

بررسی تأثیر افزودن نانوصفحات WS2 بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ جوش داده شده به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی تعداد پاس و افزودن نانو صفحات WS2 به اتصالات جوش لب به لب اصطکاکی اغتشاشی (FSW) آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ بر ریزساختار و خواص استحکامی و سختی انجام شده است. در ابتدا از ترکیب دو عامل سرعت دورانی و سرعت پیشروی استفاده شده و نمونه بهینه در مورد عدم وجود عیوب سطحی و متالورژیکی و حداکثر مقدار مقاومت کششی نهایی انتخاب شده است. سپس FSW با افزودن و یا بدون افزودن نانو صفحات WS2 برای تعداد پاس مختلف انجام شد. مشاهدات ریزساختاری نشان داد که اندازه دانه در ناحیه همزده با افزایش تعداد پاس‌های جوش کاهش یافته و توزیع یکنواخت ذرات حاصل شده است. همچنین استفاده از جوش چهار پاس پیوسته با سرعت دورانی چرخشی ۷۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۴ میلی‌متر بر دقیقه، باعث افزایش ۵۲ MPa در استحکام کششی و ۳۵ Hv در مقدار سختی نسبت به نمونه بدون افزودن نانو صفحات می‌شود.

کلیدواژگان

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی؛ تعداد پاس جوش؛ خواص مکانیکی؛ ریزساختار

Investigating the effect of adding WS2 nanosheets on the microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy welded by friction stir welding (FSW) method

Abstract

This study aims to investigate the number of passes and the addition of WS2 nanoplates to friction stir welding (FSW) joints of aluminum alloy 5083 on the microstructure, strength and hardness properties. At first, the combination of the two factors of rotational speed and forward speed was used and the optimal state was selected in the absence of surface and metallurgical defects and the maximum value of the final tensile strength. Then FSW was performed with or without the addition of WS2 nanoplates for different pass numbers. Microstructural observations showed that the grain size in the stirred area decreased with the increase in the number of welding passes and a uniform distribution of particles was obtained. Also, the use of continuous four-pass welding with a rotational speed of 700 rpm and forward speed of 14 mm/min increases the tensile strength by 52 MPa and 35 Hv in the hardness value compared to the sample without the addition of nanoplates.

Keywords: Friction stir welding; Weld pass numbers; Mechanical properties; Microstructure

پارامترهای جوش ثابت و بدون افزودن نانوصفات جوش داده شده است. خواص مکانیکی و ریزساختاری مورد ارزیابی قرار گرفت. FSW بر آلیاژ آلومینیوم AA5083 انجام شد که یک آلیاژ Al-Mg-Mn تقویت شده با محلول جامد و سخت شده/تثبیت شده با کرنش است که به دلیل خواص ویژه آن به طور گسترده استفاده می‌شود و در سال‌های اخیر، همانطور که در بالا ذکر شد، مقالات متعددی در مورد آن منتشر شده است [۲۰-۱۷].

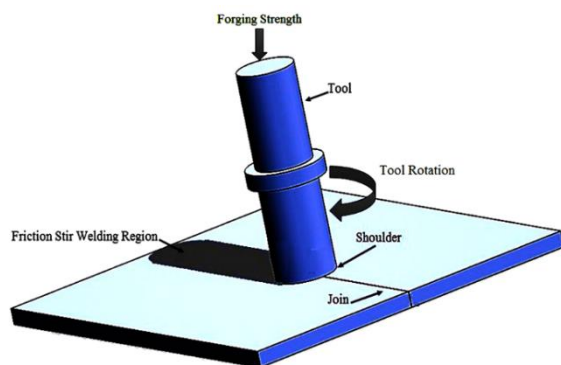


Figure 1- Schematic of the whole friction stir welding process.

شکل ۱- شماتیک کل فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

۲- روش تحقیق

در این مطالعه از صفحه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با ابعاد $5 \times 70 \times 160 \text{ mm}^3$ در شرایط آنیل شده استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ در جدول ۱ ارائه شده است. نانوصفات WS2 مورد استفاده در این تحقیق با خلوص ۹۹ درصد با اندازه متوسط ذرات ۷۰ نانومتر می‌باشد که تصویر این نانوصفات در شکل ۲ نشان داده شده است. برای اعمال پودر، شیاری به عمق ۰.۵ میلی‌متر و عرض ۱ میلی‌متر ایجاد شد. صفحات کنار هم قرار گرفتند و بدین ترتیب یک مربع کامل ایجاد شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ ۵۰۸۳ Al به عنوان ماده پایه

Table 1. Chemical composition of 5083 Al alloy as base material

Substance	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti
Wt.%	Bal	4.3	0.1	0.33	0.05	0.64	0.02	0.03

