



تولید کامپوزیت سطحی آلومینیم 5083 با ذرات اکسید تیتانیوم و بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی و سایش آن

سعید احمدی فرد¹، شهاب کاظمی²، اکبر حیدرپور^{3*}

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

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

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

* همدان، صندوق پستی 65155-579، heidarpour@hut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 مرداد 1394

پذیرش: 08 مهر 1394

ارائه در سایت: 20 آبان 1394

کلید واژگان:

فرآوری اصطکاکی اغتشاشی

اکسید تیتانیوم

خواص مکانیکی

سایش

تعداد پاس

چکیده

تولید نانو کامپوزیت یک چالشی بزرگ می‌باشد، چون توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده با اندازه نانو در زمینه فلزی با روش‌های متالورژی پودر و فرایندهای حالت مایع دشوار می‌باشد. فرآوری اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند حالت جامد می‌باشد که برای تغییر و اصلاح ریزساختار، بهبود خواص مکانیکی و تولید کامپوزیت سطحی استفاده می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به تولید کامپوزیت سطحی زمینه فلزی بر روی سطح ورق آلومینیم 5083 با ذرات تقویت کننده اکسید تیتانیوم در دو نوع 5 میکرون و 80 نانو استفاده گردید. کامپوزیت تولید شده با فرآوری اصطکاکی اغتشاشی توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. اثر اندازه پودر و تعداد پاس فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار، میکروسختی، استحکام کششی و خواص سایشی کامپوزیت تولید شده، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که تولید لایه نانو کامپوزیتی با ذرات اکسید تیتانیوم دارای ساختاری با دانه‌های ریزتر، سختی، استحکام و ازدیاد طول بالاتری نسبت به کامپوزیت سطحی با ذرات میکرون اکسید تیتانیوم دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد پاس، توزیع ذرات بهتر، سختی، استحکام و ازدیاد طول بالاتر به دست می‌آید. بهترین نتیجه سختی، رفتار کششی و مقاومت به سایش در مقایسه با فلز پایه، مربوط به نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش در هر پاس که با ذرات نانو تقویت شده است، می‌باشد.

Fabrication of Al5083/TiO₂ surface composite by friction stir process and investigating its microstructural, mechanical and wear properties

Saeed Ahmadifard¹, Shahab Kazemi¹, Akbar Heidarpour^{2*}

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. 65155-579 Hamedan, Iran, heidarpour@hut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 August 2015
Accepted 30 September 2015
Available Online 11 November 2015

Keywords:

Friction stir processing
Dioxide titanium
Mechanical properties
Wear
Number of pass

ABSTRACT

The fabrication of nano - composites is quite challenging because uniform dispersion of nano - sized reinforcements in metallic substrate is difficult to achieve using powder metallurgy or liquid processing methods. Friction stir processing (FSP) is a new solid-state process used to modify the refinement of microstructure, improvement of material's mechanical properties and production of surface layer composites. In this investigation via friction stir processing, metal matrix composite surface (MMCs) was fabricated on surface of 5083 aluminum sheets by means of 5 μm and 80 nm TiO₂ particles. The friction processed surface composite layer was analyzed through optical and scanning electron microscopical studies. Effects of reinforcing particle size and FSP pass number on the microstructure, microhardness, on tensile and wear properties of the developed surfaces were investigated. Results show that the nanocomposite layer created by TiO₂ particles exhibits a microstructure with smaller grains and higher hardness, strength, and elongation compared to the composite TiO₂ layer produced by particles. Increasing FSP pass numbers results in improved distribution of particles, finer grains, and higher hardness, strength, elongation, and wear resistance. The surface composite layer resulted in four passes with change in rotation direction with nano particle reinforcement exhibiting better properties in hardness, tensile behavior and wear resistance compared to the behavior of the base metal.

1- مقدمه

کاربرد انواع متفاوت و متنوع کامپوزیت‌های زمینه فلزی باعث شده است این مواد همچنان در حیطه مواد پیشرفته باقی بماند. به عنوان مثال می‌توان به ظهور انواع نانو کامپوزیت‌های زمینه فلزی در بسیاری از کاربردهای سازه‌ای و

کامپوزیت‌های زمینه فلزی یکی از مهم‌ترین انواع مواد پیشرفته هستند که قدمتی بیش از 50 سال دارند. با این وجود پیشرفت‌های تکنولوژی در تولید و

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

روی آلومینیم صورت گرفت و از کاربید سیلیسیم به عنوان ماده تقویت کننده استفاده کردند و نشان دادند که ذرات به خوبی در زمینه توزیع شده است. همچنین شهرکی و همکاران [10] توانستن کامپوزیت سطحی زمینه آلومینیمی 5083 با ذرات اکسید زیرکونیا که از سرعت های دورانی و پیشروی متفاوت استفاده شده بود، تولید کنند و گزارش دادند که میزان سختی و استحکام کششی نسبت به فلز پایه بهبود یافته است. مصطفی پور و همکاران [11] موفق به تولید کامپوزیت سطحی سه جزیی آلومینیم 5083 با ذرات آلومینا و گرافیت شدند و نشان دادند که خواص مکانیکی از جمله مقاومت به سایش بهبود یافته است. همچنین حسینی و همکاران [12] موفق به تولید کامپوزیت سطحی آلومینیم 5083 سه جزیی با ذرات تقویت کننده نانو تیوب کربنی و اکسید سریم شدند و به این نتیجه رسیدند که میزان مقاومت به خوردگی نسبت به فلز پایه بهبود یافته است. یوواراج³ و همکاران [13] به بررسی تأثیر ذرات میکرون و نانو کاربید بور پرداختند و گزارش دادند که میزان تأثیر ذرات نانو نسبت به میکرون بر ریزساختار و خواص مکانیکی بیشتر است، بطوری که میزان سختی در نمونه دارای ذرات میکرون حدود 23 درصد افزایش یافته است ولی در نمونه دارای ذرات نانو حدود 41 درصد نسبت به فلز پایه افزایش یافته است.

آلومینیم 5083 کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از جمله اتومبیل سازی، دریایی و صنایع حمل مواد دارد که علت آن می تواند دارا بودن مقاومت به خوردگی عالی و جوش پذیری مناسب اشاره کرد. در این مطالعه به بررسی تاثیر ذرات میکرون و نانو اکسید تیتانیوم روی ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت سطحی تولید شده با فرآیند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در تعداد پاس های مختلف پرداخته شده است.

2- مواد و روش ها

فلز پایه مورد استفاده در این پژوهش، آلومینیم کار شده 5083 است که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 آورده شده است.

ورق توسط گیوتین به ابعاد 5x5x150 میلی متر بریده شد. برای ورود ذرات، شیارهای به عرض 1 میلی متر و عمق 2 میلی متر ایجاد گردید. ذرات میکرون و نانو اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این پژوهش، به ترتیب دارای اندازه میانگین 5 میکرون و 80 نانومتر و با خلوص 99/99% است. در شکل 2 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری از ذرات آورده شده است.

ابزار مورد استفاده از جنس فولاد گرمکار تهیه گردید. در این فرایند، از دو ابزار استفاده می شود که یکی فاقد پین بوده و دیگری، دارای پین است که کار اصلی را انجام می دهد. ابعاد ابزار شامل قطر پین 6 میلی متر، ارتفاع پین 3 میاومتر و قطر شانه نیز 20 میلی متر در نظر گرفته شد و به منظور تسهیل جریان مواد تعقر شانه 6 درجه در نظر گرفته شد و زاویه انحراف ابزار نسبت به سطح نمونه 3 درجه انتخاب گردید. شکل 3 تصویری از نحوه قرارگیری قطعه در قالب و ابزار مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد.

فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در سرعت دورانی 710 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 20 میلی متر بر دقیقه با تعداد پاس یک، چهار بدون تغییر

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلومینیم 5083

Table 1 Chemical composition of as-received aluminum 5083								
Al	Ti	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	ماده
تراز	0.026	0.02	4.27	0.61	0.04	0.3	0.1	درصد وزنی

3- Yuvaraj

غیر سازه ای اشاره کرد. از کاربردهای این کامپوزیت ها می توان به صنایع هوافضا، حمل و نقل و غیره اشاره کرد. در کامپوزیت های زمینه فلزی تأثیر ذرات ریزتر نسبت به ذرات درشت بر ریزساختار و خواص مکانیکی بسیار بهتر و چشم گیرتر است بدین منظور می توان برای رسیدن به خواص مطلوب تر، از نانو ذرات استفاده کرد. یکی از مشکلات استفاده از نانو ذرات در فرایندهای حالت مایع مانند ریخته گری، توزیع غیر یکنواخت در زمینه می باشد. [1-3]. در سال های اخیر، فرایند حالت جامد فرآوری اصطکاکی اغتشاشی¹ توسط میشرا [4] ابداع شد که وظیفه اولیه آن تولید کامپوزیت های سطحی است. فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی روشی نسبتاً جدید می باشد که بر مبنای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی² پایه گذاری شده است [5]. در این فرایند همانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، برای انجام عملیات از یک ابزار چرخشی که به داخل قطعه کار فرو می رود استفاده می شود. گرمای مورد نیاز برای انجام فرایند، ناشی از اصطکاکی که بین سطح ابزار و سطح قطعه کار و همچنین تغییر شکل پلاستیک شدیدی که ایجاد می شود بدست می آید. در این فرایند هرگز قطعه کار ذوب نمی شود. در اثر همین گرمای تولیدی، فلز پایه خمیری شده و با حرکت رو به جلو ابزار، فرایند انجام می پذیرد. برای تولید کامپوزیت سطحی توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، باید ذرات تقویت کننده به نحوی در مسیر ابزار چرخشی قرار بگیرد بدین منظور بر روی سطح قطعه کار، شیار یا سوراخی ایجاد می گردد و با ذرات پر می گردد [5-7]. شکل 1 تصویر نمادین از فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی از نوع شیاری را نشان می دهد.

ابزار در این فرایند دارای دو وظیفه می باشد: الف) گرم کردن قطعه به وسیله اصطکاک و ب) حرکت دادن مواد به منظور اتصال [8].

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با بهره مندی از ویژگی های منحصر به فرد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می تواند به منظور توسعه فرآیندهای جدید مورد استفاده قرار گیرد [9]. خواص ناشی از این فرایند عبارتند از:

- ✓ مقدار کم حرارت تولیدی
- ✓ جریان پلاستیک شدید از مواد
- ✓ اندازه دانه های خیلی ریز در منطقه اغتشاشی
- ✓ اصلاح عیوب ترک و تخلخل های ریخته گری
- ✓ اختلاط مکانیکی از لایه های سطحی و زیر سطحی [4].

اولین بار فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی توسط میشرا و همکاران بر

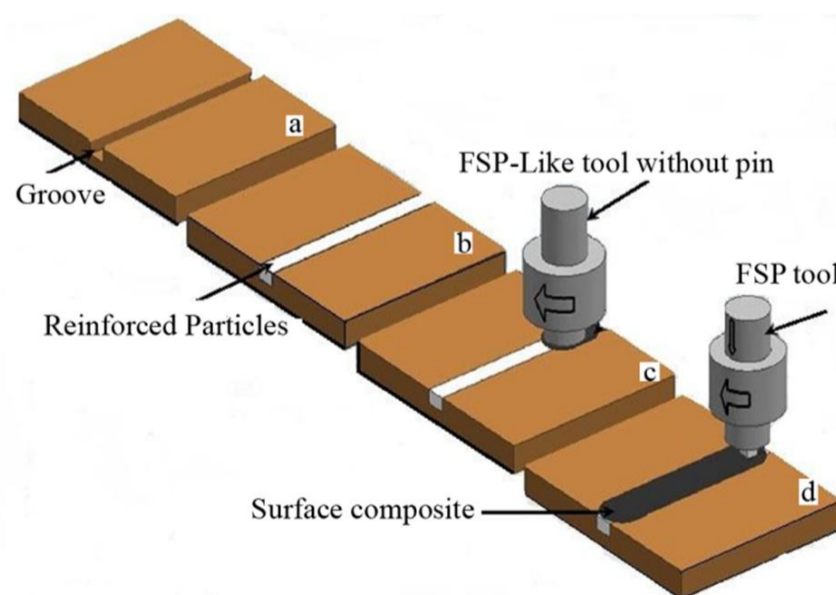


Fig. 1 Schematic illustration of FSP technique

شکل 1 تصویر نمادین از تکنیک فرآوری اصطکاکی اغتشاشی

- 1- Friction stir processing (FSP)
- 2- friction stir welding (FSW)

شکل 4 نحوه برش و ابعاد نمونه آزمون کشش که طبق استاندارد ASTM E8-011 تهیه شده است را نشان می‌دهد. آزمون کشش در دمای محیط و با سرعت 1 میلی‌متر بر دقیقه و نرخ کرنش 0.003 بر ثانیه با دستگاه سنتام³ 150 انجام گرفت.

آزمون سختی‌سنجی نیز، از سطح مقطع نمونه‌های فرآوری شده تحت استاندارد ASTM E384 به روش میکروسختی با دستگاه بوهرلر⁴ و با نیروی 200 گرم و به مدت زمان 15 ثانیه انجام شد. شکل 5 محل انجام آزمون میکروسختی نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد.

پس از آماده سازی اولیه نمونه‌ها شامل سمباده‌زنی تا 1000، آزمون سایش توسط دستگاه پین بروی دیسک⁵ مدل آرکا صنعت آروین⁶ طبق استاندارد ASTM G99-04 ارزیابی شد. این آزمون در دمای محیط صورت گرفت و نمونه‌های آزمون به قطر 15 میلی‌متر از ناحیه فرآوری شده تهیه گردید. جنس دیسک از فولاد AISI D3 با سختی 58 HRC و زبری سطح 2 میکرون بود، استفاده شد. سرعت آزمون 1 میلی‌متر در ثانیه و با نیروی 20 نیوتن و به مسافت 500 متر و با فاصله زمانی 100 متر در نظر گرفته شد. بعد از هر فاصله زمانی، نمونه‌ها توسط الکل تمیز شده و کاهش وزن توسط ترازو با حساسیت $\pm 0.1\text{mg}$ اندازه‌گیری شد. نیروی اصطکاک بطور اتوماتیک همراه با مسافت لغزش توسط دستگاه ثبت و در نهایت سطح ساییده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار

از آنجا که فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، فرایند حالت جامد بوده برای

