



بررسی اثر تعداد پاس و نانوذرات ZrO_2 بر ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار سایش در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی Al-5083

سعید احمدی فرد¹، اکبر حیدرپور²، شهاب کاظمی^{3*}

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

2- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* همدان، صندوق پستی 6517838695 @shahab.kazemi@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 دی 1396

پذیرش: 14 بهمن 1396

ارائه در سایت: 10 اسفند 1396

کلید واژگان:

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

نانو ذرات

تعداد پاس

خواص مکانیکی

ریزساختار

چکیده

در این پژوهش از فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی برای انجام اتصال لب به لب آلیاژ آلومینیم 5083 و تولید هم‌زمان نانوکامپوزیت Al- ZrO_2 در محل اتصال استفاده شد. ابتدا متغیرهای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه انحراف مورد بررسی قرار گرفت تا نمونه‌ای که از نظر ظاهری بی‌عیب و بیشترین استحکام کششی را داشت به عنوان نمونه مطلوب انتخاب شود تا با اضافه کردن نانوذرات زیرکونیا به بررسی اثر تعداد پاس بر ریزساختار، خواص مکانیکی و سایش نمونه‌های جوش کاری شده پرداخته شود. برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ‌های نوری، الکترونی روبشی و نیروی اتمی استفاده شد و نتایج نشان داد که با افزایش تعداد پاس، توزیع ذرات تقویت‌کننده یکنواخت‌تر شده و اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی به شدت کاهش پیدا کرده است. علت این امر به حضور ذرات تقویت‌کننده مربوط می‌شود که با ایجاد قفل‌کنندگی مرز دانه‌ها کمک به جوانه‌زنی تبلور مجدد یافته و تأثیر بر شکسته شدن دانه‌های اولیه می‌گردد. بیشینه سختی و استحکام کششی مربوط به نمونه چهار پاس بود که به ترتیب 111 HV و 328.3 MPa در دست آمد که میزان سختی و کشش به ترتیب حدود 26 و 24 درصد نسبت به نمونه بدون پودر افزایش داشته است. برای ارزیابی مقاومت به سایش نمونه‌ها، از آزمون رفت و برگشتی استفاده شد و نتایج آزمون سایش نشان داد که با افزایش تعداد پاس میزان مقاومت به سایش افزایش می‌یابد.

The effects of Pass number and Nano-Size ZrO_2 powder on the Mechanical, Microstructure and Wear behavior in Friction Stir Welding of the Al-5083

Saeed Ahmadifard¹, Akbar Heidarpour², Shahab Kazemi^{1*}

1- Department of Material Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2- Department of Metallurgy and Materials Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran.

* P.O.B. 6517838695 Hamadan, Iran, shahab.kazemi@basu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 13 January 2018

Accepted 03 February 2018

Available Online 01 March 2018

Keywords:

Friction Stir Welding

Nano Particle

Pass Number

Mechanical Properties

Microstructure

ABSTRACT

In this study friction stir welding was used to perform butt joint of Al5083 and simultaneous production of Al- ZrO_2 nanocomposite in weldment. Welding parameters such as rotational speed, travel speed and tilt angle were varied to obtain optimum weldment with no defect and high tensile strength, and then by adding zirconia nanoparticle to welding zone of optimum sample, the effects of pass number on microstructure, mechanical properties and wear characteristics of welded specimens were investigated. In order to investigate microstructure, optical and scanning electron microscope and atomic force microscope was used. Results showed that by increasing pass number, the distribution of nanoparticles in the matrix become more homogenous and grain size in the stir zone has considerably decreased. The reason of this phenomena could be attributed to the presence of reinforcement nanoparticles which it causes pinning the grain boundary, enhancing nucleation of new recrystallized grains and the effect on breaking of initial grains. The maximum microhardness and tensile strength of weldment were obtained for composite weldment after four pass of 111 Hv and 328.3 MPa, which these values were 24 and 26% higher than weldment without reinforcement. Wear resistance of the weldment was determined by pin on disk test and revealed that by increasing pass number of FSW, the wear resistance increased.

[2,1]

1- مقدمه

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی¹ یک فرآیند اتصال حالت جامد است که در سال 1991 میلادی توسط مؤسسه جوش کاری² در کشور انگلستان ابداع گشت. این فرآیند در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های بسیار خوبی را داشته و به دلیل بازدهی انرژی بالا و تطبیق‌پذیری مناسب با محیط به فناوری سبز

آلومینیم سری 5xxx از نوع کارپذیر بوده که عنصر آلیاژی استحکام بخش آن، منیزیم است که بین 0.5 تا 6 درصد وزنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سری از آلومینیم به دلیل ویژگی‌هایی مانند چقرمگی بسیار بالا در دماهای پایین، کرنش سختی‌پذیر بودن و مقاومت به خوردگی بالا، کاربرد گسترده‌ای در صنایع دریایی، ساختمانی، تانک‌های ذخیره مواد و مخازن تحت فشار دارد

¹ Friction Stir Welding (FSW)

² The Welding Institute (TWI)

Please cite this article using:

S. Ahmadifard, A. Heidarpour, Sh. Kazemi, The effects of Pass number and Nano-Size ZrO_2 powder on the Mechanical, Microstructure and Wear behavior in Friction Stir Welding of the Al-5083, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 03, pp. 219-227, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.mme.modares.ac.ir

به طور یکنواخت در ناحیه اغتشاش توزیع شده که باعث بهبود خواص می‌گردد.

در این تحقیق ابتدا به بررسی متغیرهای مختلف فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی و زاویه انحراف پرداخته شد تا نمونه‌ای بدون عیب و بیشترین استحکام کششی به عنوان نمونه مطلوب انتخاب شود و سپس با اضافه کردن نانو ذرات زیرکونیا در محل اتصال آلومینیم 5083 در تعداد پاس‌های مختلف با نمونه بدون تقویت کننده از نظر ریزساختار، خواص مکانیکی و ساییش مقایسه شود.

2- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از ورق آلیاژ آلومینیم 5083 به ابعاد 200:60:5 میلی‌متر استفاده گردید که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 نشان داده شده است.

از پودر زیرکونیا (ZrO_2) به عنوان ماده تقویت‌کننده با خلوص 99.99% و با میانگین اندازه ذرات بین 50 نانومتر استفاده گردید و در شکل 2 تصویر مورفولوژی ذرات زیرکونیا که توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری¹ گرفته آورده شده است.

برای اعمال پودر شیاری در قسمت ضخامت ورق به عمق 0.5 میلی‌متر و عرض 1 میلی‌متر ایجاد شد که با قرار گرفتن دو ورق در کنار یکدیگر یک مربع کامل ایجاد گردید. به دلیل این که میزان اغتشاش ایجاد شده در سطح بیشتر بود و توزیع بهتر نانو ذرات را فراهم می‌سازد، فاصله شیار از سطح ورق 1 میلی‌متر و از پایین ورق 3 میلی‌متر در نظر گرفته شد. لازم به بیان است که میزان ذرات تقویت‌کننده برای هر نمونه در حدود 0.7 گرم بود. در شکل 3 شماتیکی از محل ایجاد شیار ایجاد شده و اعمال پودر آورده شده است.

جنس ابزار در این فرآیند بسیار مهم است، زیرا انتخاب جنس مناسب برای ابزار موجب کاهش ساییدگی و افزایش عمر ابزار می‌شود. برای همین منظور جنس ابزار استفاده شده در فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی از فولاد گرم کار (H13) که دارای سختی آن در حدود 48 HRC بود، انتخاب گردید. هندسه پین مربعی در نظر گرفته شد، قطر پین 7 میلی‌متر و ارتفاع آن 4.6 میلی‌متر و قطر شانه 20 میلی‌متر در نظر انتخاب شد. برای تسهیل جریان مواد طی فرآیند و بهبود کیفیت جوش تععر شانه 5 درجه در نظر گرفته شد. در شکل 4 شماتیکی از ابزار مورد استفاده شده آورده شده است.