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، شکل پذیری خوب و مقاومت در برابر خوردگی بالا، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع هوافضا، کشتی سازی و راه آهن دارند. با افزایش کاربرد آلومینیوم در صنایع مختلف، اهمیت اتصال قطعات آلومینیومی افزایش یافته است. از سوی دیگر، استفاده از روش‌های جوشکاری حالت جامد برای جوشکاری آلیاژهای فلزی، به ویژه آلومینیوم، در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته است [۱]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌های جوشکاری حالت جامد است که عمدتاً برای جوشکاری آلیاژهای فلزی مانند آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم استفاده می‌شود و اکنون در جوشکاری پلیمرها نیز قابل استفاده است. این روش توسط تویی در سال ۱۹۹۱ ثبت شد [۲]. FSW با سایر روش‌های جوشکاری مبتنی بر ذوب مواد که یک فناوری اتصال حالت جامد است، متفاوت است. این روش مزایایی مانند دمای جوش پایین، تغییر شکل کمتر، عیوب جوش کمتر (به عنوان مثال تخلخل کمتر، ترک کمتر) و جوش‌هایی با قابلیت‌های مکانیکی بالا دارد [۳]. شکل ۱ شماتیک از روش FSW را نشان می‌دهد. برخی از صنایع مانند خودروسازی و هوانوردی توجه زیادی به این فرآیند داشته‌اند. به عنوان مثال، در صنعت خودرو، برای جایگزینی اجزای چدنی مانند پیستون، بلوک موتور، سرسیلندر، کالیپر ترمز و روتور استفاده شده است [۴]. اخیراً، چندین مطالعه امکان‌سنجی FSW کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم را بررسی کرده‌اند و مشخص شده است که FSW در تولید جوش‌های با کیفیت بدون نقص قابل مشاهده و توزیع همگن تقویت‌کننده‌ها و بهبود راندمان اتصالات موفق است [۱۱-۶]. برای تقویت بهتر ناحیه جوشکاری می‌توان از نانوذرات مختلف برای بهبود استحکام ناحیه جوش استفاده کرد. اگر آلیاژ تحت عملیات حرارتی پس از جوشکاری در دمای بالا قرار گیرد، وجود ذرات پراکنده رشد دانه را مهار کرده و حتی از رشد غیرعادی دانه جلوگیری می‌کند [۱۲]. سعیدی و همکاران [۱۳] اثرات نانوذرات آلومینا بر رفتار مکانیکی و خوردگی اتصالات آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۵۳ و ۷۰۷۵ را بررسی کرده‌اند. این نویسندگان گزارش کردند که خواص مکانیکی و خوردگی اتصالات جوش داده شده با افزودن ذرات تقویت‌کننده آلومینا بهبود یافته است. فنگ و همکاران [۱۴] قطعات کامپوزیتی Al2009/SiC را که توسط متالورژی پودر تولید می‌شوند با موفقیت جوش دادند و گزارش کردند که توزیع ذرات تقویت‌کننده و در نتیجه سختی و استحکام کششی با استفاده از FSW بهبود یافته است. چشینین و همکاران [۹] گزارش کردند که سختی کامپوزیت پایه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با ذرات تقویت‌کننده آلومینا با استفاده از FSW به دلیل پیری بیش از حد کاهش یافته است. لامبارد و همکاران [۱۵] پارامترهای فرآیند FSW را برای به حداقل رساندن عیوب و به حداکثر رساندن عمر خستگی در آلیاژ آلومینیوم H321-۵۰۸۳ بهینه کردند. یک رابطه نزدیک بین استحکام کششی و عملکرد خستگی وجود دارد و بنابراین اتصال باید عاری از بروز انواع خاصی از نقص باشد و دارای خواص مکانیکی قابل قبولی باشد. در مقاله دیگری، بیسادی و همکاران [۱۶] تأثیر سرعت‌های چرخشی و جوشکاری را بر ریزساختارها و خواص مکانیکی Al5083 جوش داده شده با اصطکاکی اغتشاش و اتصالات لبه ورق‌های مس خالص تجاری بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین مقدار تنش‌های کششی نهایی حدود ۷۸ درصد مس و همچنین حدود ۷۴ درصد از مواد اولیه ورق‌های آلومینیومی بود. بنابراین وجود ذرات تقویت‌کننده نه تنها از رشد دانه جلوگیری می‌کند، بلکه خواص مکانیکی و تریبولوژیکی را نیز افزایش می‌دهد، در این تحقیق ابتدا شرایط بهینه برای تولید جوش‌هایی با افزودن نانوصفات WS2 بررسی شده است. برای مقایسه، صفحه‌ای با

توسط کاغذ سنباده شماره ۲۰۰۰ متالوگرافی شدند و برای صاف شدن سطح نمونه پولیش شدند و سپس توسط محلولی که حاوی ۸۲ میلی لیتر H_2O ، ۱۵.۵ میلی لیتر HNO_3 و ۰.۵ میلی لیتر HF اچ شدند. برای مطالعه ریزساختار نمونه ها از میکروسکوپ نوری مدل Unione و میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) استفاده شد. علاوه بر این، اندازه گیری اندازه دانه با استفاده از آنالیز تصویر انجام شد. ریزسختی ویکرز نمونه ها با استفاده از تجهیزات Buehler با اعمال بار ۲۰۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه اندازه گیری شد. تست کشش در دمای محیط توسط یک ماشین کششی SANTAM 150 با نرخ کرنش $0.003s^{-1}$ انجام شد. ابعاد نمونه های آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8-04 بود و شکل ۴ اندازه و پیکربندی نمونه کششی جوشکاری شده را نشان می دهد.

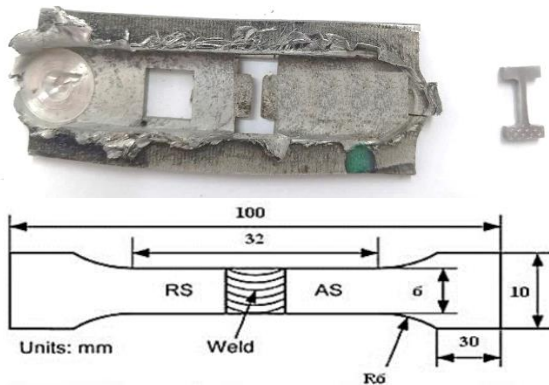


Figure 4- Welded sample and wirecut tensile sample from the welding site.