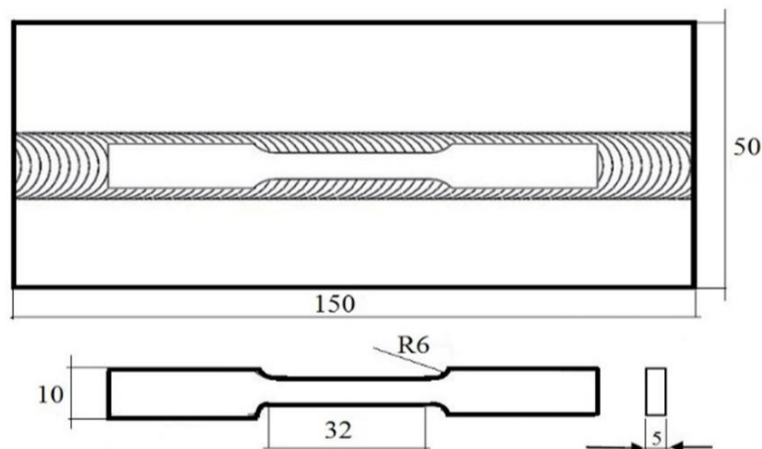


Fig. 4 Dimensions of tensile test specimen

شکل 4 نحوه برش و ابعاد نمونه آزمون کشش

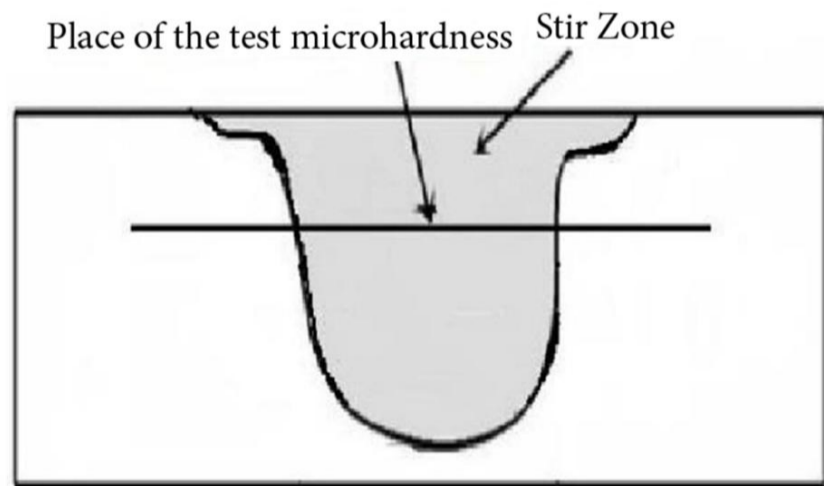
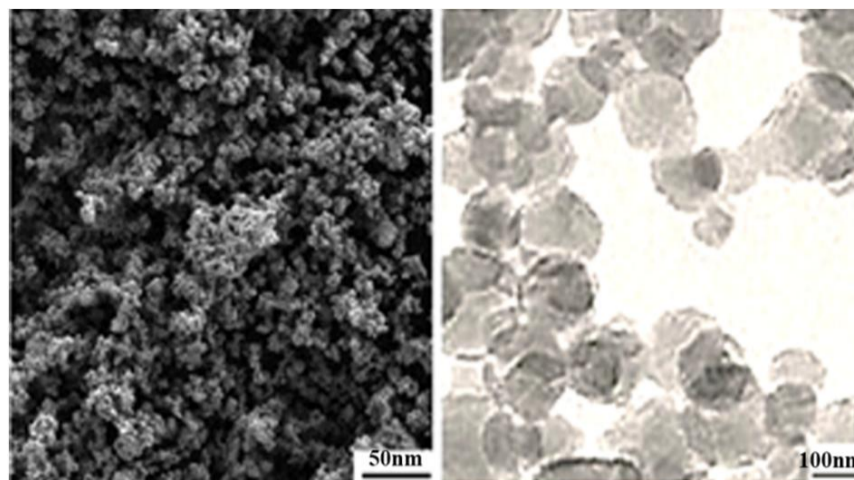


Fig. 5 Position of the microhardness test

شکل 5 محل انجام آزمون میکروسختی



(الف) (ب) (ب) (الف)

Fig. 2 (a) TEM micrographs of as-received TiO_2 nano particles (b) SEM micrographs of as-received TiO_2 micro particles

شکل 2 (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از ذرات نانو اکسید تیتانیوم (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات میکرون اکسید تیتانیوم

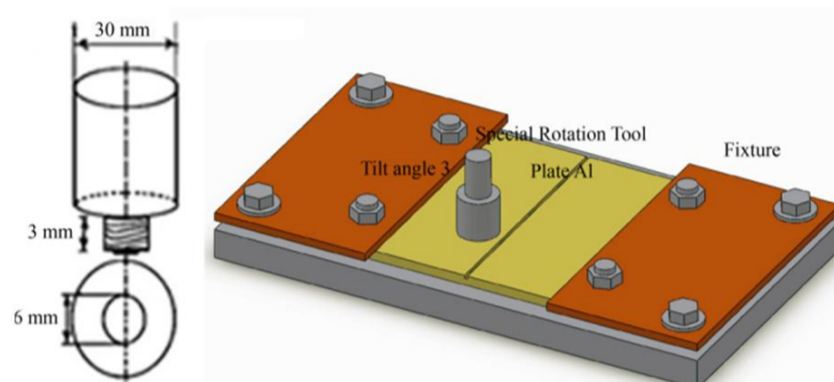


Fig. 3 Fixture for sheet and dimensions of tool

شکل 3 نحوه قرارگیری ورق در قالب و ابزار مورد استفاده

جهت چرخش و چهار با چرخش در هر تغییر جهت در هر پاس انجام گرفت و با فلز پایه مقایسه شود. در جدول 2 شماره نمونه‌ها آورده شده است.

برای بررسی ریزساختار، از میکروسکوپ نوری (مدل آنیون¹) و الکترونی روبشی (مدل ژئول²) استفاده شد که قادر به انجام آنالیز عنصری از نمونه‌ها است. نمونه از سطح مقطع فرآوری شده تهیه گردید و قبل از بررسی ریزساختاری، نمونه‌ها تا سنباده نمره 2000 سنباده‌زنی و توسط دستگاه، پولیش شد. برای آشکارسازی و حکاکی کردن نمونه‌ها از محلول با ترکیب شیمیایی داده شده در جدول 3، استفاده شد.

جدول 2 کد نمونه‌ها همراه با نحوه عملیات فرآوری شده

Table 2 Samples code with FSP route

شماره نمونه	عملیات بهره‌وری
1	فلز پایه
2	تک پاسه بدون پودر
3	تک پاسه با ذرات میکرون
4	تک پاسه با ذرات نانو
5	چهار پاسه با ذرات میکرون با تغییر جهت چرخش در هر پاس
6	چهار پاسه با ذرات نانو بدون تغییر جهت چرخش در هر پاس
7	چهار پاسه با ذرات نانو با تغییر جهت چرخش در هر پاس

جدول 3 ترکیب شیمیایی محلول حکاکی

Table 3 shows the chemical composition of etching solution

H2O3	HNO3	HF	Cr2O3
84 ml	15.5 ml	0.5 ml	3 gr

1- Union
2- Jeol

3- Santam
4- Buehler
5- Pin on disk
6- Arca Sanat Arvin

زمینه یکنواخت تر شده، که در نتیجه رشد دانه‌ها محدود و باعث ایجاد ساختاری با دانه‌بندی ریزتر می‌شود. همچنین با افزایش تعداد پاس، میزان فشار مکانیکی وارده به ناحیه اغتشاشی زیاد شده و در نتیجه، احتمال خرد شدن ذرات تقویت کننده وجود دارد و این خود در تولید ساختار ریز دانه بسیار مفید خواهد بود. همانطور که در شکل 7 (الف) مشخص است اندازه ذرات تقویت کننده اکسید تیتانیم کمتر از 5 میکرون است که این خود نشان دهنده صحت مطلب بالاست. همچنین شکل 7 (ج) بزرگ شده شکل 6 (ب) می‌باشد تا ذرات را در زمینه بهتر نشان دهد. از نقاط سفید رنگ نمونه 7 آنالیز عنصری² گرفته شد تا نشان دهد ذرات سفید رنگ در تصاویر SEM، اکسید تیتانیم است.

