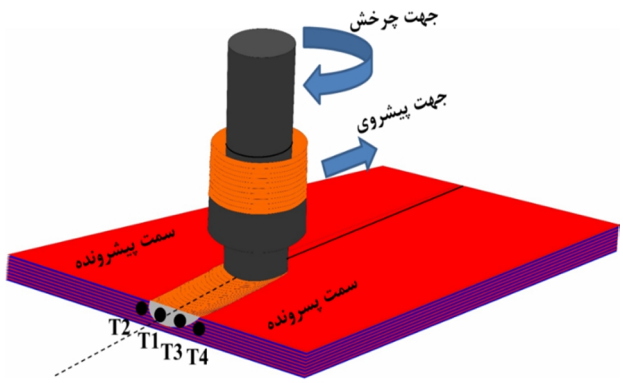
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.19]

توزیع دمایی در نواحی مختلف اتصال را نشان می دهد. 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. ازاینرو می‌توان با تعیین دما در نواحی مختلف، پارامترهای جوشکاری را طوری تعیین کرد که ریزدانگی ساختار اتصال باقی بماند [17و18].



شکل 2- مورفولوژی سطحی جوشکاری اصطکاکی.

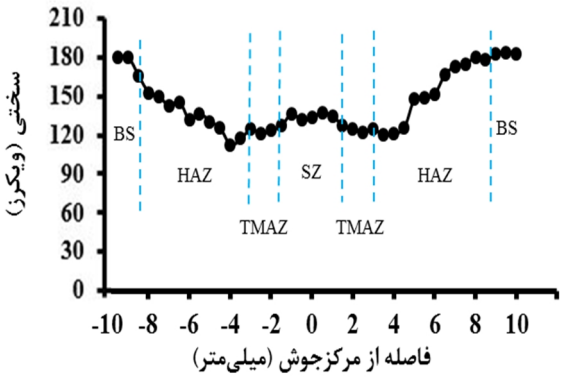


شکل 3- شماتیک فرایند FSW و نحوه جایگذاری ترموکوپل‌ها در نواحی جوش.

از ترموکوپل‌های نوع k برای بررسی روند تغییرات دما در اتصال استفاده شد. ترموکوپل 1 و 2 به ترتیب دماهای 240 °C و 221 °C را نشان دادند و ترموکوپل‌های 3 و 4 به ترتیب دماهای 232 °C و 215 °C را نشان دادند. به طور کلی وابسته به پارامترهای جوشکاری، دما در ناحیه پیشرونده بالاتر از ناحیه پسرونده است. هنگامی‌که پین درحال چرخش به محل ترموکوپل‌ها نزدیک می‌شود، تغییرات دما سریع است. با اینحال هنگامی‌که ابزار از محل دور می‌شود، سرعت سردشدن کمتر است [19و20].

3-3-تغییرات سختی

نمودار ریزسختی نواحی جوش نمونه فوق‌ریزدانه جوشکاری‌شده در شکل(4) نشان داده شده است. چهار ناحیه فلزپایه، متأثر ازحرارت، ترومکانیکی و ناحیه اختلاط ایجادشده دراثر حرکت مکانیکی پین و بالارفتن دما مشخص می‌شود [21]. فلزپایه فوق ریزدانه 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 می دهد. 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 پیداکرده و به سمت فلز پایه سختی افزایش پیدا می‌کند.



شکل 4- نمودار ریزسختی کامپوزیت نوردتجمعی جوشکاری اصطکاکی‌شده.

مقادیر چگالی نابجایی در ناحیه جوش حدود $4/6 \times 10^{15}\ m^{-2}$ بود درحالی‌که در کامپوزیت نوردتجمعی‌شده تقریباً سه برابر این مقدار بود ($12/2\times10^{15}\ m^{-2}$). پس بنابراین با افزایش تغیرشکل 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 [22و23]. در این نوع ساختار فوق‌ریزدانه اگرچه دارای استحکام خیلی بالایی می‌باشند ولی به محض عملیات حرارتی در اثر

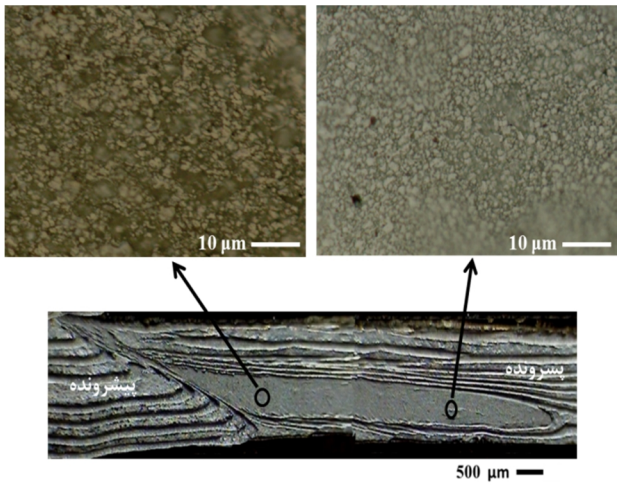
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.19]

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 [25و24]. درشت شدن یا فراپیری 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 [27و26]. دلایل این کاهش سختی ریزساختار تبلورمجددیافته در ناحیه اختلاط، حذف نابجایی‌ها 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 [28و15].