شکل ۴- نمونه جوشکاری شده و نمونه کشش وایرکات شده از محل جوشکاری.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مطالعات ریزساختاری

بر این اساس، سه ناحیه مختلف در یک مقطع FSW قابل تشخیص است که به نام های منطقه همزده (SZ)، منطقه تحت تأثیر حرارت مکانیکی (TMAZ) و منطقه تحت تأثیر حرارت (HAZ) نامیده می شوند. شکل ۵ تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع سطح جوش داده شده پس از چهار پاس را نشان می دهد و مناطق مختلف را متمایز می کند. تغییر شکل شدید پلاستیک و گرمای ایجاد شده توسط اصطکاک در حین فرآیند همزدن اصطکاکی، ریزساختار تبلور مجدد با دانه های بسیار ریز در SZ ایجاد می کند. این منطقه معمولاً به عنوان منطقه تبلور مجدد یافته دینامیکی شناخته می شود. منطقه هم زده در شکل ۵-ب نشان داده شده است. معمولاً چگالی کم نابجایی در دانه های تبلور مجدد یافته وجود دارد [۲۱-۲۲]. با این حال، تعداد کمی از محققان وجود دانه های تبلور مجدد را در SZ گزارش کردند که حاوی تراکم بالایی از مرزهای ریزدانه و نابجایی در این مناطق است. [۲۳]. فرآیندهای هم زدن اصطکاکی منجر به ایجاد یک منطقه انتقالی، منطقه متأثر از حرارت و منطقه تحت تأثیر حرارت مکانیکی بین ماده پایه و SZ می شود که در شکل ۵-ج و ۵-د نشان داده شده است. ناحیه TMAZ با دما و تغییر شکل در حین فرآیند هم زدن اصطکاکی افزایش می یابد [۲۴]. اگرچه تغییر شکل در TMAZ اعمال می شود، اما به دلیل کرنش ناکافی، تبلور مجدد در این ناحیه

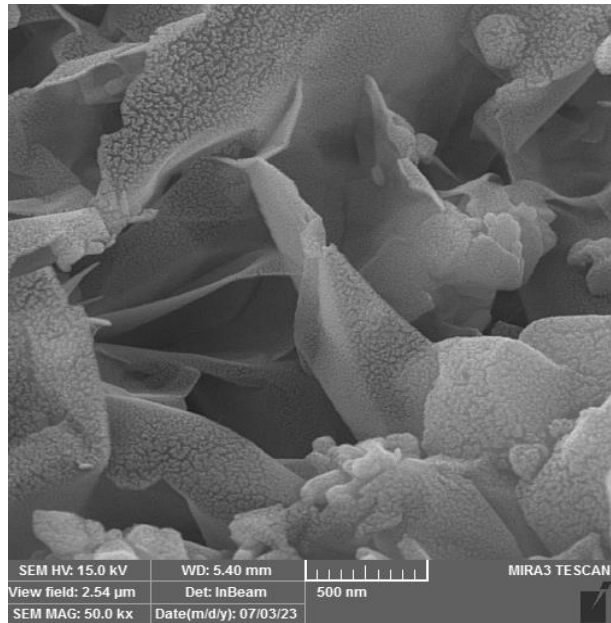


Figure 2- FESEM image from WS2 nanosheets.

شکل ۲- تصویر FESEM از نانوصفحات WS2.

از سرعت های چرخش دورانی ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ دور بر دقیقه و سرعت حرکت پیشروی ۱۴ و ۲۸ میلی متر بر دقیقه استفاده شده است. سپس نمونه با بالاترین استحکام کششی به عنوان نمونه بهینه انتخاب شد و در این ترکیب سرعت چرخش دورانی و سرعت حرکت پیشروی بدست آمد. همچنین اثر پاس ها مورد ارزیابی قرار گرفت. ابزار از فولاد کار گرم (H13) ساخته شد که دارای سختی HRC ۵۲ و قطر شانۀ آن ۲۰ میلی متر، قطر پین ۶ میلی متر و ارتفاع پین ۴،۶ میلی متر انتخاب شد. برای تسهیل جریان مواد در طول فرآیند و بهبود کیفیت، زاویه شیب ابزار دوار نسبت به محور Z دستگاه فرز برای همه نمونه ها ۳ درجه انتخاب شد. شکل ۳ یک نمای شماتیک از اندازه و پیکربندی ابزار را نشان می دهد.

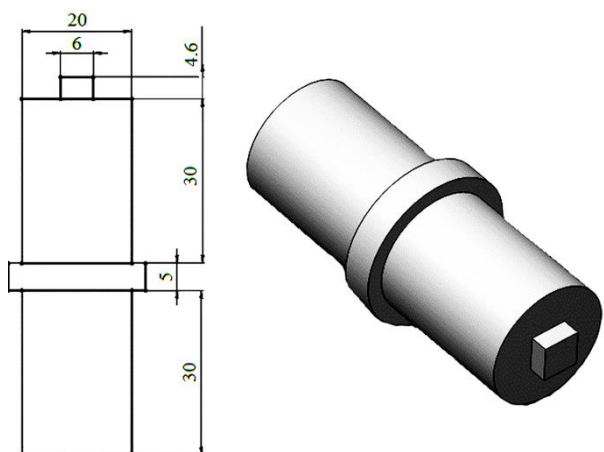


Figure 3- The geometry of the tool used in this research.

شکل ۳- هندسه ابزار استفاده شده در این تحقیق.