لازم به ذکر است که سه عامل باعث کنترل اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی می‌شود [15]:

1. با توجه به تبلور مجدد پویا³، تغییر شکل پلاستیک متوالی و تنش دینامیکی شدید در ناحیه اغتشاشی، باعث هسته‌گذاری و افزایش چگالی نابجایی⁴ در این ناحیه می‌شود در نتیجه مانع رشد دانه در این ناحیه می‌شود.
2. اثر قفل‌کنندگی⁵، مانع از رشد و حرکت دانه می‌شود که البته این حالت در حضور ذرات تقویت کننده بوقوع می‌پیوندد و در نمونه‌های بدون پودر چنین حالتی رخ نمی‌دهد.
3. تأثیر عملیات آنیل⁶، که باعث رشد دانه می‌شود. بطوری که استحکام کششی و سختی کاهش و انعطاف‌پذیری بهبود می‌یابد.

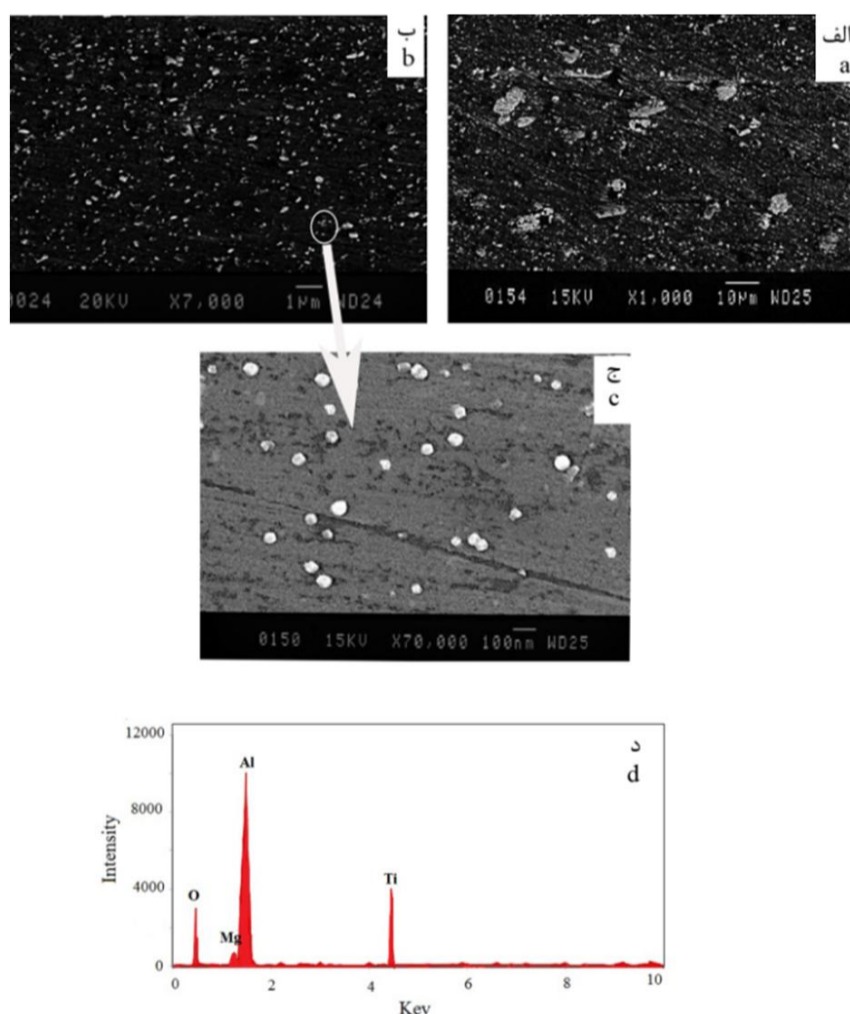


Fig. 7 SEM micrograph of the SZ (a) 5 specimen (b) 7 specimen (c) Sample 7 with higher magnification (d) EDS composition analysis
شکل 7 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه اغتشاشی (الف) نمونه 5 (ب) نمونه 7 (ج) نمونه 7 با بزرگنمایی بالاتر (د) نتیجه آنالیز عنصری

2- Energy dispersive spectroscopy (EDS)
3- Dynamic recrystallization
4- Dislocations
5- pinning
6- anneal

عیوبی همچون حفره پینی¹، ایجاد تونل، ترک‌ها و غیره مستعد است. ایجاد جریان نامناسبی از ماده پلاستیک، انجماد و ترکیب نامناسب فلز در ناحیه فرآوری شده و همچنین عدم پخش مناسب پودر فلزی جهت ایجاد کامپوزیت مناسب می‌تواند موجب ایجاد این عیوب شوند. مشاهده ماکرو و میکرو ساختار روش فراگیری برای بررسی هرگونه عیب عمده در کامپوزیت ایجاد شده به روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی است [14]. در این مقاله ساختارها توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی مورد بررسی قرار گرفت.

شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. در ناحیه اغتشاش یافته دانه‌ها نسبت به فلز پایه ریزتر شده است که علت آن حرارت ورودی و تغییر شکل پلاستیک شدیدی است که در این ناحیه بوقوع پیوسته است. میانگین اندازه دانه در فلز پایه 45 میکرون بود که در نمونه بدون پودر میزان به 30 میکرون رسید. میانگین اندازه دانه در جدول 4 آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه 6 و 7 دارای کمترین اندازه دانه‌ها می‌باشند.

در شکل 7 تصویر میکروسکوپ الکترونی از ناحیه اغتشاشی نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش تعداد پاس، توزیع ذرات در