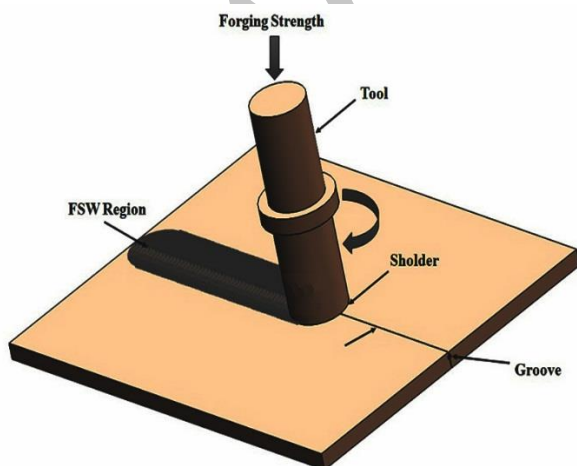


Fig. 1 Schematic illustration of FSW technique

شکل 1 شماتیکی از فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

معروف است [3]. در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با توجه به این که فلز هرگز به دمای ذوبش نمی‌رسد، به همین دلیل یک جوش با کیفیت بالا تولید می‌کند که از عیوب جوش کاری پایینی برخوردار است [4-6]. در شکل 1 شماتیکی از این فرآیند نشان داده شده است.

مزیت جوش کاری حالت جامد شامل موارد زیر است.
1- هنگامی که در حین جوش کاری فلز ذوب می‌شود به دلیل انجماد سریع، ساختارهای غیرتعادلی پس از اتصال به وجود می‌آید. در واقع به دلیل تنش‌های باقی‌مانده، ساختار به ترک خوردن حساس می‌شود؛ بنابراین برای اصلاح ساختار باید عملیات حرارتی روی قطعات صورت بگیرد. در جوش کاری حالت جامد، ساختار غیرتعادلی تشکیل نمی‌شود [7].

2- وقتی فلز ذوب می‌شود میزان انحلال گاز در آن بسیار بالاست. در فرآیندهای ذوبی، سطح مذاب با محیط اطراف کاملاً مواجه شده و امکان جذب گاز وجود دارد. این گازها میزان حلالیت در جامد را حین انجماد پایین آورده و مذاب یک حالت فوق اشباع پیدا می‌کند. خروج این گازهای حل شده از بالک جامد قطعه بسیار مشکل و تقریباً غیرممکن است. گاز هیدروژن بدترین حالت را ایجاد می‌کند، زیرا به صورت یک ذره پروتون که تحرک آن بسیار بالاست در مذاب حل می‌شود. هیدروژن باعث ایجاد ترک سرد یا ترک تأخیری می‌گردد. در جوش کاری حالت جامد به دلیل عدم وجود مذاب این مشکل نیز دیده نمی‌شود [8,9].

3- در حین جوش کاری انبساط‌های غیریکنواخت و هنگام انجماد انقباض‌های غیریکنواخت ایجاد می‌شود که همراه با ایجاد تنش‌های کششی است که مستعد ایجاد ترک هستند؛ بنابراین در جوش کاری حالت جامد، نوع تنش‌های باقی‌مانده در فصل مشترک، تنش‌های فشاری است که امکان گسترش ترک را از بین می‌برد [10].

در سال‌های اخیر به منظور بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی و همچنین برطرف کردن عیوب در منطقه جوش حاصل از جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی تحقیقاتی صورت گرفته است و محققان به روش‌هایی برای بهبود کیفیت جوش دست یافته‌اند. یکی از این روش‌ها افزودن فاز ثانویه به ناحیه جوش و تقویت محل اتصال و ایجاد کامپوزیت زمینه فلزی است [11]. به عنوان نمونه نظری و همکاران [12] به بررسی اثر تعداد پاس در حضور ذرات تقویت‌کننده آلومینا در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیم 2024 پرداختند و گزارش دادند که با انجام جوش کاری در دو پاس استحکام و سختی نسبت به نمونه بدون پودر افزایش پیدا کرده است.

میرجوادی و همکاران [13] موفق به افزایش استحکام کششی با افزودن ذرات تقویت‌کننده به محل اتصال آلومینیم جوش کاری شده با فرآیند FSW شدند. سعیدی و همکاران [14] موفق به انجام جوش کاری غیرهمجنس آلومینیم 5083 و 7075 با اضافه کردن نانو ذرات آلومینا با فرآیند FSW شدند و گزارش دادند که با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده مقاومت به خوردگی نسبت به نمونه بدون ذرات تقویت‌کننده افزایش پیدا کرده است، همچنین بهرامی و همکاران [15] موفق شدند در محل اتصال دو ورق آلومینیم 7075 ذرات کاربید سیلیسیم اضافه کنند و به بررسی خواص ضربه آن بپردازند و گزارش دادند که با اضافه شدن ذرات تقویت‌کننده میزان جذب انرژی اضافه شده که علت آن پیوند خوب بین ذرات تقویت‌کننده با زمینه بوده است. ژائو و همکاران [16] ابتدا نانو کامپوزیت آلیاژ Al-Cu-Mg با نانو لوله کربنی را تولید کردند و سپس ورق‌ها را با فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر جوش دادند و گزارش دادند که با انجام جوش کاری، نانولوله‌های کربنی

¹ Transmission Electron Microscope (TEM)

متغیرهای مورد بررسی برای به دست آوردن نمونه مطلوب در جدول 2 آورده شده است. ابتدا این نمونه‌ها در یک پاس و بدون ذرات تقویت‌کننده جوش کاری شدند تا نمونه‌ای که از نظر ظاهری بی‌عیب و بیشترین استحکام کششی را دارا بود به عنوان نمونه مطلوب انتخاب شود. طبق نتایج به دست آمده نمونه شماره 10 که در سرعت دورانی 710 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 22 میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف 3 درجه جوش کاری شده بود، به عنوان نمونه مطلوب انتخاب گردید و در این متغیرها با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده به بررسی اثر تعداد پاس‌های مختلف (6-4-2-1)، پرداخته شد که به صورت هم‌پوشانی کامل (صد در صد) انجام گردید.

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌های جوش کاری شده در مقطع عمود بر منطقه جوش با استفاده از روش متالوگرافی و طبق استاندارد ASTM E3-01 [17] نمونه‌های متالوگرافی تا سنباده شماره 3000 سنباده‌زنی و توسط دستگاه پولیش شد تا سطح نمونه‌ها کاملاً صاف و صیقلی شود، سپس توسط میکروسکوپ نوری مدل آنیون¹، نیروی اتمی² مدل DME DS-95-50E و الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل تی‌اسکن³ تحت بررسی قرار گرفته‌اند. برای آشکارسازی ساختار نمونه‌ها از محلول که حاوی 82 میلی‌لیتر آب، 15.5 میلی‌لیتر نیتریک اسید، 0.5 میلی‌لیتر فلورید اسید و 3 گرم اکسید کروم استفاده گردید. به دلیل این‌که ساختار ناحیه اغتشاشی بسیار ریزدانه شده بود، امکان گرفتن تصاویر با میکروسکوپ نوری وجود نداشت.

سختی سطحی نمونه‌های جوش کاری شده در نقاط متفاوت از مقطع جوش با استفاده از استاندارد ASTM E384 [18] به روش میکروویکرز توسط دستگاه بوهرلر مدل LTD-60005 و با نیروی 200 گرم و به مدت زمان 15 ثانیه انجام شده است.