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 تغییرفرم پلاستیک یافته و تبلورمجدد دینامیکی پیوسته در شکل(5) نشان داده شده است. دانه‌های ریز جدید در اثر حرارت موضعی این ناحیه و تغییرشکل زیاد ایجاد شدند. در اینجا به دلیل کرنش و دمای بالا دانه‌های کشیده شده اولیه ساختار کامپوزیت شکسته می‌شوند. همچنین نابجایی‌های جدید ایجادشده در اثر تغییرفرم پلاستیک و نابجایی‌های موجود در اثر تبلورمجدد دینامیکی پیوسته، منجر به تشکیل دانه‌های هم‌محور جدید و ریزتری در این ناحیه می‌شوند [30و29].

در سمت پیشرونده، سرعت دورانی و سرعت خطی هم جهت هستند ولی در سمت پسرونده، سرعت دورانی و سرعت خطی عکس یکدیگر هستند بنابراین تغییرشکل پلاستیک در ناحیه پیشرونده خیلی بیشتر از پسرونده است[31].



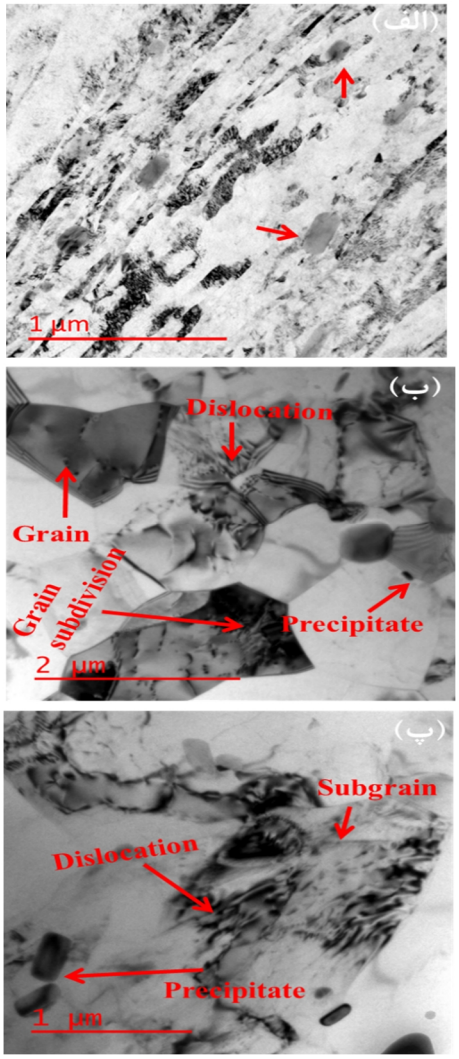
شکل 5- ریزساختار میکروسکوپ نوری ناحیه جوش.

شکل(6) تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از کامپوزیت فوق‌ریزدانه نورد تجمعی‌شده و نواحی مختلف اتصال جوش اصطکاکی را نشان می‌دهد. شکل 6- الف ریزساختار کامپوزیت نورد تجمعی‌شده غیرهمجنس با دانه‌های کشیده با میانگین اندازه دانه 500 nm را نشان می‌دهد که در اثر تغییرشکل زیاد، چگالی بالای نابجایی‌ها در مرزها و درون بعضی دانه‌ها مشخص هستند که این توزیع غیرهمگن نابجایی در فرایند نوردتجمعی رخ می‌دهد [33و32]. 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 نابجایی‌ها، استحکام‌دهی رسوبات و استحکام‌دهی محلول جامد می‌باشد.

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.19]