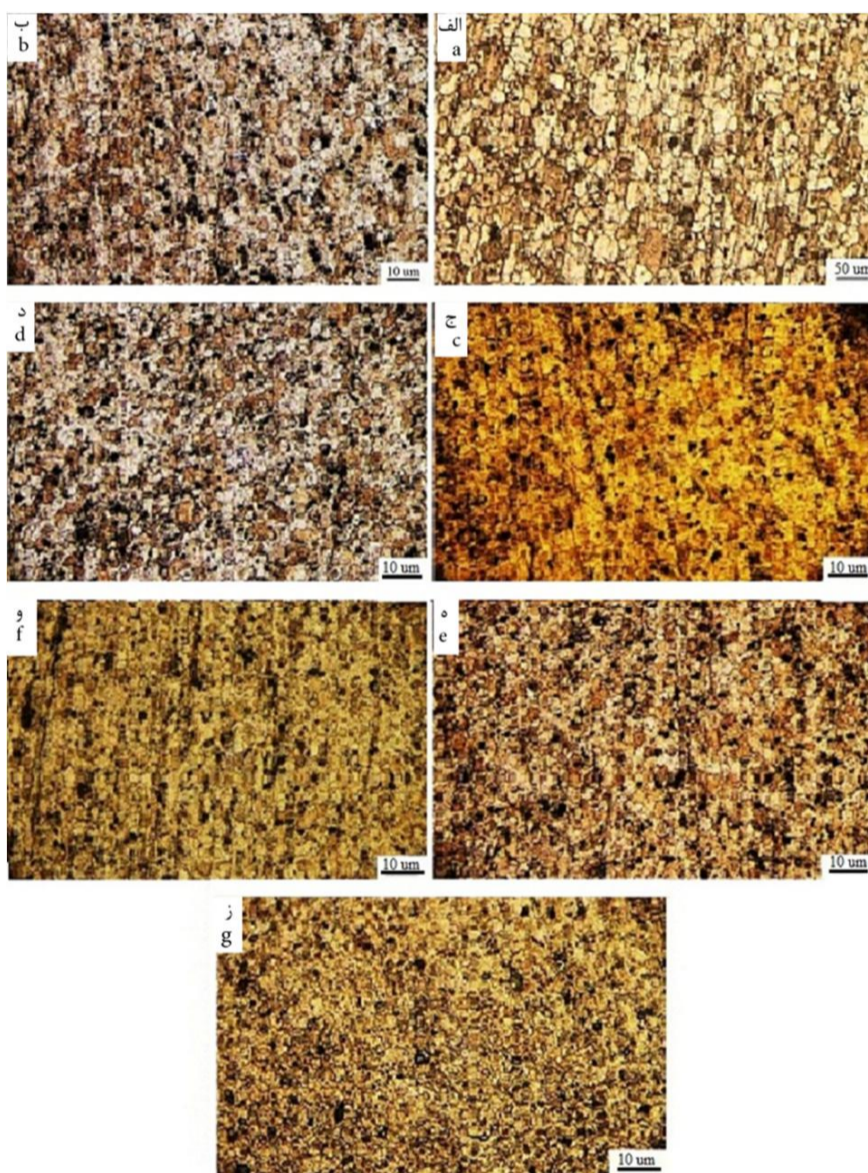


Fig. 6 Optical micrographs of transverse cross-sectional of the FSP zone specimens (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5, (f) 6, (g) 7

شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع ناحیه اغتشاشی نمونه‌های فرآوری شده (الف) 1، (ب) 2، (ج) 3، (د) 4، (ه) 5، (و) 6، (ز) 7

جدول 4 میانگین اندازه دانه‌ها

Table 4 Average grain size of different samples

نمونه	1	2	3	4	5	6	7
اندازه دانه (μm)	45	30	14.2	12.5	10.2	9.3	8.25

1- Pin hole

اغتشاشی میزان سختی افزایش یابد.

همچنین طبق رابطه هال-پچ³ با کاهش اندازه دانه میزان سختی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر سختی با اندازه دانه رابطه عکس دارد.

$$H_v = H_0 + \frac{K}{\sqrt{D}} \quad (2)$$

در این رابطه، H_0 تنش اصطکاکی، D قطر دانه و K عدد ثابت می‌باشد که بستگی به جنس ماده دارد.

اما در نمونه بدون پودر میزان سختی بطور محسوسی افزایش پیدا نکرده است که علت افزایش این مقدار سختی هم، مربوط به کاهش اندازه دانه در این ناحیه است. بهترین نتیجه مربوط به نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش در هر پاس که با ذرات نانو تقویت شده است بطوری که میزان سختی فلز پایه از 80 Hv به 133 Hv رسید. علت یکسان نبودن سختی در ناحیه اغتشاشی نمونه‌های فرآوری شده، متفاوت بودن الگویی جریان که موجب شده میزان نرخ کرنش و دمای ورودی متفاوت باشد.

آزمون کشش برای بدست آوردن استحکام تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل‌های 9 و 10 نتایج آزمون کشش برای فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر ذرات نانو نسبت به ذرات میکرون بیشتر است و همچنین با افزایش تعداد پاس میزان استحکام تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول افزایش پیدا کرده است. به علت آنکه در اثر فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی دانه‌بندی ریزتر می‌شود، این باعث می‌شود که رشد ترک کنترل شود و با سرعت کمتری پیشروی کند. بهترین نتیجه بدست آمده در آزمون کشش، مربوط به نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش در هر پاس که با ذرات نانو تقویت شده است. بطوری که میزان استحکام تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول نسبت به فلز پایه به ترتیب 55، 58 مگاپاسکال و 6 درصد افزایش پیدا کرده است. با تعویض جهت دوران ابزار، الگوی جریان مواد تغییر یافته و به توزیع یکنواخت‌تر پودر کمک می‌کند. در نتیجه این باعث ریزدانه‌گی ساختار می‌شود که باعث بهبود خواص مکانیکی و نیز افزایش انعطاف پذیری می‌شود.

مکانیزم‌های متعددی در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی نقش دارند. اولین مکانیزم، مکانیزم ارووان است [20, 21]، بدین گونه که ذرات تقویت کننده مانع از حرکت نابجایی‌ها می‌شوند.

مکانیزم دوم اختلاف زیاد ضریب انبساط حرارتی زمینه آلومینیمی و ذرات تقویت کننده است [21]، که منجر به افزایش تعداد و همچنین گیر

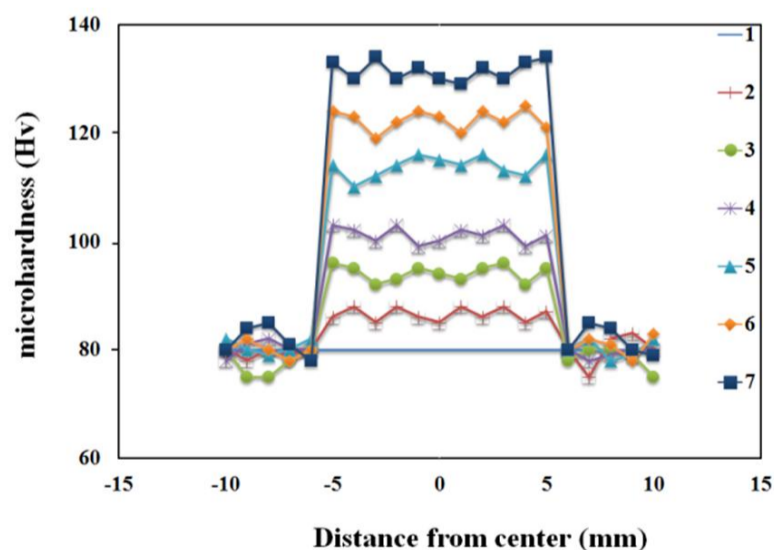


Fig. 8 Hardness values of BM and FSP specimens

شکل 8 سختی گرفته شده از فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده

3- Hall-Petch

با توجه به دلایل فوق، دو مورد اول تأثیر بسزایی در کنترل رشد دانه دارد. بطور کلی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات، اندازه ذرات تقویت کننده و همچنین حجم این ذرات از عوامل عمده تأثیرگذار بر ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل هستند. با فرض آنکه ذرات تقویت کننده بصورت ذرات کاملاً جدا از هم در زمینه فلز توزیع شوند، با استفاده از پارامتر زنر¹ می‌توان مقدار تئوری اندازه دانه (d_z) لایه کامپوزیتی را با استفاده از رابطه (1) محاسبه کرد [16].

$$d_z = \frac{4r}{3vf} \quad (1)$$

در این رابطه r شعاع ذرات تقویت کننده و V_f کسر حجمی ذرات تقویت کننده به فاز زمینه است. با توجه به رابطه با کاهش اندازه ذرات تقویت کننده یا افزایش کسر حجمی ذرات اندازه دانه در لایه کامپوزیتی کاهش خواهد یافت. بنابراین ذرات نانو، ریزساختاری با اندازه دانه ریزتری نسبت به ذرات میکرو ایجاد خواهند کرد.

افزایش تعداد پاس باعث کاهش اندازه و ریز شدن دانه در ناحیه اغتشاشی می‌شود که دلیل آن عبارتند از [17]:

- ✓ به دلیل تبلور مجدد جدیدی که در اثر تغییر شکل پلاستیکی، که در هر پاس رخ می‌دهد.
- ✓ با افزایش تعداد پاس، توزیع ذرات در زمینه یکنواخت‌تر و احتمال چسبیده شدن ذرات کاهش و مکان فراوانی برای جوانه‌زنی بوجود می‌آید و نیز این ذرات، مانعی در برابر رشد دانه هستند.