از کلیه قطعات جوش کاری شده نمونه‌هایی طبق استاندارد ASTM E8-04 [19] برای انجام آزمون کشش آماده شدند و آزمون با سرعت ثابت 1 میلی‌متر بر دقیقه و نرخ کرنش 0.003 در دمای محیط برای کلیه نمونه‌های جوش کاری شده توسط سنتام⁴ 150 انجام گردید. برای بررسی دقیق‌تر از هر قطعه جوش کاری سه نمونه کشش تهیه شد. در شکل 5 شماتیکی از نحوه برش نمونه‌های کشش همراه با ابعاد آن‌ها آورده شده است.

آزمون سایش به روش پین بر دیسک و به صورت رفت و برگشتی طبق استاندارد ASTM G99 [20] در دمای محیط توسط دستگاه آرکا صنعت آروین مدل X524L انجام شد. پیش از انجام آزمون سایش نمونه‌ها تا سنباده 1200 سنباده‌زنی شدند. آزمون سایش به مسافت 1000 متر و در بارهای اعمالی 5 و 10 نیوتن و با سرعت 0.15 متر بر ثانیه انجام شد. جنس ماده ساینده از جنس فولاد AISI D3 انتخاب شد که سختی آن 58 HRC بود. به منظور ثبت و اندازه‌گیری کاهش وزن نمونه‌ها از یک ترازو با حساسیت ± 0.1 استفاده گردید و همچنین نیروی اصطکاک به طور اتوماتیک توسط دستگاه ثبت و در نهایت سطح ساییده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار

در شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری نمونه جوش کاری شده بدون پودر شماره 10 (سرعت دورانی 710 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 22 میلی‌متر بر

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلومینیم 5083

Table 1 Chemical composition of Al 5083

Al	Ti	Mg	Mn	Cu	Fe	Zn	Si	عناصر
Bal	0.026	4.26	0.61	0.04	0.31	0.02	0.1	درصد وزنی

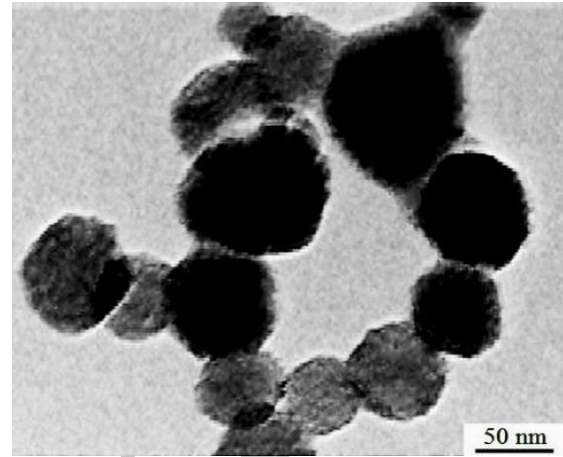


Fig. 2 TEM micrograph of ZrO_2 nanoparticle

شکل 2 تصویر TEM از نانو ذرات زیرکونیا

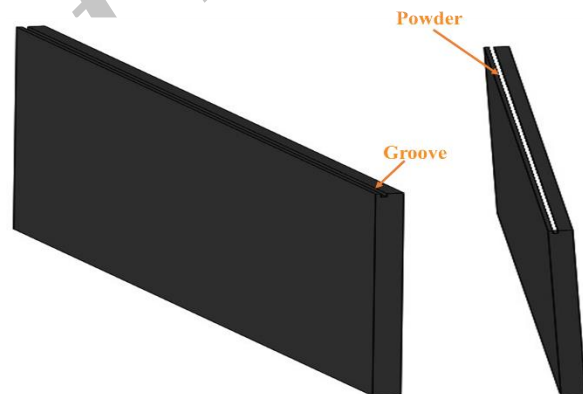


Fig. 3 Macrograph of how to create a groove and apply powder

شکل 3 شماتیکی از نحوه ایجاد شیار و اعمال پودر

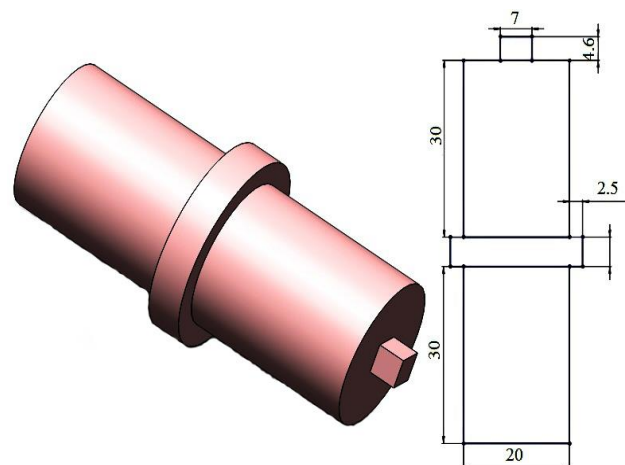


Fig. 4 Macrograph of tool with square pin its diameters

شکل 4 شماتیکی از ابزار با پین مربعی و ابعاد آن

¹ Unione

² Atomic Force Microscope (AFM)

³ Te Scane

⁴ Santam

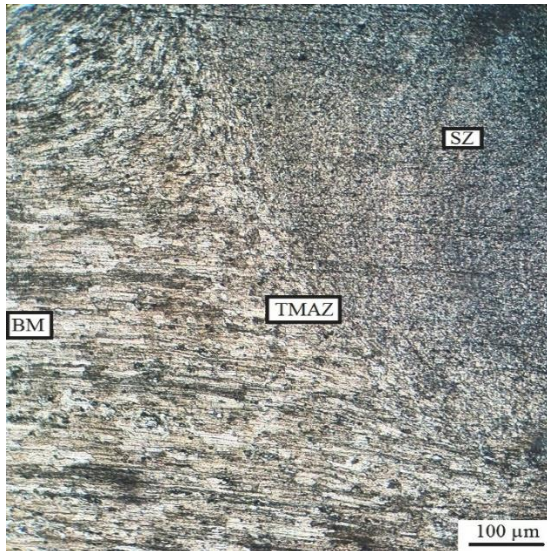


Fig. 6 OM of cross section of the optimum sample (No 10)

شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه مطلوب (شماره 10)

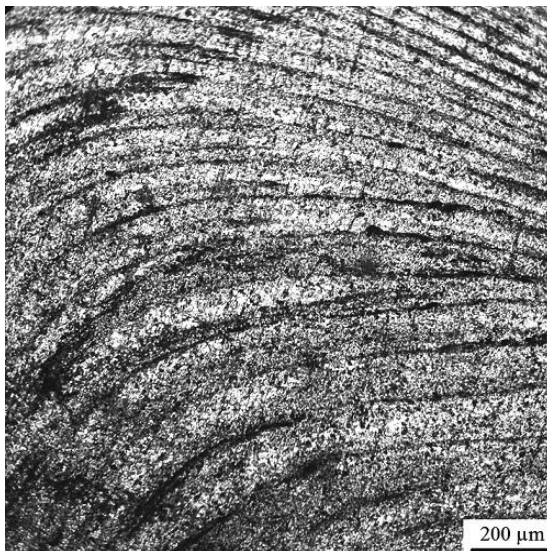


Fig. 7 OM image of Onion rings structure No 10 sample

شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری از ساختار حلقه پیازی نمونه شماره 10

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه اغتشاشی نمونه 4 پاسه را نشان می‌دهد و مشخص است که توزیع ذرات به طور یکنواخت بوده که علت آن میزان حرارت ورودی و سیلان ماده در حین انجام فرآیند است و این تأثیر مطلوبی در کاهش اندازه دانه دارد به گونه‌ای که این ذرات مانند سدی مانع از رشد دانه می‌شود که باعث رخ دادن حالت قفل‌شدگی می‌شود [25]، همچنین از ذرات موجود آنالیز عنصری گرفته و مشخص شد ذرات زیرکونیا هستند.