به منظور ارزیابی ریزساختار نمونه های جوش در مقطع عمود بر ناحیه جوش از روش استاندارد متالوگرافی ASTM E3-01 استفاده شد. نمونه ها

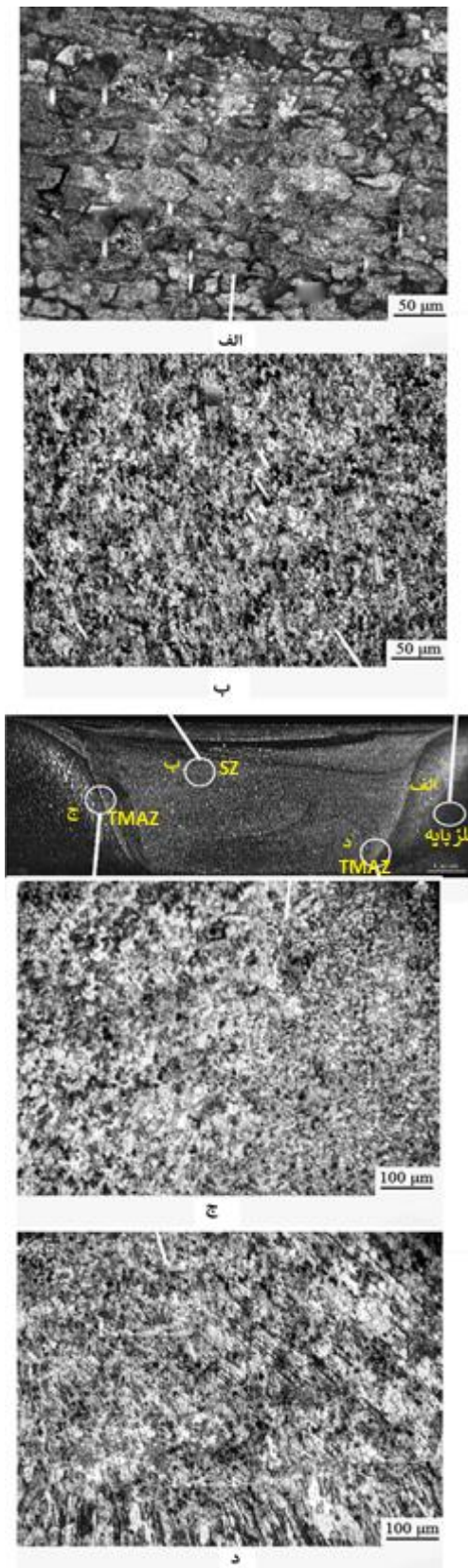


Fig. 5 Cross-sectional image of the specimen FSWed with four pass (a) base metal, (b) stir zone (SZ), (c) and (d) thermo mechanically affected zone (TMAZ).

شکل ۵ تصویر مقطعی از نمونه جوشکاری شده با چهار پاس (الف) فلز پایه، (ب) منطقه هم زدن (SZ)، (ج) و (د) منطقه تحت تاثیر مکانیکی حرارتی (TMAZ).
 جدول ۲. اندازه دانه متوسط نمونه های جوشکاری شده

رخ نمی دهد. با این حال، انحلال برخی از این رسوبات در این منطقه به دلیل قرار گرفتن در معرض دمای بالا در طول فرآیند مشاهده می شود [۲۶-۲۵]. علاوه بر این، نشان داده شده است که در TMAZ، دانه ها معمولا دارای تراکم بالایی از مرزدانه هستند [۲۵].

در مورد جوشکاری بدون حضور ذرات تقویت کننده، تنها عامل موثر دما یا حرارت ورودی است. یک راه موثر برای کاهش اندازه دانه ها استفاده از مکانیسم کوئچ است. در مورد جوشکاری با ذرات تقویت کننده، تشکیل ریزساختار متفاوت است. از یک طرف، گرمای ورودی اندازه دانه ها را افزایش می دهد. از سوی دیگر، وجود ذرات تقویت کننده نانو مانند یک سد سخت به عنوان مانعی در برابر رشد دانه ها عمل می کند و از رشد بیشتر دانه ها جلوگیری می کند و این پدیده به «قفل شدن» معروف است.

این یک روش اصلاح دانه و یک عامل کلیدی برای کاهش اندازه دانه نمونه جوش داده شده با ذرات تقویت کننده است. متوسط دانه بندی در ناحیه جوش در جدول ۲ ارائه شده است. متوسط اندازه دانه آلیاژ پایه ۵۰ میکرومتر می باشد که پس از یک بار عبور بدون تقویت به ۲۵ میکرومتر کاهش می یابد. با افزودن نانوذرات WS2 و با افزایش تعداد پاس، اندازه دانه بیشتر کاهش می یابد که برای نمونه چهار پاسی به ۱۲ میکرومتر می رسد. دلیل این کاهش بیشتر اندازه دانه این است که با انجام جوشکاری در گذرهای بیشتر، احتمال تجمع ذرات تقویت کننده کاهش می یابد و باعث می شود که ذرات به طور همگن توزیع شوند و قفل شدن بهتری رخ دهد. بنابراین از رشد دانه ها و تشکیل دانه های درشت جلوگیری می کند. لازم به ذکر است که ذرات کوچکتر بر اثر قفل شدن موثرتر هستند [۱۲]. شکل ۶ یک تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه جوش داده شده را پس از چهار پاس نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، توزیع ذرات در سطح همگن است و این امر بر ریزساختار و خواص مکانیکی نتیجه مطلوبی دارد.