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



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

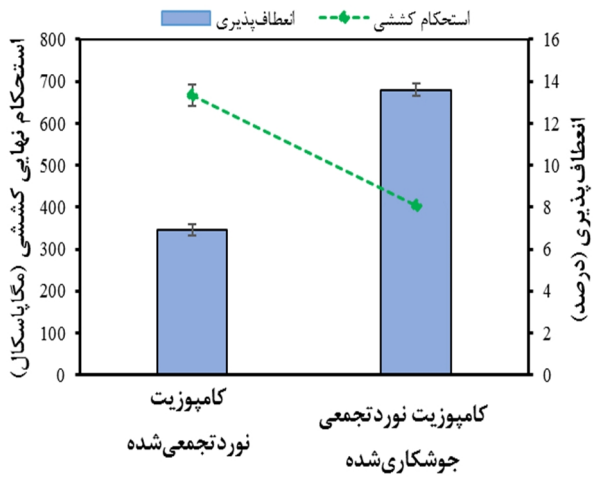
در ناحیه اختلاط علاوه بر تغییرشکل پلاستیک شدید چون دما بالاست رشد دانه رخ می‌دهد بنابراین نسبت به کامپوزیت نوردتجمعی‌شده، دانه‌ها درشت‌تر می‌شوند[34و14]. دمای جوشکاری در ناحیه جوش حدوداً تا 250 °C بالا می‌رود از اینرو رسوبات دچار فراپیری می‌شوند و رسوبات حل نشده تحت دمای بالا و در زمان کوتاه در معرض رشد بیشتر قرار می‌گیرند. از آنجایی‌که 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 [36و35]. 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 تغییرشکل پلاستیک است، ساختار به طور جزئی تبلورمجددیافته مشاهده می‌شود. ناحیه ترمومکانیکی در اثر سرعت گردش ابزار، تحت گرمای اصطکاکی و تغییرشکل پلاستیک قرار دارد. دانه‌های فوق‌ریزدانه در مواد نوردشده شامل نابجایی‌ها و مرزهای فرعی با زاویه زیاد هستند [38و37]. نابجایی‌های تولیدشده توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی در طی سیکل سردشدن بازیابی می‌شوند در نتیجه چگالی نابجایی‌ها کاهش می‌یابد. همچنین بعضی رسوبات در ناحیه اختلاط نیز حل می‌شوند. رسوبات فراپیرشده باعث کاهش اثر استحکام‌دهی کامپوزیت می‌شوند. ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت به طور جزئی در طی جوشکاری اصطکاکی پیرشده و دانه‌ها در این ناحیه رشد یافتند. به دلیل حرارت بیشتر در ناحیه پیشرونده، حذف نابجایی‌ها و تشکیل مرزدانه‌های فرعی در این ناحیه بیشتر و همچنین چگالی نابجایی‌ها کمتر از ناحیه پسرونده است. بنابراین ترکیبی از نابجایی‌ها و مرزهای فرعی در ناحیه متأثر از حرارت مشاهده می‌شود.

3-5-خواص مکانیکی

مقادیر استحکام نهایی کششی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت نوردتجمعی و جوشکاری‌شده 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 اصطکاکی‌شده کاهش یافت. همچنین انعطاف‌پذیری از 6/9% در کامپوزیت نوردتجمعی‌شده به حدود 14% در نمونه جوشکاری اصطکاکی شده افزایش یافت.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.19]

اندازه دانه در ناحیه جوش بزرگتر از فلزپایه نوردتجمعی‌شده است و در ناحیه متأثر از حرارت که دچار درشت دانگی و نرم‌شدگی است شکست رخ می‌دهد. اندازه دانه در ناحیه اختلاط جوش ورق فوق‌ریزدانه، بزرگتر از فلزپایه فوق‌ریزدانه است [16و13]. 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 نوردتجمعی‌شده شامل مقادیر زیاد چگالی نابجایی و دانه‌های فوق‌ریز 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 جوشکاری‌شده مقادیر زیادی کارسختی را نشان می‌دهند که گواه بر پیشرفت گلویی با افزایش تنش در هنگام افزایش تغییرشکل است. می‌توان گفت که ناحیه اختلاط در طی جوشکاری اصطکاکی اختلاطی، تحت تغییرشکل پلاستیک شدید قرار دارد و ترکیبی از استحکام و انعطاف‌پذیری مناسب بدست می‌آید[40و39].



شکل 7- استحکام کششی و انعطاف‌پذیری کامپوزیت نوردتجمعی و جوشکاری اصطکاکی‌شده.

در نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی‌شده 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 طورکلی استحکام کششی و استحکام تسلیم اتصال کاهش یافته و تغییرطول با شکست در ناحیه جوش افزایش یافته است. از آنجایی‌که استحکام کامپوزیت فوق ریزدانه حدود 667 MPa بود بنابراین استحکام جوش حدود 60% استحکام آلیاژ فوق‌ریزدانه 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 تغییرشکل نوردتجمعی، کامپوزیت لایه‌ای فوق‌ریزدانه 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 تبلورمجددیافته 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 فوق‌ریزدانه تا حدودی با این روش جوشکاری باقی می‌ماند. همچنین رسوب با ترکیب $Al_{20}Cu_2Mn_3$ در داخل دانه و مرزدانه‌ها به طور یکنواخت توزیع شدند.

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

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.19]

رسوبات، درشت‌شدن 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 جوشکاری‌شده شد. پین ابزار، باعث توزیع همگن رسوبات می‌شود. به طوری‌که کامپوزیت جوشکاری‌شده 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 weldeded aluminum alloys 5083. International 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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.19]

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.
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.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.19]