3-2- خواص مکانیکی

شکل 10 نمودار سختی نمونه‌های جوش کاری شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده و افزایش تعداد پاس سختی افزایش داشته است. بهترین نتیجه مربوط به نمونه 4 پاسه است که میانگین سختی آن در حدود 111 HV به دست آمد که حدود 26 درصد بیشتر از نمونه بدون پودر است. نکته قابل توجه آن است که میزان سختی در قسمت پیشرو بیشتر از قسمت پسرو است. در سمت پیشرو جهت

جدول 2 تنظیمات آزمایشگاهی برای به دست آوردن شرایط مطلوب

Table 2 Laboratory setting to get the desired conditions

شماره نمونه	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)	زاویه انحراف (درجه)
1	330	22	2
2	330	22	3
3	330	56	2
4	330	56	3
5	550	22	2
6	550	22	3
7	550	56	2
8	550	56	3
9	710	22	2
10	710	22	3
11	710	56	2
12	710	56	3

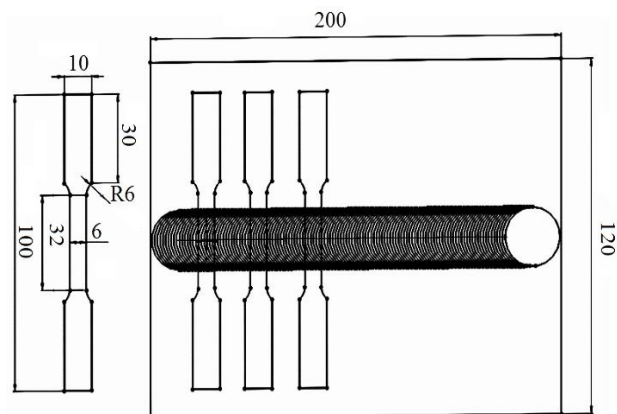


Fig. 5 Schematic illustration of tensile specimen (mm)

شکل 5 شماتیکی از نمونه‌های کشش (برحسب میلی‌متر)

دقیقه و زاویه انحراف 3 درجه) را نشان می‌دهد و همان‌طور که مشخص است باعث تشکیل نواحی از جمله ناحیه اغتشاشی¹ و ناحیه ترمومکانیکی² شده است. براساس میزان کرنش و گرادیان‌های حرارتی که در حین فرآیند در هر کدام از نواحی ایجاد می‌شود، ساختارهای آن‌ها با یکدیگر متفاوت است [21]. به دلیل این‌که تمرکز حرارت در ناحیه اغتشاشی بود ناحیه متأثر از حرارت³ قابل تشخیص نبود و از نظر ساختاری تفاوتی با فلز پایه نداشت.

ناحیه اغتشاشی بیشترین میزان تغییر شکل پلاستیک و در نتیجه بیشترین دما را به خود اختصاص داده است و در مقایسه با دیگر نواحی ساختاری با دانه‌بندی ریزتری دارد [22]. در ناحیه ترمومکانیکی میزان کرنش یا زمان یا هر دو متغیر در این ناحیه به اندازه‌ای نبوده است که تبلور مجدد کامل شود و به همین دلیل ریزساختار آن تا حدی با ریزساختار ناحیه اغتشاشی تفاوت دارد که تبلور مجدد کاملی رخ بوده است.

تحت برخی از شرایط یک ساختار حلقه پیازی⁴ در ناحیه اغتشاشی به وجود می‌آید. این امر نشان‌دهنده جریان داشتن ماده است [23-24]. در شکل 7 تصویری از این ساختار آورده شده است.

شکل 8 تصویر AFM از ناحیه اغتشاشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با اضافه کردن ذرات تقویت‌کننده ساختار نسبت به نمونه بدون پودر ریزدانه‌تر شده و همچنین با افزایش تعداد پاس، اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی کاهش پیدا کرده و علت آن تغییر شکل پلاستیک شدیدی است که در هر پاس رخ می‌دهد و همچنین توزیع بهتر ذرات در زمینه است.

¹ Stir Zone (SZ)

² Thermo Mechanical Affected Zone (TMAZ)

³ Heat Affect Zone (HAZ)

⁴ Onion Rings

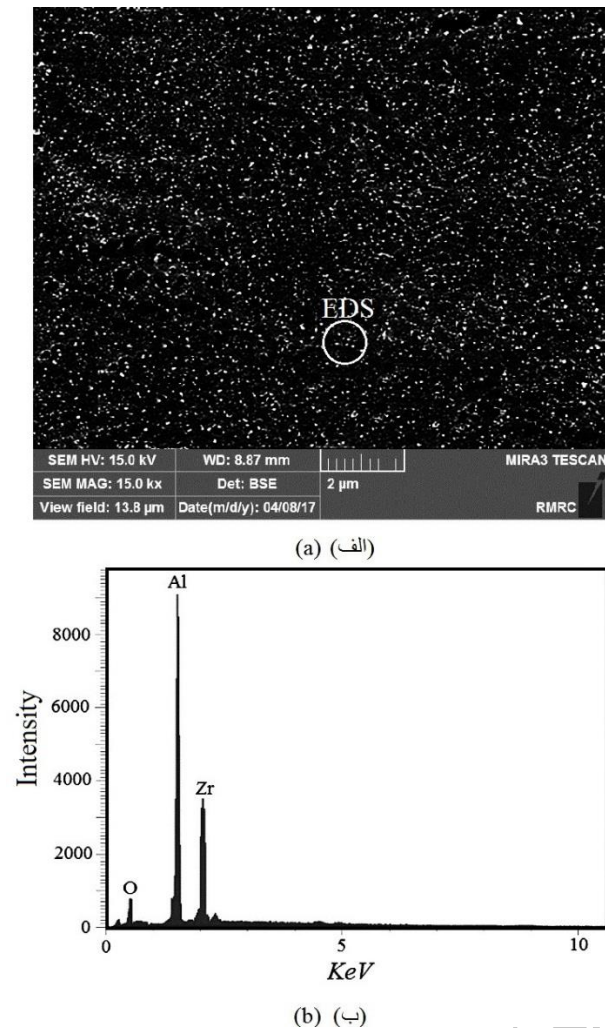


Fig. 9 a- FESEM micrograph of the SZ in the specimen FSWed with 4 pass, b- EDS analyze

شکل 9 الف- تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه اغتشاشی نمونه جوش کاری شده در 4 پاس، ب- نتیجه آنالیز EDS

اغتشاشی موجب افزایش نیروی محرکه تبلور مجدد دینامیکی این قسمت نسبت به جهت پسرو می‌شود؛ بنابراین اصلاح ساختار در جهت پیشرو بیشتر از جهت پسرو بوده و در نتیجه سختی جهت پیشرو نیز بیشتر است. تفاوت سختی در قسمت پیشرو و پسرو به علت اختلاف تغییر شکل پلاستیک یا گرادیان کرنش در ناحیه اغتشاشی است [28]. اما با افزایش تعداد پاس و تغییر جهت چرخش ابزار در هر پاس دیگر این مشکل برطرف شده و سختی در هر دو قسمت پیشرو و پسرو تقریباً یکسان است.

شکل 11 نتایج آزمون کشش برای نمونه‌های جوش کاری شده بدون اعمال ذرات تقویت کننده است. طبق نتایج به دست آمده نمونه شماره 10 به عنوان نمونه مطلوب انتخاب شد تا به بررسی اثر اضافه کردن ذرات تقویت کننده زیرکونیا و تعداد پاس پرداخته شود. شکل 12 نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های جوش کاری شده است. مطابق با نتایج سختی با اضافه کردن ذرات تقویت کننده و افزایش تعداد پاس استحکام کششی بیشتر شده و بهترین نتیجه مربوط به نمونه 4 پاسه و حدود 24% نسبت به نمونه بدون پودر استحکام کششی افزایش داشته است. در جدول 3 خلاصه نتایج خواص مکانیکی آورده شده است.

