ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

بررسی اثر تعداد پاس و نانوذرات ZrO₂ بر ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار سایش در جوش کاری اصطکا کی اغتشاشی Al-5083

سعدد احمدىفرد1، اكبر حددريور2، شهاب كاظمى3*

1- دانش أموخته كارشناسى ارشد، مهندسي مواد، دانشگاه بوعلى سينا، همدان

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

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

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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
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 بی عیب و بیشترین استحکام کششی را داشت به عنوان نمونه مطلوب انتخاب شود تا با اضافه	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 23 دی 1396 پذیرش: 14 یهمن 1396 ارائه در سایت: 10 اسفند 1396
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 تقویت کننده یکنواخت تر شده و اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی به شدت کاهش پیدا کرده است. علت این امر به حضور ذرات تقویت کننده مربوط	<i>کلید واژگان:</i> جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی نانو ذرات تداد باد.
میشود که با ایجاد ففل کنندگی مرزدانهها کمک به جوانهزنی دانههای تبلورمجدد یافته و تأثیر بر شکسته شدن دانههای اولیه میکردد. بیشینه سختی و استحکام کششی مربوط به نمونه چهار پاس بود که به ترتیب HV 111 و 328.3 MPa به 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 ای تاریخی نتاج آن مصارف نشان داد که بالانام و بادها می ناده است. برای ارزیابی مقاومت به سایش نمونهها، از آزمون رفت و برگشتی	عند پی خواص مکانیکی ریزساختار

The effects of Pass number and Nano-Size ZrO₂ 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	ABSTRACT
Original Research Paper Received 13 January 2018 Accepted 03 February 2018 Available Online 01 March 2018	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
Keywords: Friction Stir Welding Nano Particle Pass Number Mechanical Properties Microstructure	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 کاری^۲ در کشور انگلستان ابداع گشت. این فرآیند در دهههای اخیر پیشرفتهای بسیار خوبی را داشته و به

the Al-5083, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 03, pp. 219-227, 2018 (in Persian)

دلیل بازدهی انرژی بالا و تطبیق پذیری مناسب با محیط به فناوری سبز

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

² The Welding Institute (TWI)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



¹ Friction Stir Welding (FSW)

معروف است [3]. در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با توجه به این که فلز هر گز به دمای ذوبش نمی رسد، به همین دلیل یک جوش با کیفیت بالا تولید می کند 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 می شود به دلیل انجماد سریع، ساختارهای غیرتعادلی پس از اتصال به وجود می آید. در واقع به دلیل تنش های باقی مانده، ساختار به ترک خوردن حساس می شود؛ بنابراین برای اصلاح ساختار باید عملیات حرارتی روی قطعات صورت بگیرد. در جوش کاری حالت جامد، ساختار غیرتعادلی تشکیل نمی شود [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 می کند. خروج این گازهای حل شده از بالک جامد قطعه بسیار مشکل و تقریباً غیرممکن است. گاز هیدروژن بدترین حالت را ایجاد می کند، زیرا به صورت یک ذره پروتون که تحرک آن بسیار بالاست در مذاب حل می شود. هیدروژن باعث ایجاد ترک سرد یا ترک تأخیری می گردد. در جوش کاری حالت جامد به دلیل عدم وجود مذاب این مشکل نیز دیده نمی شود [9,8].

5- 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 می رد [10].

در سالهای اخیر به منظور بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی و همچنین برطرف کردن عیوب در منطقه جوش حاصل از جوشکاری 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 جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیم 2024 پرداختند و گزارش دادند که با انجام جوشکاری 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 تقویت کننده 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 تقویت کننده مقاومت به خوردگی نسبت به نمونه بدون ذرات تقویت کننده افزایش پیدا کرده است، همچنین بهرامی و همکاران [15] موفق شدند در محل اتصال دو ورق آلومینیم 7075 نرات کاربید سیلیسیم اضافه کنند و به بررسی خواص ضربه آن بپردازند و گزارش دادند که با اضافه شدن ذرات تقویت کننده میزان جذب انرژی اضافه گزارش دادند که با اضافه شدن ذرات تقویت کننده با زمینه بوده است. ژائو شده که علت آن پیوند خوب بین ذرات تقویت کننده با زمینه بوده است. ژائو و همکاران [16] ابتدا نانو کامپوزیت آلیاژ Mc-U-Mg با نانو لوله کربنی را تولید کردند و سپس ورق ها را با فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به یکدیگر جوش دادند و گزارش دادند با انجام جوش کاری، نانولوله های کربنی

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

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 زیر کونیا در محل اتصال آلومینیم 5083 در تعداد پاسهای مختلف با نمونه بدون تقویت کننده از نظر ریزساختار، خواص مکانیکی و سایشی مقایسه شود.