آزمایش کشش برای به دست آوردن مقاومت تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول فلز پایه و نمونه های جوش داده شده استفاده می شود [۲۹]. جدول ۳ نتایج آزمایش کشش نمونه های جوش داده شده را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود استحکام کششی در نمونه های حاوی ذرات تقویت کننده نسبت به نمونه های بدون پودر افزایش یافته است. بهترین نتایج در نمونه های جوشی متعلق به نمونه چهار پاسی است که در آن استحکام به دست آمده نسبت به نمونه بدون پودر حدود ۵۲ MPa افزایش یافته است. به طور کلی سازوکار های تقویتی نمونه های حاوی ذرات تقویت کننده عبارتند از [۳۰-۳۱]:

- مکانیزم اوروان
- اندازه دانه
- سختی ناشی از نابجایی های ایجاد شده توسط تفاوت در انقباض حرارتی بین ذرات تقویت کننده و فلز پایه
- کار سختی به دلیل اختلاف کرنش بین ذرات تقویت کننده و فلز پایه

جدول ۳- نتایج کشش نمونه های جوشکاری شده در شرایط مختلف

Table 3- Tensile results of welded samples in different conditions

ازدیاد طول (%)	استحکام نهایی MPa	نمونه جوشکاری شده
۲۷	۲۵۱	نمونه پایه (یک پاس بدون نانوصفحه)
۲۳	۲۶۹	۲ پاس بدون نانوصفحه
۱۹	۲۸۵	۴ پاس بدون نانوصفحه
۲۲	۲۶۸	یک پاس با نانوصفحه
۲۱	۲۸۱	۲ پاس با نانوصفحه
۱۸	۳۰۲	۴ پاس با نانوصفحه

شکل ۸ نتایج تست کشش برای نمونه پایه را نشان می دهد. شکل ۹ سطح شکست نمونه های کششی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود شکست در نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده بدون استفاده از نانوصفحات WS₂ و نمونه چهار پاسی شکل پذیر است. اما یک تفاوت قابل مشاهده بین آنها وجود دارد؛ اندازه حفره ها در سطح نمونه های چهار پاس ریزتر از نمونه بدون پودر است و همچنین پخش بهتر ذرات تقویت کننده در این نمونه باعث افزایش خواص مکانیکی نمونه می شود.

Table 2. Average grain size of FSWed samples

Sample	Grain Size (μm)
BM	50
one pass without powder	25
WS ₂ particle- one Pass	18
WS ₂ particle- two Pass	14
WS ₂ particle- four Pass	12

۳-۲- آزمایش سختی

شکل ۷ مشخصات میکروسختی را در امتداد ضخامت میانی در سطح مقطع FSW برای نمونه های مختلف نشان می دهد. حداکثر سختی Hv ۱۳۵ در ناحیه ای به عرض ۱۰ میلی متر در اطراف خط مرکزی جوش برای نمونه با چهار پاس و با نانوذرات WS₂ مشاهده شد. این سختی مطابق با انتهای ناحیه SZ و ابتدای ناحیه TMAZ است. سختی در ناحیه اتصال که یک کامپوزیت پایه آلومینیومی است به اندازه دانه، چگالی نابجایی، نانوذرات تقویت کننده و حرارت ورودی در این ناحیه بستگی دارد. با توجه به معادله هال-پیچ، مقدار سختی با کاهش اندازه دانه افزایش می یابد [۲۷]. به عبارت دیگر، سختی با اندازه دانه رابطه معکوس دارد.

نابجایی هایی که در نتیجه توزیع همگن نانوذرات در فلز ایجاد می شود منجر به افزایش سختی می شوند. ذرات تقویت کننده بیشتر روی سختی اثر می گذارند زیرا ذرات سختی بالایی دارند و ردپای ناشی از قفل زدن منجر به افزایش سختی می شود [۲۸]. در مناطق مختلف نمونه، درجه سختی در ناحیه همزده به دلیل وجود نانوذرات، کاهش دانه بندی و مقدار تغییر شکل پلاستیکی بیشتر از هر ناحیه دیگری است و این ناحیه دارای چگالی ذرات ریز بالاتری نسبت به بقیه مناطق است. با افزایش تعداد پاس ها، سختی در مناطق دیگر نمونه افزایش می یابد که به دلیل توزیع بهتر نانوذرات در سطح آلومینیوم است. بهترین نتیجه برای نمونه چهار پاس است که سختی آنها در مقایسه با فلز پایه حدود Hv ۳۵ افزایش یافته است. با توجه به مقدار ریزسختی، سختی با افزایش فاصله از TMAZ کاهش یافت. در منطقه متأثر از حرارت (HAZ) مقدار ریزسختی به دلیل رشد دانه کاهش یافت.