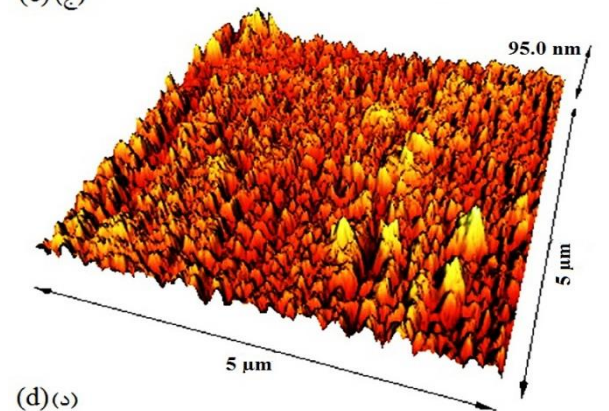
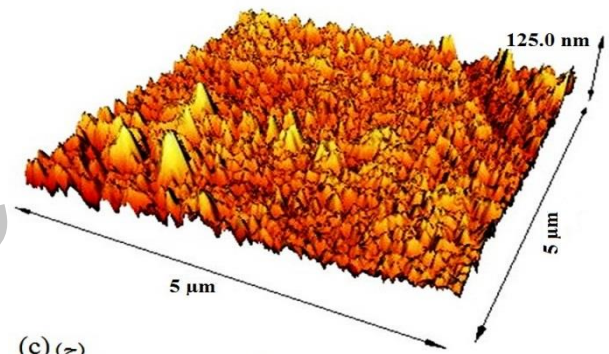
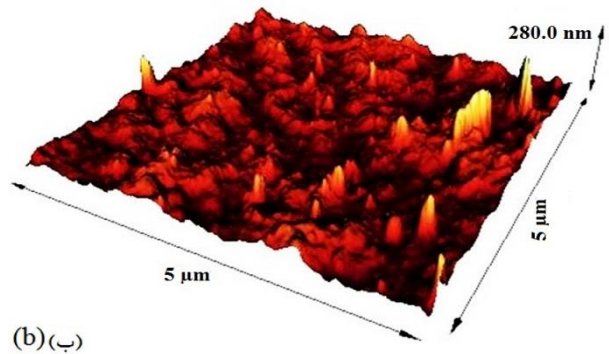
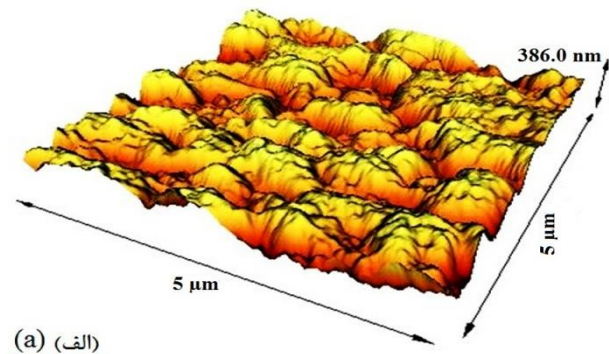


Fig. 8 AFM image of the SZ a- FSW BM, b- 1, c- 2, d- 4 pass

شکل 8 تصویر AFM از ناحیه اغتشاشی، الف- فلز پایه جوش کاری شده، ب- 1، ج- 2، د- 4 پاس

پیشروی و چرخش ابزار یکسان است، اما در سمت پسرو این دو سرعت خلاف جهت هم هستند. در نتیجه در سمت پسرو برآیند سرعت کاهش می‌یابد به همین دلیل حرارت ناشی از اصطکاک در سمت پیشرو بیشتر از حرارت ایجاد شده حین حرکت ابزار در سمت پسرو است [26-27]. حرارت بیشتر ایجاد شده در جهت پیشرو از ناحیه اغتشاشی همراه با تغییر فرم شدید ناحیه

- استحکام بخشی اوروان؛
- ناهمبندی‌های به وجود آمده از اختلاف اقباض حرارتی بین ذرات تقویت کننده و زمینه؛
- کارسختی ناشی از اختلاف کرنشی بین ذرات تقویت کننده و زمینه [31-30].

3-3- آزمون سایش

در شکل 13-a نمودار کاهش وزن برحسب مسافت لغزش نمونه‌های جوش کاری شده در بار اعمالی 5 نیوتن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است بیشترین کاهش وزن مربوط به نمونه بدون پودر و کمترین هم مربوط به نمونه 4 پاسه است، همچنین شکل 13-b نمودار کاهش وزن را در بار اعمالی 10 نیوتن را نشان می‌دهد و مشخص است که با افزایش بار اعمالی میزان کاهش وزن همه نمونه‌ها بیشتر شده است. علت این است که با افزایش بار اعمالی قدرت نفوذ ماده ساینده بیشتر شده یا به عبارت دیگر سطح تماس واقعی بین سطح نمونه و ماده ساینده بیشتر شده و به مقدار واقعی خود نزدیک می‌شود [32].

مطابق با رابطه (1) افزایش سختی نمونه می‌تواند منجر به کاهش در حجم سایش یافته β و یا افزایش در مقاومت سایشی ماده شود [33].

$$\beta = C \times \frac{R \times V}{H} \quad (1)$$

در این رابطه V سرعت سایش، H سختی ماده تحت سایش، R بار اعمالی و C ثابت است. طبق این رابطه در شرایط سایش چسبان، افزایش سختی سبب کاهش میزان نرخ سایش و در نتیجه افزایش مقاومت سایشی ماده می‌شود. طبق این رابطه با افزایش بار اعمالی میزان کاهش حجم نیز بیشتر می‌شود که در این تحقیق با افزایش بار اعمالی از 5 به 10 نیوتن کاهش حجم بیشتری صورت گرفت [34].

شکل 14 نمودار نرخ سایش (کاهش وزن/ مسافت لغزش) در بار اعمالی 5 نیوتن برحسب سختی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش سختی میزان نرخ سایش کاهش پیدا کرده است. در واقع با افزایش سختی مقاومت در برابر براده برداری بیشتر می‌شود.

آچارد رابطه‌ای (2) در مورد میزان نرخ سایش مطرح کرد [35].

$$W_v = K L F / H \quad (2)$$

در این رابطه W_v نرخ سایش، K ضریب اصطکاک، L مسافت سایش، F بار اعمالی و H سختی است. طبق این رابطه هرچه میزان سختی بیشتر باشد، میزان نرخ سایش نیز کمتر خواهد شد.

شکل 15 میانگین ضریب اصطکاک در بارهای اعمالی 5 و 10 نیوتن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با اضافه شدن ذرات تقویت کننده و افزایش تعداد پاس میزان ضریب اصطکاک کمتر شده و این نشان‌دهنده افزایش مقاومت در برابر کنده شدن ماده از سطح است [36].

در شکل 16 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش برای نمونه بدون پودر جوش کاری شده و 4 پاسه در بزرگنمایی پایین را نشان می‌دهد.