3-2- تأثیر اثر تعداد پاس

انجام فرآوری اصطکاکی اغتشاشی در چندین پاس، احتمال چسبیده شدن ذرات را کاهش و باعث توزیع یکنواخت‌تر ذرات تقویت کننده در زمینه می‌گردد که این به نوبه خود باعث افزایش خواص مکانیکی و مقاومت به سایش می‌شود. که این موضوع نیز در این پژوهش به خوبی به وقوع پیوست به طوری که با افزایش تعداد پاس‌ها، ذرات بهتر و یکنواخت‌تر در زمینه توزیع شده و نتایج مطلوبی در خواص مکانیکی و مقاومت به سایش بدست آمد. کارهای فراوانی در مورد بررسی تأثیر تعداد پاس بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی انجام شده است. مثلاً محمود و همکاران [18] گزارش دادند که با انجام فرایند در سه پاس بر روی آلومینیم A390 تأثیر مطلوب‌تری نسبت به تک پاسه دارد و میزان سختی و مقاومت به سایش افزایش پیدا کرده است. شفیعی و همکاران [19]، گزارش دادند که با انجام فرایند در چند پاس، چسبیده شدن ذرات آلومینا در زمینه آلومینیم از بین رفته و ذرات به خوبی در زمینه توزیع شده است. در واقع می‌توان گفت که با توزیع یکنواخت ذرات در زمینه، سختی، استحکام، ازدیاد طول و مقاومت به سایش بهتر می‌شود که علت این می‌تواند مکانیزم ارووان² باشد که طبق این مکانیزم، با کاهش فاصله ذرات با یکدیگر دیگر نابجایی‌ها قادر به حرکت نبوده و به همین خاطر ترجیح می‌دهند ذرات را دور بزنند. در نتیجه برای تغییر شکل پلاستیک، باید تنش بیشتری اعمال شود.

3-3- خواص مکانیکی

نمودار میکروسختی نمونه‌های مختلف در شکل 8 آورده شده است. میانگین سختی بدست آمده از فلز پایه مورد استفاده در این پژوهش، 80 Hv بدست آمد. به دلیل اینکه اکسید تیتانیم دارای سختی بالاست، باعث شده در ناحیه

1- Zener
2- Orowan

نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش مسافت لغزش میزان کاهش وزن، افزایش یافته و میزان کاهش وزن فلز پایه نسبت به دیگر نمونه‌ها بیشتر است. شکل 12 نیز نمودار نرخ سایش را بر حسب مسافت لغزش نشان می‌دهد و در این نیز بیشترین نرخ سایش مربوط به فلز پایه است و با توجه به شکل‌ها بهترین نتیجه مربوط به نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش در هر پاس که با ذرات نانو اکسید تیتانیوم تقویت شده است. بطوری که میزان کاهش وزن و نرخ سایش این نمونه نسبت به فلز پایه به ترتیب 41 و 20 درصد کاهش نشان می‌دهد.

دلایل بهبود مقاومت به سایش نمونه‌های فرآوری شده عبارتند از: (1) وجود ذرات تقویت کننده در زمینه که باعث ریز شدن دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی می‌گردد و در نتیجه میزان سختی افزایش می‌یابد (2) با افزایش تعداد پاس نیز ذرات در زمینه بهتر توزیع می‌شود و باعث ریزتر شدن دانه بندی شده و مقاومت به سایش بهبود می‌یابد.

در شکل 13 تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب فاصله لغزش فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است ضریب اصطکاک نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش در هر پاس (تقویت شده با ذرات نانو) کمتر از 0.44 رسیده که علت کاهش ضریب اصطکاک و ساییدگی، سختی بالا نمونه است.

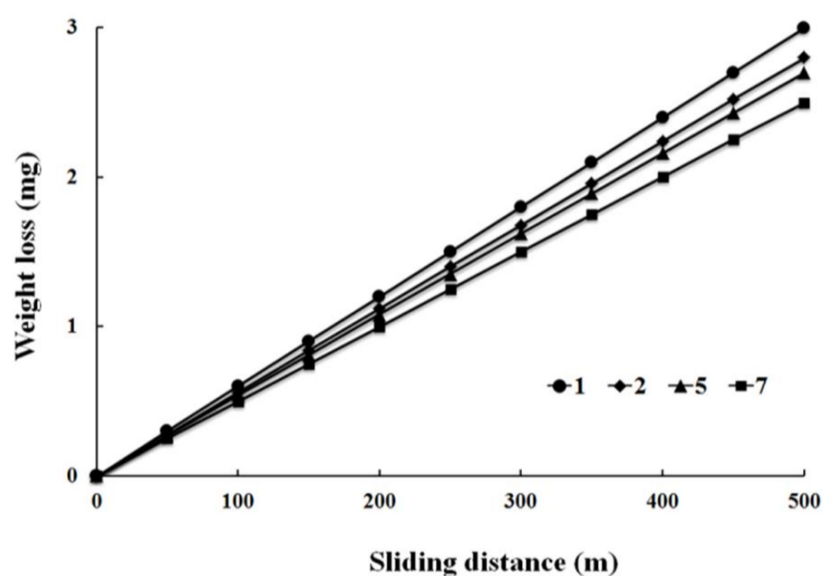


Fig. 11 Variation of weight loss with the sliding distance for base metal and specimens FSPed

شکل 11 تغییر کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش برای فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده

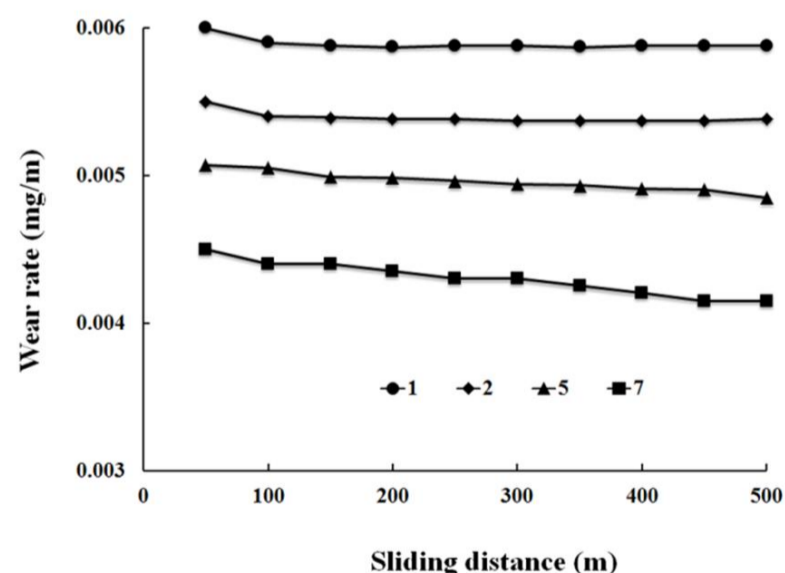


Fig. 12 Variations of wear rate with the sliding distance for base metal and specimens FSPed

شکل 12 تغییرپذیری نرخ سایش بر حسب فاصله لغزش برای فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده

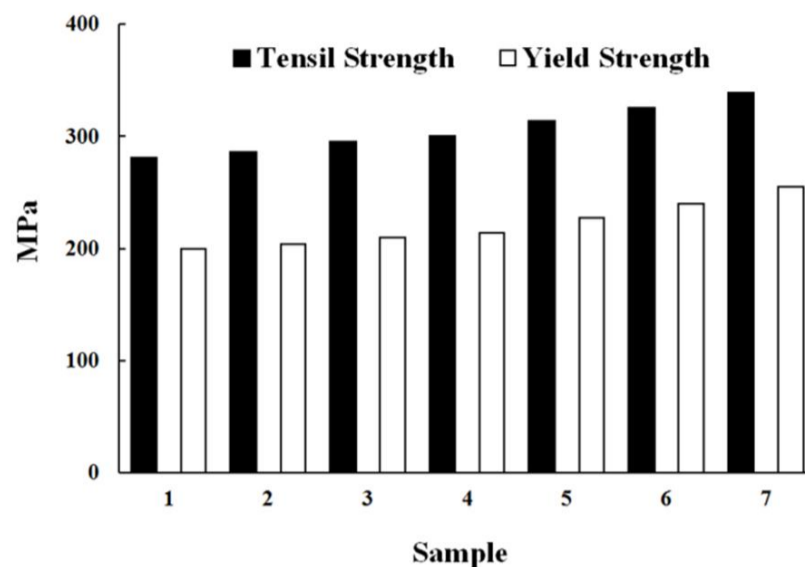


Fig. 9 Mechanical properties of BM and FSP samples

شکل 9 خواص مکانیکی فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده

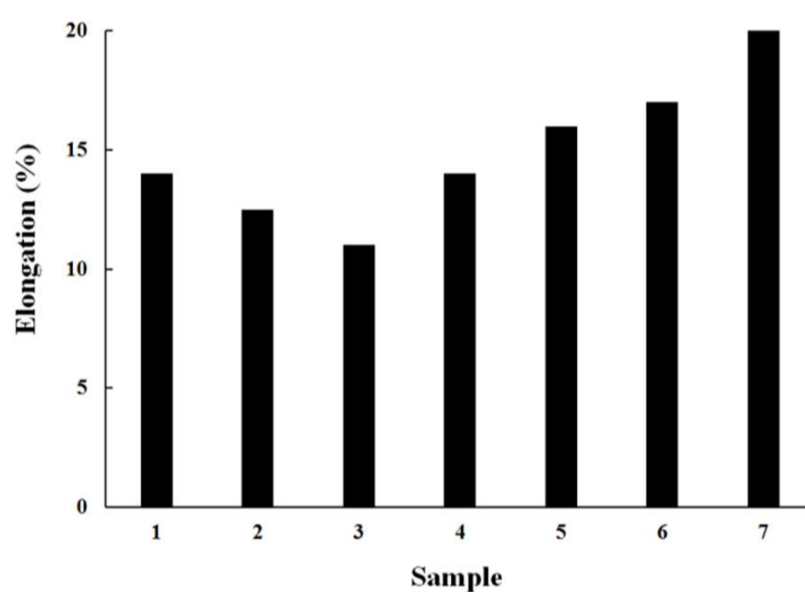


Fig. 10 Ductility of BM and FSP samples

شکل 10 ازدیاد طول فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده

کردن نابی‌هایی‌ها در فصل مشترک‌ها می‌شود که در نهایت منجر به کارسختی زمینه خواهد شد. مکانیزم سوم، مکانیزم تاخیر برشی¹ است، بدین صورت که بار (نیرو) توسط تنش برشی فصل مشترک از زمینه به ذرات تقویت کننده منتقل می‌شود البته به شرط آنکه در فصل مشترک فلز پایه و ذرات تقویت کننده پیوند خوبی برقرار شده باشد، همان‌گونه که اخیراً بردبوری² و همکاران برای کامپوزیت‌های آلومینیم تقویت شده با ذرات نانو تیوب کربنی گزارش داده‌اند [22]. لیو³ و همکاران نیز مکانیزم تاخیر برشی را در بهبود استحکام کامپوزیت‌های آلومینیم با ذرات نانو تیوب بسیار موثر دانستند [23]. به علاوه در آلیاژ آلومینیم 5083 تعداد بسیاری از ذرات بین فلزی از قبیل $Al_6(Mn,Fe)$ وجود دارند که در منطقه اغتشاش یافته قابل حل نیستند و در حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی خرد می‌شوند [24]. این ذرات نیز زمانی که به طور یکنواخت در زمینه توزیع شوند نقش موثری ایفا نموده و می‌توانند به عنوان یکی دیگر از مکانیزم‌های استحکام‌دهی به شمار آیند.

3-4- خواص سایشی

رفتار سایشی آلومینیم 5083 با نمونه‌های فرآوری شده بدون پودر و با پودر (با ذرات میکرون و نانو با تعداد پاس یک و چهار) به روش پین بر روی دیسک ارزیابی شد. شکل 11 نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش را

1- Shear lag
2- Bradbury
3- Liu

میزان عمق و شیار ایجاد شده توسط پین بر روی فلز پایه نشان دهنده نرم‌تر بودن آن نسبت به نمونه‌های فرآوری شده می‌باشد. نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش در هر پاس (تقویت شده با ذرات نانو) دارای کمترین عمق شیار نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد و این نشان دهنده مقاومت به سایش بیشتر، نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کامپوزیت سطحی روی آلیاژ آلومینیم 5083 با افزودن میکرو و نانوپودر اکسید تیتانیوم توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با موفقیت ایجاد گردید و نتایج زیر حاصل شد:

1. میانگین اندازه دانه‌ها از 45 میکرون برای آلیاژ پایه به 30 میکرون برای نمونه فرآوری شده بدون ذرات تقویت کننده کاهش یافت. در اثر حضور ذرات تقویت کننده میکرونی اندازه دانه‌ها به 15 میکرون و در اثر حضور نانو ذرات و افزایش تعداد پاس‌های فرایند اندازه دانه‌ها به 8.25 میکرون کاهش یافت. با افزایش تعداد پاس، توزیع ذرات در زمینه یکنواخت‌تر گردید.
2. عملیات فرآوری اصطکاکی اغتشاشی باعث افزایش ریزسختی آلیاژ پایه از 80 ویکرز به حداکثر 133 ویکرز در نمونه فرآوری شده با نانوذرات اکسید تیتانیوم در 4 پاس با تغییر جهت چرخش ابزار می‌رسد. بهبود استحکام کششی و استحکام تسلیم نیز به همین ترتیب بود.
3. بیشترین نرخ سایش مربوط به فلز پایه است و بهترین نتیجه آزمون سایش مربوط به نمونه چهار پاسه با تغییر جهت چرخش در هر پاس که با نانو ذرات اکسید تیتانیوم تقویت شده است. میزان کاهش وزن و نرخ سایش این نمونه نسبت به فلز پایه به ترتیب 41 و 20 درصد کاهش نشان می‌دهد.

5- مراجع

- [1] D. B. Miracle, Metal matrix composites, *Composite Science & Technology*, Vol. 65, pp. 2526-2540, 2005.
- [2] J. Guo, P. Gougeon, X. G. Chen, Study on laser welding of AA1100-16 vol.% B₄C metal-matrix composite, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No.5, pp. 2400-2408, 2012.
- [3] N. Chawla, K. K. Chawla, *Metal Matrix Composites*, pp. 11-16, New York, 2006.
- [4] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, I. Charit, Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 341, No.1-2, pp. 307-310, 2003.
- [5] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, S.X. McFadden, N. A. Mara, A. K. Mukherjee, High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy, *Scripta Materialia*, Vol. 42, No.2, pp. 163-168, 1999.
- [6] H. R. Akramifard, M. Shamanian, M. Sabbaghian, M. Esmailzadeh, Microstructure and mechanical properties of Cu/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing, *Materials and Design*, Vol. 54, No.1, pp. 838-844, 2014.
- [7] A. Alavinia, H. Omidvar, S.H. Nourbakhsh, Effect of overlapping percentage of passes and rapid cooling in FSP on microstructure and mechanical properties of AZ31, Vol. 13, No.15, pp. 126-135, 2014. (in Persian)
- [8] L. Commin, J. E. Masse, L. Barrallier, Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets Influence of processing parameters, *Acta Materialia*, Vol. 57, No. 2, pp. 326-334, 2009.
- [9] V. Balasubramanian, Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 480, No. 1-2, pp. 397-403, 2008.
- [10] S. Shahraki, S. Khorasani, R. Abdi Behnagh, Y. Fotouhi, H. Bisadi, Producing of AA5083/ZrO₂ Nanocomposite by Friction Stir Processing (FSP), *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 44, No.6, pp. 1546-1553, 2013.
- [11] 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.1, pp. 217-221, 2013.