۳-۳- آزمایش کشش

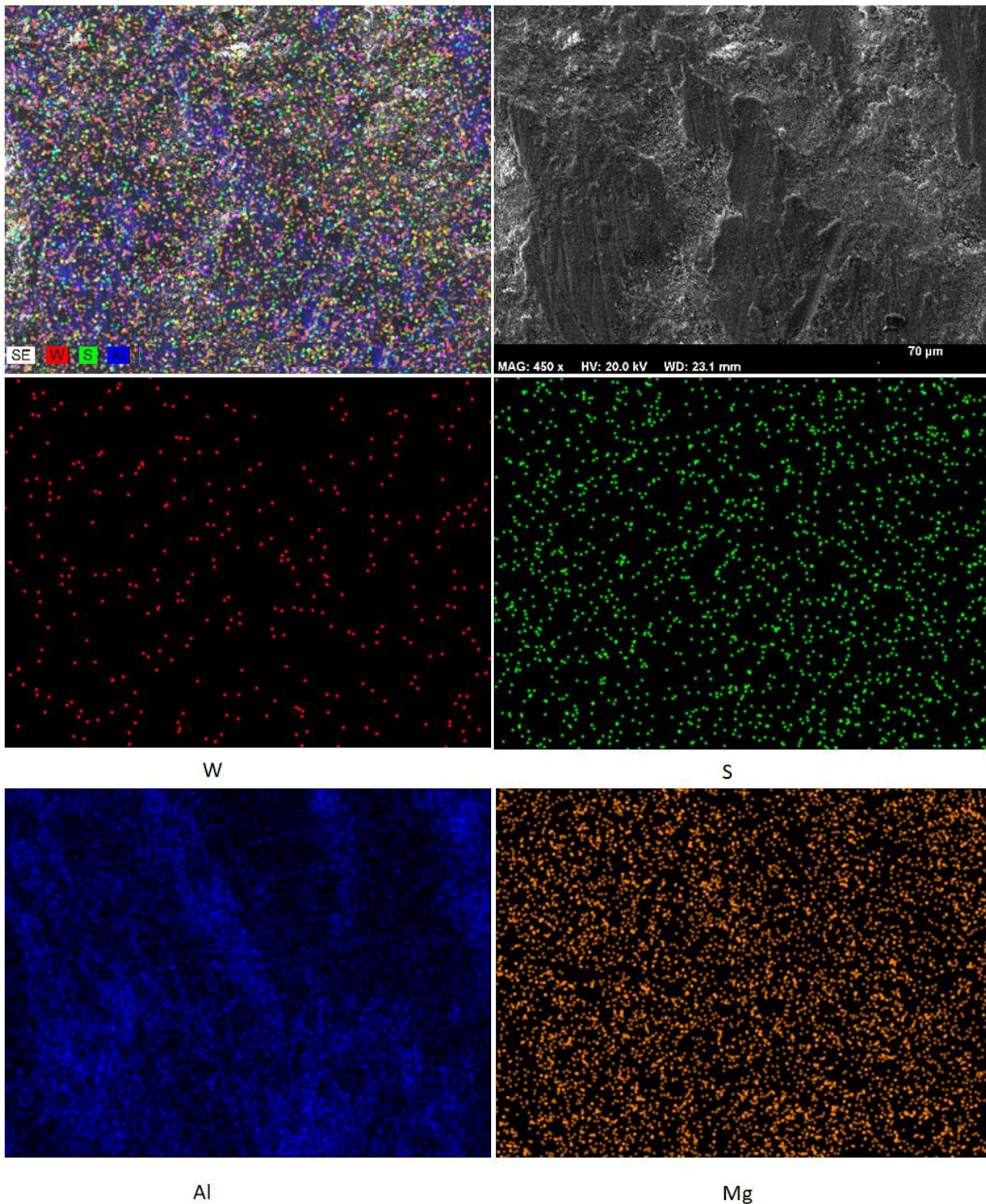


Figure 6- FESEM image and EDS analysis of WS2 nanoplates on the surface of the welded sample after 4 passes.

شکل ۶- تصویر FESEM و آنالیز EDS از نانوصفحات WS2 موجود در سطح نمونه جوشکاری شده بعد از ۴ پاس.

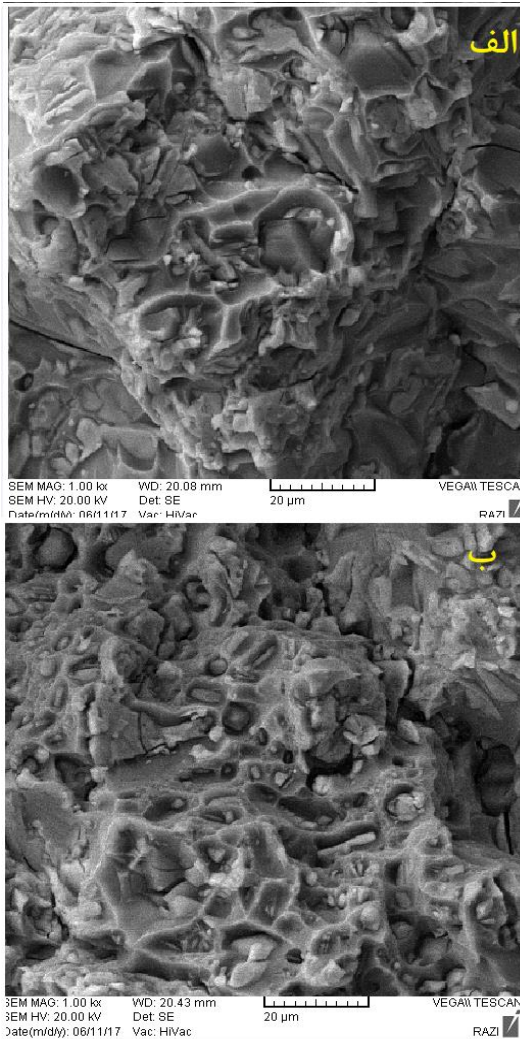


Figure 9- The fracture surface of samples A- base and B- 4 passes after the friction stir welding process.