جدول 3 خواص مکانیکی نمونه‌های جوش کاری شده ذرات زیرکونیا

Table 3 Mechanical properties of FSWed specimen with ZrO_2

نمونه	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (%)	سختی (HV)
FSW BM	263.9	189.6	31.4	88
1 Pass	278.4	197.3	29.2	91
2 Pass	291.8	204.1	24	99
4 Pass	328.3	228.9	20.2	111

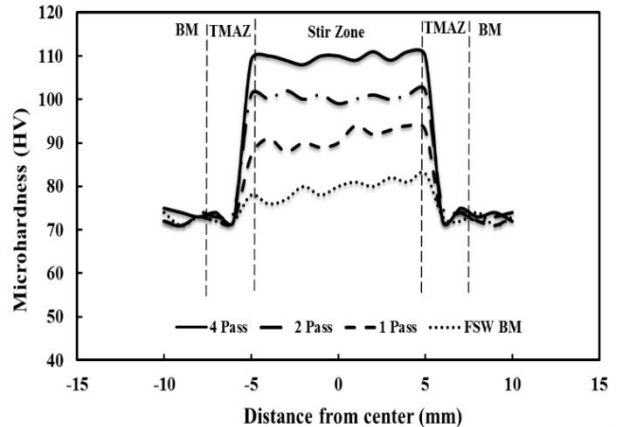


Fig. 10 Micro-hardness profile of FSWed specimen with ZrO_2

شکل 10 نمودار میکروسختی نمونه‌های جوش کاری شده با ذرات زیرکونیا

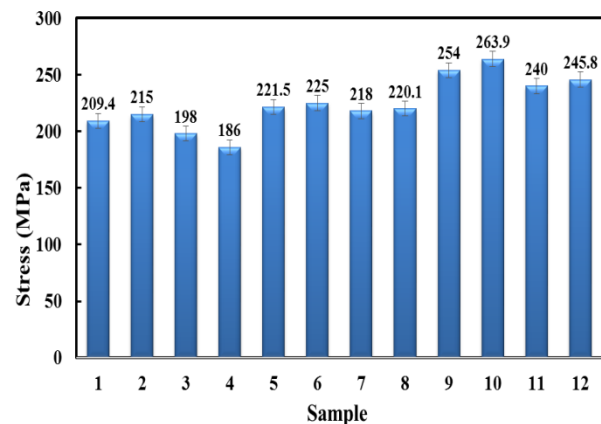


Fig. 11 Tensile test results for non-particle reinforcing specimen

شکل 11 نتایج آزمون کشش نمونه‌های بدون ذرات تقویت کننده

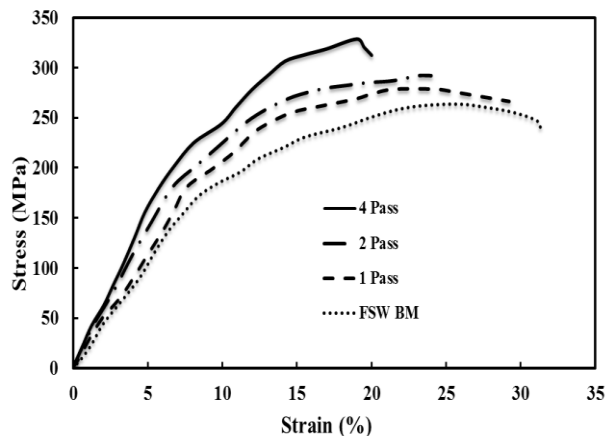


Fig. 12 Stress-strain curves of FSWed specimen with ZrO_2

شکل 12 نمودار تنش-کرنش نمونه‌های جوش کاری شده ذرات زیرکونیا

عوامل مختلفی در افزایش استحکام تأثیرگذار که عبارت است از:

- فلزات و در دمای پایین، سختی و استحکام تابعی از اندازه دانه است. در واقع طبق رابطه هال-پیچ¹ با کاهش اندازه سختی و استحکام بهبود می‌یابد [29].

¹ Hall-Pitch

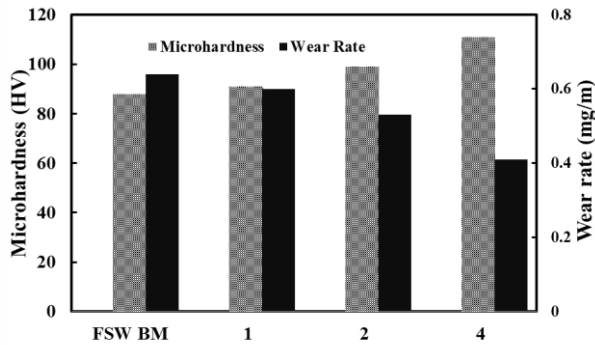


Fig. 14 Change in wear rate vs microhardness with ZrO_2

شکل 14 تغییرات نرخ سایش برحسب تغییرات سختی ذرات زیرکونیا

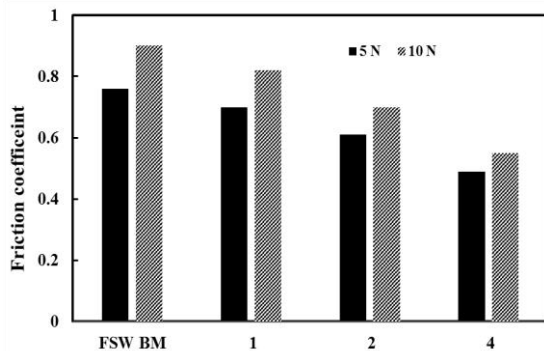
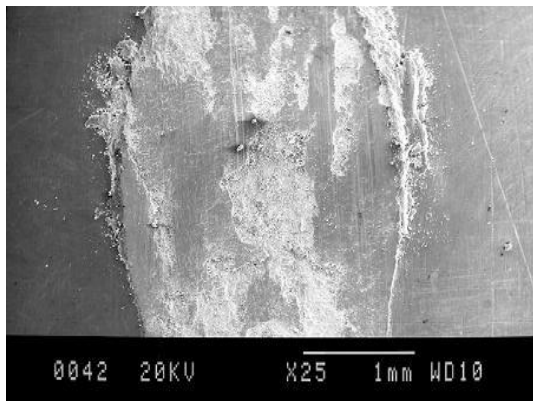
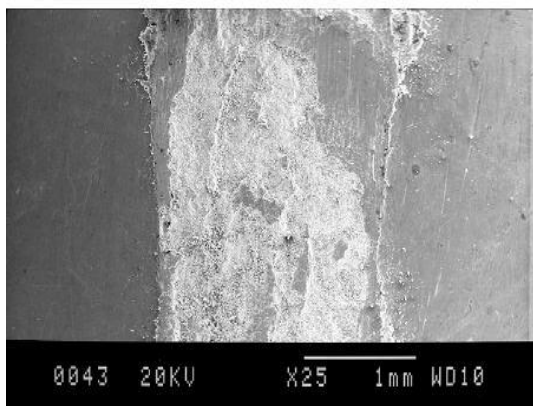


Fig. 15 Change in friction coefficient FSWed specimens with ZrO_2

شکل 15 تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌های جوش کاری شده ذرات زیرکونیا



(الف) (ا)



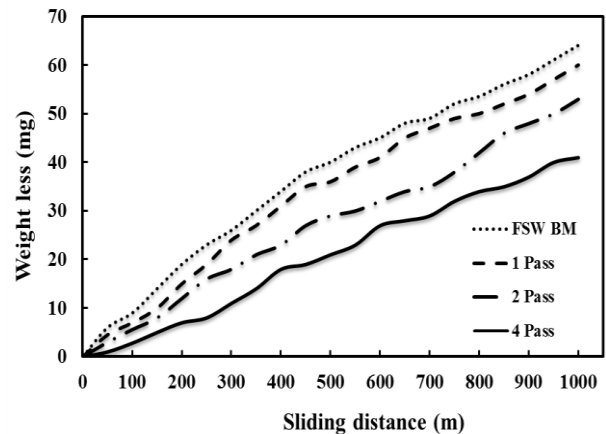
(ب) (ب)