2- مواد و روشها

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

از پودر زیرکونیا (ZrO₂) به عنوان ماده تقویت کننده 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 عبوری^۱ 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 تقویت کننده 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 گرمکار (H13) که دارای سختی آن در حدود HRC 48 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 تعقر شانه 5 درجه در نظر گرفته شد. در شکل 4 شماتیکی از ابزار مورد استفاده شده آورده شده است.



شکل 1 شماتیکی از فرآیند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

¹ Transmission Electron Microscope (TEM)

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 | ز 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

متغیرهای مورد بررسی برای به دست آوردن نمونه مطلوب در جدول 2 آورده شده است. ابتدا این نمونهها در یک پاس و بدون ذرات تقویت کننده جوش کاری شدند تا نمونهای که از نظر ظاهری بی عیب 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 میلی متر 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 تقویت کننده به بررسی اثر تعداد پاس های 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 متالو گرافی و طبق استاندارد ASTM E3-01 [17] نمونههای متالو گرافی تا سنباده شماره 3000 سنبادهزنی و توسط دستگاه پولیش شد تا سطح نمونهها کاملاً صاف و صیقلی شود، سپس توسط میکروسکوپ نوری مدل آنیون^۱، نیروی اتمی^۲ مدل DDE 25-95-80 و الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل تی اسکن^۲ تحت بررسی قرار گرفتهاند. برای آشکارسازی ساختار نمونهها از محلول که حاوی 82 میلی لیتر آب، 15.5 میلی لیتر نیتریک اسید، 0.5 میلی لیتر فلورید اسید و 3 گرم اکسید کروم استفاده گردید. به دلیل این که 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 بوهلر 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 میلی متر بر دقیقه و نرخ کرنش 0.003 در دمای محیط برای کلیه نمونههای جوش کاری شده توسط سنتام[‡] 150 انجام گردید. برای بررسی دقیق تر 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 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 SHRC بود. به منظور ثبت و اندازهگیری کاهش وزن نمونهها از یک ترازو با حساسیت 1.0± استفاده گردید و همچنین نیروی اصطکاک به طور اتوماتیک توسط دستگاه ثبت و در نهایت سطح ساییده شده توسط میکروسکوب الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

3- نتايج و بحث

1-3- ريزساختار

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

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 قفل شدگی می شود [25]، همچنین از ذرات موجود آنالیز عنصری گرفته و مشخص شد ذرات زیرکونیا هستند.

3-2- خواص مكانيكى

شکل 10 نمودار سختی نمونههای جوشکاری 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 H1 IH به دست آمد که حدود 26 درصد بیشتر از نمونه بدون پودر است. نکته قابل توجه آن است که میزان سختی در قسمت پیشرو جیشتر از قسمت پسرو است. در سمت پیشرو جهت

¹ Stir Zone (SZ)
 ² Thermo Mechanical Affected Zone (TMAZ)

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



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 همان طور که مشخص است باعث تشکیل نواحی از جمله ناحیه اغتشاشی^۱ و ناحیه ترمومکانیکی^۲ 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 این که تمرکز حرارت در ناحیه اغتشاشی بود ناحیه متأثر از حرارت⁷ 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 تبلورمجدد 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 پیازی[†] در ناحیه اغتشاشی به وجود میآید. این امر نشاندهنده جریان داشتن ماده است [24-23]. 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 تقویت کننده 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.

³ Heat Affect Zone (HAZ)

⁴ Onion Rings

سعید احمدیفرد و همکا*ر*ان





(ب) (b)

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 زیر کونیا 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

 شكل 8 تصوير AFM از ناحيه اغتشاشى، الف- فلز پايه جوش كارى شده، ب- 1، ج- 2.