شکل ۹- سطح شکست نمونه های الف- پایه و ب- ۴ پاس بعد از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، اثرات تعداد پاس جوش بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش لب به لب آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده با افزودن نانوصفحات WS2 به شیار جوش بررسی شده است. ریزساختار و خواص مکانیکی مانند استحکام کششی و ریزسختی بررسی شده و نتایج زیر به دست آمده است:

۱. حداکثر مقدار سختی در کل نمونه با ناحیه تغییر شکل مکانیکی یافته اختصاص دارد که با کاهش اندازه دانه، مقادیر سختی افزایش می یابد.
۲. در نمونه های جوشکاری بدون پودر تقویت کننده، حداقل مقدار سختی و استحکام به دست می آید اما با افزودن نانوذرات تقویت کننده، خواص مکانیکی بهبود یافته است.
۳. مقدار سختی و استحکام کششی با افزایش تعداد پاس جوش افزایش یافته و بیشتر از نمونه ای است که بدون نانو پودر جوش داده شده است. دلیل آن توزیع یکنواخت تر ذرات در زمینه و شرایط قفل شدن است که باعث کاهش اندازه دانه می شود. بهترین نتیجه به نمونه ای نسبت داده می شود که توسط چهار پاس جوش جوش داده شده است.

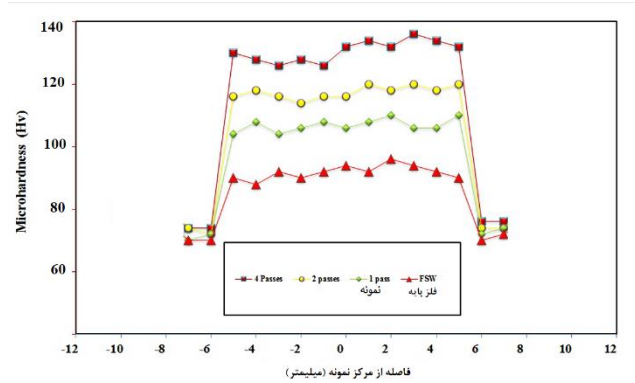


Figure 7- Hardness profile of the sample after friction stir welding.

شکل ۷- پروفیل سختی نمونه بعد از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی.

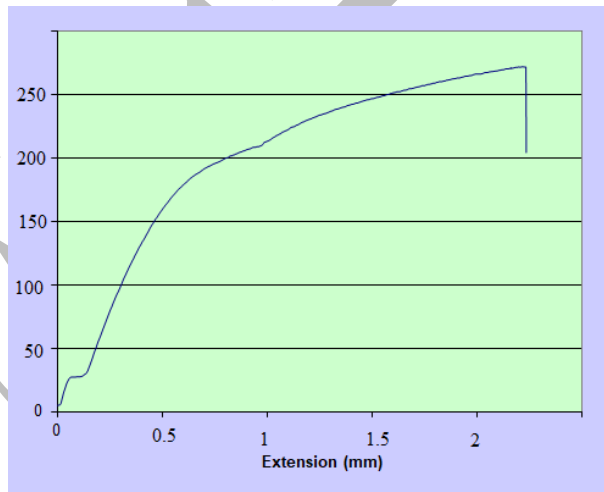


Figure 8- Tensile test result for the base sample.

شکل ۸- نمودار تست کشش برای نمونه پایه.