Fig. 16 SEM image of wear lines width in low magnification a- No 10, b- 4 pass

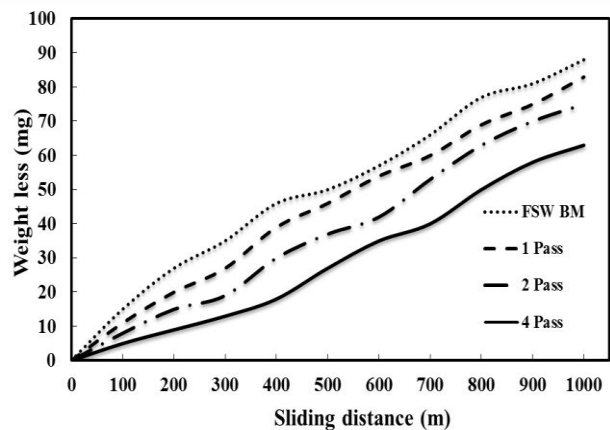
شکل 16 تصویر SEM از عرض خطوط سایش در بزرگنمایی پایین الف- فلز پایه جوش کاری شده، ب- 4 پاس

همان‌طور که مشخص است عرض محل ساییده شده در نمونه 4 پاسه کمتر بوده و میزان کنده شدن ماده از سطح آن کم است که این نشان‌دهنده مقاومت بالا نمونه در برابر نفوذ پین یا در واقع مقاومت بالای نمونه در برابر خیش زدن پین ساینده است. یکی دیگر از عوامل نیز می‌تواند پیوند خوب بین زمینه و ذرات تقویت‌کننده باشد [37].

برای بررسی بهتر مکانیزم‌های سایش در این دو نمونه (بدون پودر و 4 پاسه) تصاویری در بزرگنمایی بالاتر گرفته شد که در شکل 17 آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است در سطح ساییده شده نمونه بدون پودر جوش کاری شده آثار کندگی و شیارهای عمیق‌تری نسبت به نمونه 4 پاسه ایجاد شده است. این موارد همراه با وجود آثار تغییر شکل پلاستیک و لایه‌لایه شدن بر سطح نمونه بدون پودر مذکور دلالت بر سایش با مکانیزم چسبان¹ است. در نمونه 4 پاسه شیارهای ایجاد شده ناشی از سایش کم عمق‌تر بوده که این به دلیل حضور ذرات تقویت‌کننده ZrO_2 و در نتیجه باعث افزایش سختی نمونه شده و مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک بیشتر می‌شود و طبق تصویر میکروسکوپ الکترونی مکانیزم غالب از نوع خراشان² است [37-39].



(الف) (ا)



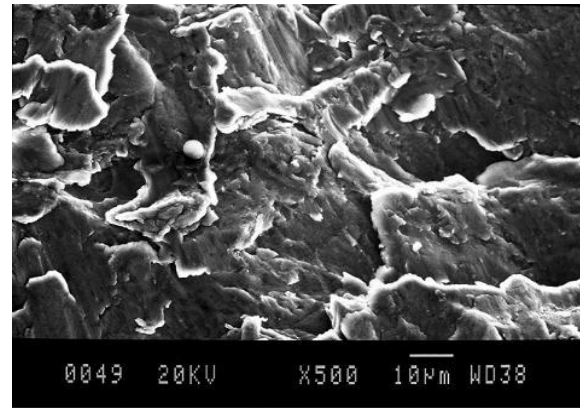
(ب) (ب)

Fig. 13 Variation of weight loss with the sliding distance for FSWed specimen with ZrO_2 a- 5N, b- 10N

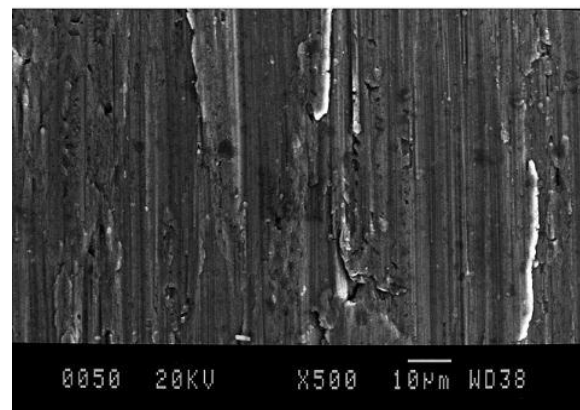
شکل 13 تغییرات کاهش وزن برحسب مسافت لغزش برای نمونه‌های جوش کاری شده ذرات زیرکونیا الف- 5 نیوتن، ب- 10 نیوتن

¹ Adhesive
² Abrasive

- 31-36, 2016. (in Persian فارسی)
- [2] S. A. Hossieni, K. Ranjbar, R. Dehmolaie, A. R. Amirani, Fabrication of Al5083 surface composites reinforced by CNTs and cerium oxide nano particles via friction stir processing, *Alloys and Compounds*, Vol. 662, No. 1, pp. 725-733, 2014.
- [3] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering R*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [4] L. Ceschini, I. Boromei, G. Minak, A. Morri, F. Tarterini, Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005 vol% Al_2O_3 composite, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 3-4, pp. 605-615, 2007.
- [5] S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Predicting tensile strength, hardness and corrosion rate of friction stir welded AA6061-T6 aluminum alloy joints, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 1, pp. 2878-2890, 2011.
- [6] W. B. Lee, S. B. Jung, The joint properties of copper by friction stir welding, *Materials Letters*, Vol. 58, No. 1, pp. 1041-1046, 2004.
- [7] J. Arbegast, A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding, *Scripta Materials*, Vol. 58, No. 4, pp. 372-376, 2008.
- [8] V. Balasubramanian, Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters, *Materials Science Engineering A*, Vol. 480, No. 5, pp. 397-403, 2008.
- [9] C. M. Chen, R. Kovacevic, Finite element modeling of friction stir welding-thermal and thermo mechanical analysis, *Machining Tool Manufacture*, Vol. 43, No. 2, pp. 1319-1326, 2003.
- [10] A. Feng, B. Xiao, Z. Y. Ma, Effect of microstructural evolution on mechanical properties of friction stir welded AA2009/SiCp composite, *Composite Science and Technology*, Vol. 68, No. 4, pp. 2141-2148, 2008.
- [11] R. Nandan, T. Debroy, H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding-Process, weldment structure and properties, *Progress in Materials Science*, Vol. 53, No. 9, pp. 980-1023, 2008.
- [12] M. Nazari, M. K. Besharati Givi, M. R. Farahani, J. Mollaei Milani, H. Mohammadzaeh Jamalian, Investigation on the effects of using nano size Al_2O_3 powder on the mechanical and microstructural in the multi-passes continuous friction stir welding of the 2024-T6, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 85-90, 2014. (in Persian فارسی)
- [13] S. S. Mirjavadi, M. Alipour, S. Emamian, S. Kord, A. M. S. Hamouda, G. Koppad, R. Keshavamurthy, Investigation of the effects of TiO_2 Nanoparticles on the microstructure, mechanical properties and wear resistance of friction stir welded Al5083, *Alloys and Compounds*, Vol. 712, No. 1, pp. 795-803, 2017.
- [14] M. Saeidi, M. Barmouz, M. K. Besharati Givi, Investigation on AA 5083/AA7075 + Al_2O_3 joint fabricated by friction stir welding: characterizing microstructure, corrosion and toughness behavior, *Materials Research*, Vol. 18, No. 6, pp. 1156-1162, 2015.
- [15] M. Bahrami, N. Helmi, K. Dehghani, M. K. B. Givi, Exploring the effects of SiC reinforcement incorporation on mechanical properties of friction stir welded 7075 aluminum alloy: Fatigue life, impact energy, tensile strength, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 595, No. 5, pp. 173-178, 2014.
- [16] K. Zhao, Z. Liu, B. Xiao, Z. Ma, Friction stir welding of carbon nanotube reinforced Al-Cu-Mg alloy composite plates, *Materials Science and Technology*, Vol. 33, No. 9, pp. 1004-1008, 2017.
- [17] R. Bauri, G. D. Janaki Ram, D. Yadav, C. N. Shyam Kumar, Effect of process parameters and tool geometry on fabrication of Ni particles reinforced 5083 Al composite by friction stir processing, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, No. 2, pp. 3203-3211, 2015.
- [18] A. Dolatkah, P. Golbabeai, M. K. Besharati Givi, F. Molaiekiya, Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing, *Materials and Design*, Vol. 37, No. 8, pp. 458-464, 2012.
- [19] M. Ashjari, A. Mostafapour Asl, S. Rouhi, Experimental investigation on the effect of process environment on the mechanical properties of AA5083/ Al_2O_3 nano composite fabricated via friction stir processing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 645, No. 1, pp. 40-46, 2015.
- [20] I. Dinaharan, R. Nelson, S. J. Vijay, E. T. Akinlabi, Microstructure and wear characterization of aluminum matrix composites reinforced with industrial waste fly ash particulates synthesized by friction stir processing, *Materials Characterization*, Vol. 118, No. 1, pp. 149-158, 2017.
- [21] F. Khodabakhshi, A. Simchi, A. H. Kokabi, M. Sadeghahmadi, A. P. Gerlich, Reactive friction stir processing of AA 5052- TiO_2 nanocomposite: process microstructure mechanical characteristics, *Materials Science and Technology*, Vol. 31, No. 4, pp. 426-436, 2015.
- [22] S. C. Tjong, Novel nanoparticle reinforced metal matrix composites with enhanced mechanical properties, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8, No. 1, pp. 639-652, 2007.
- [23] A. Mostafapour, S. T. Khandani, Role of hybrid ratio in microstructural, mechanical and sliding wear properties of the Al5083/Graphitep/ Al_2O_3 p a surface hybrid nanocomposite fabricated via friction stir processing method, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 559, No. 1, pp. 549-557, 2013.
- [24] A. Heidarpour, S. Ahmadifard, Sh. Kazemi, Fabrication and characterization of Al5083/ Al_2O_3 surface nanocomposite via friction stir processing, *Advanced Materials and Processing*, Vol. 5, No. 2, pp. 11-24, 2017.
- [25] L. Raju, Suvarna, A. Kumar, Influence of Al_2O_3 particles on the