 2. د- 4 ياس

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 می یابد 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







Fig. 11 Tensile test results for non-particle reinforcing specimen شکل 11 نتایج آزمون کشش نمونههای بدون ذرات تقویتکننده







¹ Hall-Pitch

- استحكام بخشى اوروان؛
- نابه جایی های به وجوده 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 سايش

در شکل a-13 نمودار کاهش وزن برحسب مسافت لغزش نمونههای جوش کاری شده در بار اعمالی 5 نیوتن را نشان می دهد. همان طور که مشخص است بیشترین کاهش وزن مربوط به نمونه بدون پودر و کمترین هم مربوط به نمونه 4 پاسه است، همچنین شکل b-13 نمودار کاهش وزن را در بار اعمالی 10 نیوتن را نشان می دهد و مشخص است که با افزایش بار اعمالی میزان کاهش وزن همه نمونه ها 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 می شود [23].

مطابق با رابطه (1) افزایش سختی نمونه می تواند منجر به کاهش در حجم سایش یافته β و یا افزایش در مقاومت سایشی ماده شود [33]. (1) $\beta = C \times \frac{R \times V}{H}$ (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 می شود. طبق این رابطه با افزایش بار اعمالی میزان کاهش حجم نیز بیشتر می شود 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]. $W_{\nu} = K L F / H$ (2) در این رابطه W_{ν} 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. همان طور که مشخص است با اضافه شدن ذرات تقویت کننده و افزایش تعداد پاس میزان ضریب اصطکاک کمتر شده و این نشان دهنده افزایش مقاومت در برابر کنده شدن ماده از سطح است [36].

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

جدول 3 خواص مکانیکی نمونههای جوش کاری شده ذرات زیر کونیا Table 3 Mechanical properties of FSWed specimen with ZrO₂

Fusice 5 Meentanean properties of 15 Weat speenheit with 2002					
سختی (HV)	ازدياد طول (%)	استحكام تسليم (MPa)	استحکام نھایی (MPa)	نمونه	
88	31.4	189.6	263.9	FSW BM	
91	29.2	197.3	278.4	1 Pass	
99	24	204.1	291.8	2 Pass	
111	20.2	228.9	328.3	4 Pass	

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.54.5

همان طور 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 تقویت کننده 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 عمیق تری نسبت به نمونه 4 پاسه ایجاد شده است. این موارد همراه با وجود آثار تغییر شکل پلاستیک و لایه لایه شدن بر سطح نمونه بدون پودر مذکور دلالت بر سایش با مکانیزم چسبان^۱ است. در نمونه 4 پاسه شیارهای ایجاد شده ناشی از سایش کم عمق تر بوده که این به دلیل حضور ذرات تقویت کننده 2rO₂ و در نتیجه باعث افزایش سختی نمونه شده و مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک بیشتر می شود و طبق تصویر میکروسکوپ الکترونی مکانیزم غالب از نوع خراشان^۲ است [3-37].





(ب) (b)

Fig. 13 Variation of weight less with the sliding distance for FSWed specimen with ZrO₂ a- 5N, b- 10N شکل 13 تغییرات کاهش وزن برحسب مسافت لفزش برای نمونههای جوش کاری شده ذرات زیرکونیا الف- 5 نیوتن، ب- 10 نیوتن



² Abrasive



Fig. 14 Change in wear rate vs microhardness with ZrO₂



Fig. 15 Change in friction coefficient FSWed specimens with ZrO₂ شکل 15 تغییرات ضریب اصطکاک نمونههای جوش کاریشده ذرات زیر کونیا





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 (فارسى 31-36, 2016. (in Persian)

- [2] S. A. Hossieni, K. Ranjbar, R. Dehmolaei, 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%Al₂O₃p 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 weldingthermal 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 Jamaliyan, Investigation on the effects of using nano size Al₂O₃ 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 TiO₂ 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 + Al₂O₃ 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. Dolatkhah, P. Golbabaei, 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/Al₂O₃ 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 –TiO₂ 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/Al₂O₃p 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/Al₂O₃ 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 Al₂O₃ particles on the







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 ریزدانگی محسوسی در ناحیه اغتشاشی شده است. علاوهبر این نتایج آزمون سختی، کشش و سایش نشان داد که اضافه کردن نانوذرات زیرکونیا و افزایش بود. به طوری که میزان سختی و کشش در نمونه 4 پاسه به ترتیب حدود (موز ایش 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 سطح نمونه ها 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 چسان به خراشان تغییر پیدا کرد.

5- تقدير و تشكر

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

6- مراجع

 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.

DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.3.54.5

- [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
- [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 (مارسي))
- [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
- [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 فارسي)

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. Heidarpour, 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 فارسى)
- [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, Influnce of friction stir welding parameters on tenslie 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 chancing 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
- [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.