- [19] M.S. Han, S.J. Lee, J.C. Park, S.C. Ko, Y.B. Woo, and S.J. Kim, "Optimum condition by mechanical characteristic evaluation in friction stir welding for 5083-O Al alloy", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 19, pp. 17–22, (2009).
- [20] J.J.S. Dilip, M. Koilraj, V. Sundareswaren, G.D. Janaki Ram, and S.R. Koteswara Rao, "Microstructural characterization of dissimilar friction stir welds between AA2219 and AA5083", *Trans. Indian. Inst. Metals*, vol. 63, pp. 757–64, (2010).
- [21] G. Liu, L.E. Murr, C.S. Niou, J.C. Mclure, and F.R. Vega, "Microstructural aspects of the friction stir welding of 6061-T6 aluminum", *Scripta Mater*, vol. 37, pp. 355-361, (1997).
- [22] Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, and Sh. Jordan, "Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction stir welding", *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 30, pp. 2429-2437, (1999).
- [23] F. J. Humphreys, R. Priestner, "Fine-grained alloys by thermomechanical processing", *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci*, vol. 5, pp. 15-21, (2001).
- [24] J.Q. Su, T.W. Nelson, R.S. Mishra, and M. Mahoney, "Microstructural investigation of friction stir welded 7050- T651 aluminum", *Acta Mater*, vol. 51, pp. 713-729, (2003).
- [25] K.V. Jata, K.K. Sankaran, and J.J. Ruschau, "Friction stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7075-T7451", *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 31, pp. 2181-2192, (2000).
- [26] A. Shamsipur, S.F. Kashani-Bozorg, and A. Zarei-Hanzaki, "The effects of friction-stir process parameters on the fabrication of Ti/SiC nanocomposite surface layer", *Surf. Coat. Technol*, vol. 206, pp. 1372-1381, (2011).
- [27] K.Y. Wang, T.D. Shen, M.X. Quan, and W.D. Wei, "Hall-Petch relationship in nanocrystalline titanium produced by ball-milling", *J. mater. Sci. Lett*, vol. 12, pp. 1818-1820, (1993).
- [28] A. Dolatkhan, P. Golbabaei, M.K. Besharati Givi, and F. Molaiekiya, "Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing", *Mater. Des*, vol. 37, pp. 458-464, (2012).
- [29] Dieter, George Ellwood, "Mechanical metallurgy" New York. McGraw-Hill, 3rd Edition, (1994).
- [30] S. Shahraki, S. Khorasani, R. Abdi Behnagh, Y. Fotouhi, and H. Bisadi, "Producing of AA5083/ZrO2 Nanocomposite by Friction Stir Processing (FSP)", *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 44, pp. 1546-1553, (2013).
- [31] C. Maxwell Rejil, I. Dinaharan, S. J. Vijay, N. Murugan, "Microstructure and sliding wear behavior of AA6360/(TiC + B4C) hybrid surface composite layer synthesized by friction stir processing on aluminum substrate", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 552, pp. 336–344, (2012).
- [32] M. Raaft, T.S. Mahmood, H.M. Zakaria, and T.A. Khalifa, "Microstructural, mechanical and wear behavior of A390/graphite and A390/Al2O3 surface composites fabricated using FSP", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 52, pp. 5741–5746, (2011).
- [33] M. Raturi, A. Bhattacharya, "Electrochemical corrosion of AA6061-AA7075 double sided FSW joints prepared with and without secondary heating", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 38, pp. 590-612, (2022).
- [34] D.G. Andrade, C. Leitão, N. Dialami, M. Chiumentì, D.M. Rodrigues, "Modelling torque and temperature in friction stir welding of aluminium alloys", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 182, pp. 105725, (2020).
- [35] R. Prasad Mahto, S. Kanta Pal, "Friction Stir Welding of Dissimilar Materials: An Investigation of Microstructure and Nano-Indentation Study", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 55, pp. 103-118, (2020).
- [36] M.Raturi, A. Bhattacharya, "Temperature variation and influence on local mechanical properties assessed by nanoindentation in AA6061-AA7075 dissimilar FSW", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 148, pp. 107079, (2023).
- [1] N. Kumar, W. Yuan, S. Rajiv, Mishra, "Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials", 1nd ed., pp. 1-13, (2015).
- [2] W. Thomas, "Friction stir butt welding", International Patent Application No.PCT/GB92/0220.(1991).
- [3] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, "Friction stir welding and processing", *Mater. Sci. Eng. R*, vol. 50, pp. 1–78, (2005).
- [4] N. Mathan Kumar, S. Senthil Kumaran, L.A. Kumaraswamidhas, "Aerospace application on Al 2618 with reinforced – Si3N4, AlN and ZrB2 in-situ composites", *J. All. Compd*, vol. 672, pp. 238–250, (2016).
- [5] R. K. Uyyuru, M. K. Surappa, S. Brusethaug, "Tribological behavior of Al-Si-SiCp composites/automobile brake pad system under dry sliding conditions", *Tribol Int*, vol. 40, pp. 365–373, (2007).
- [6] P. Cavaliere, "Mechanical properties of friction stir processed 2618/Al2O3/20p metal matrix composite", *Compos. Part. A – Appl. Sci*, vol. 36, pp. 1657–1665, (2005).
- [7] P. Cavaliere, E. Cerri, L. Marzoli, and J.D. Santos, "Friction stir welding of ceramic particle reinforced aluminum based metal matrix composites", *Appl. Compos. Mater*, vol. 11, pp. 247–258, (2004).
- [8] K. Nakata, S. Inoki, Y. Nagano, and M. Ushio, "Friction stir welding of Al2O3 particulate 6061 Al alloy composite", *Mater. Sci. Forum*, vol. 426, pp.2873–2878, (2003).
- [9] L. Ceschini, I. Boromei, G. Minak, A. Morri, "Tarterini, Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10vol % Al2O3p composite", *Compos. Sci. Technol*, vol. 67, pp. 605–615, (2007).
- [10] H. Uzun, "Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminum alloy matrix composite", *Mater. Des*, vol. 28, pp. 1440–1446, (2007).
- [11] L.M. Marzoli, A.V. Strombeck, J.F.D. Santos, C. Gambaro, and L.M. Volpone, "Friction stir welding of an AA6061/Al2O3/20p reinforced alloy", *Compos. Sci. Technol*, vol. 66, pp. 363–371, (2006).
- [12] K.A.A. Hassan, A.F. Norman, D.A. Price, and P.B. Prangnell, "Stability of nugget zone grain structures in high strength Al-alloy friction stir welds during solution treatment", *Acta Mater*, vol. 51, pp. 1923–1936, (2003).
- [13] M. Saeidi, M. Barmouz, and M.K. Besharati Givi, "Investigation on AA5083/AA7075+Al2O3 Joint Fabricated by Friction Stir Welding: Characterizing Microstructure, Corrosion and Toughness Behavior", *Mater. Res*, vol. 18, pp. 1156-1162, (2015").
- [14] A.H. Feng, B.L. Xiao, and Z.Y. Ma, "Effect of microstructural evolution on mechanical properties of friction stir welded AA2009/SiCp composite", *Compos. Sci. Technol*, vol. 68, pp. 2141–2148, (2008).
- [15] H. Lombard, D.G. Hattingh, A. Steuwer, and M.N. James, "Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy", *Eng. Frac. Mech*, vol. 75, pp. 341–354, (2008).
- [16] H. Bisadi, A. Tavakoli, M. Tour Sangsaraki, and K. Tour Sangsaraki, "The influences of rotational and welding speeds on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints", *Mater. Des*, vol. 43, pp. 80–88, (2013).
- [17] M. Grujicic, G. Arakere, B. Pandurangan, A. Hariharan, C.F. Yen, B.A. Cheeseman, A.P. Reynolds, and M.A. Sutton, "Computational analysis of material flow during friction stir welding of AA5059 aluminum alloy", *J. Mater. Eng. Perform*, vol. 21, pp. 1824-1840, (2012).
- [18] I. Shigematsu, Y.J. Kwon, K. Suzuki, T. Imai, and N. Saito, "Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding", *J. Mater. Sci. Lett*, vol. 22, pp. 353–356, (2003).

نسخه پیش انتشار