(الف) (a)



(ب) (b)

Fig. 17 SEM images of worn surface (a) No 10 (b) 4 pass

شکل 17 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش الف- شماره 10، ب- 4 پاس

4- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی اثر اضافه کردن نانو ذرات زیرکونیا در محل اتصال آلومینیم 5083 و همچنین اثر تعداد پاس بر ریزساختار، خواص مکانیکی و سایشی پرداخته شد. مطابق با بررسی ریزساختاری مشاهده گردید که با اضافه کردن نانو ذرات زیرکونیا و افزایش تعداد پاس موجب اصلاح ساختار و ریزدانه‌گی محسوسی در ناحیه اغتشاشی شده است. علاوه بر این نتایج آزمون سختی، کشش و سایش نشان داد که اضافه کردن نانوذرات زیرکونیا و افزایش تعداد پاس خواص بهبود پیدا کرده و بهترین نتیجه مربوط به نمونه 4 پاسه بود. به طوری که میزان سختی و کشش در نمونه 4 پاسه به ترتیب حدود 26% و 24% نسبت به نمونه بدون پودر افزایش داشته است، همچنین با افزایش بار اعمالی در آزمون سایش مشاهده شد که میزان کنده شدن ماده از سطح نمونه‌ها بیشتر می‌شود. بررسی سطح سایش نشان داد که مکانیزم غالب در نمونه بدون پودر از نوع چسبان بوده، ولی در نمونه 4 پاسه به علت افزایش سختی مکانیزم از چسبان به خراشان تغییر پیدا کرد.

5- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از سرپرستان و مسئولین آزمایشگاه‌های متالوگرافی، ماشین ابزار، خواص مکانیکی و SEM دانشگاه بوعلی سینا همدان تشکر نمایند.

6- مراجع

- [1] S. Ahmadifard, N. Shahin, Sh. Kazemi, A. Heidarpour, A. Shirazi, Fabrication of A5083/SiC surface composite by friction stir processing and its characterization, *Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp.

- [33] R. Kapoor, K. Kandasamy, R. S. Mishra, J. A. Baumann, G. Grant, Effect of friction stir processing on the tensile and fatigue behavior of a cast A206 alloy, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 561, No. 1, pp. 159–166, 2013.
- [34] S. Suresha, B. K. Sridhara, Wear characteristics of hybrid aluminium matrix composites reinforced with graphite and silicon carbide particulates, *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 11, pp. 1652-1659, 2010.
- [35] A. Devaraju, B. Kumar, Kotiveerachari, Influence of rotational speed and reinforcements on wear and mechanical properties of aluminum hybrid composites via friction stir processing, *Materials and Design*, Vol. 45, No. 1, pp. 576-585, 2013.
- [36] Y. Morisada, T. Nagaoka, M. Fukusumi, MWCNTs/AZ31 surface composites fabricated by friction stir processing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 419, No. 1-2, pp. 344-348, 2006.
- [37] S. Ahmadifard, M. Roknian, T. Tinati Seresht, Sh. Kazemi, Fabrication of hybrid nanocomposite Al2024/Gr/ZrO₂ via FSP and evaluation effect role of hybrid ratio in mechanical and wear properties, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 119-126, 2016. (in Persian فارسی)
- [38] L. Dinaharan, S. Saravanakumar, K. Kalaiselvan, S. Gopalakrishnan, Microstructure and sliding wear characterization of Cu/TiB₂ coppermatrix composites fabricated via friction stir processing, *Asian Ceramic Societies*, Vol. 5, No. 3, pp. 295-303, 2017.
- [39] M. Azadi, M. Shamanian, M. A. Golozar, Hardness and wear behavior of Al7075/TiC/MoS₂ surface hybrid composite produced by friction stir processing, *Surface Science and Engineering*, Vol. 13, No. 31, pp. 41-51, 2017. (in Persian فارسی)
- microstructure and mechanical properties of copper surface composites fabricated by friction stir processing, *Defence Technology*, Vol. 15, No. 2, pp. 1-9, 2014.
- [26] S. Ahmadifard, Sh. Kazemi, A. Heidarpoor, Fabrication of Al5083/TiO₂ surface composite by friction stir process and investigating its microstructural, mechanical and wear properties, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 55-62, 2015. (in Persian فارسی)
- [27] R. Bauri, D. Yadav, G. Suhas, Effect of friction stir processing (FSP) on microstructure and properties of Al-TiC in situ composite, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 13-14, pp. 4732-4739, 2011.
- [28] D. Davidson, B. Shiloh, S. Neelakrishnan, Influence of friction stir welding parameters on tensile properties of AA8011 Aluminium alloy plate, *Computation and Theoretical Nanoscience*, Vol. 15, No. 1, pp. 93–98, 2018.
- [29] C. Meng, H. C. Cui, G. Lu, X. H. Tang, Evolution behavior of TiB₂ particles during laser welding on aluminum metal matrix composites reinforced with particles, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, No. 6, pp. 1543-1548, 2013.
- [30] M. M. El-Sayed, A. Y. Shash, M. Abd Rabou, Influence of the welding speeds and changing the tool pin profile on the Friction Stir welding AA5083-O joins, *Welding and Joining*, Vol. 35, No. 3, pp. 44- 51, 2017.
- [31] D. Khayyamin, A. Mostafapour, R. Keshmiri, The effect of process parameters on microstructural characteristics of AZ91/SiO₂ composite fabricated by FSP, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 559, No. 9, pp. 217–221, 2013.
- [32] S. A. Alidokht, A. Abdollah-zadeh, S. Soleymani, H. Assadi, Microstructure and tribological performance of an aluminium alloy based hybrid composite produced by friction stir processing, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 5, pp. 2727-2733, 2011.