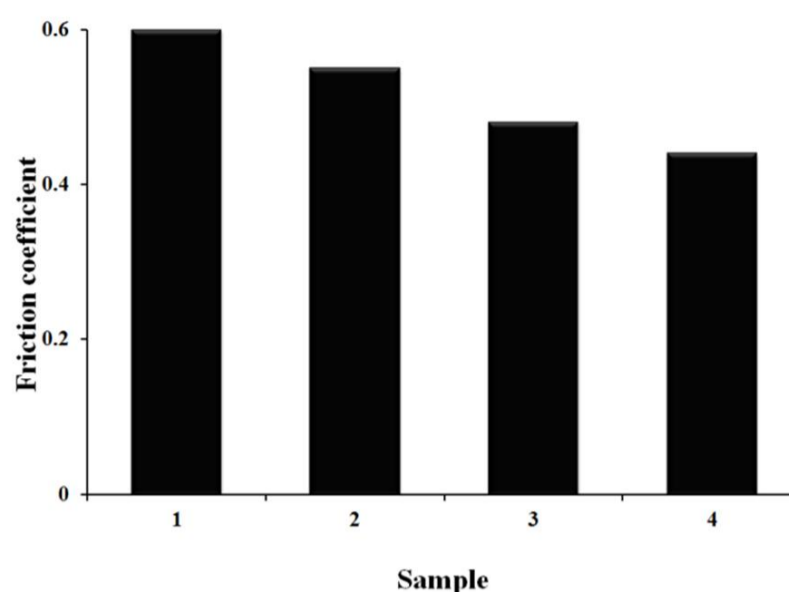


Fig. 13 Variations of friction coefficient with sliding distance for base metal and specimens FSPed

شکل 13 تغییرپذیری ضریب اصطکاک برحسب مسافت لغزش برای فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده

شکل 14 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح ساییده شده را نشان می‌دهد.

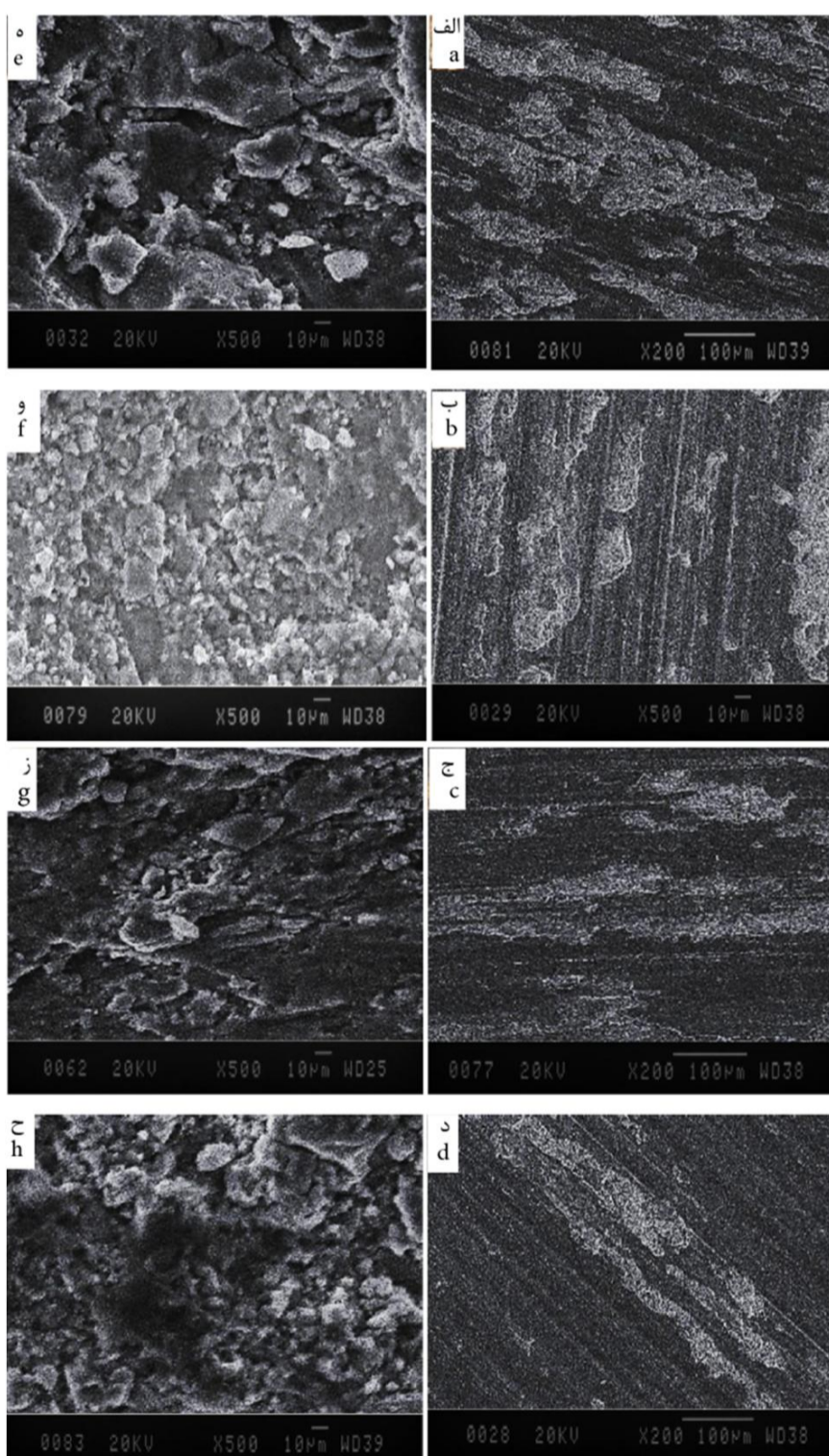


Fig. 14 SEM micrograph of the worn out track of (a) 1specimen (b) 2 (c) 5 (d) 7 and (e), (f), (g) and (h) are high magnification view of (a), (b) and (c)

شکل 14 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح ساییده شده (الف) نمونه 1، (ب) 2، (ج) 5، (د) 7، و (ه)، (و)، (ز) و (ح) بزرگنمایی بالاتر از (الف)، (ب) و (ج)

- Surface-Hybrid-MMCs Layer on Aluminum Plate by Friction Stir Processing and Its Wear Characteristics, *Materials Transactions*, Vol. 50, No. 7, pp. 1824-1831, 2009.
- [19] A. Shafiei-Zarghani, S.F. Kashani-Bozorg, and A.F. Zarei- Hanzaki, Microstructures and mechanical properties of Al/Al₂O₃ surface nano-composite layer produced by friction stirprocessing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 500, No. 1-2, pp. 84-91, 2009.
- [20] Z. Zhang, D. L. Chen, Contribution of Orowan strengthening effect in particulate reinforced metal matrix nanocomposites, *Materials Science and Engineering A*, Vol 483-484, No. 1, pp. 148-152, 2008.
- [21] R. George, K. T. Kashyap, R. Rahul, S. Yamdagni, Strengthening in carbon nanotube/aluminum (CNT/Al) composites, *Scripta Materialia*, Vol. 53, No. 10, pp. 1159-1163, 2005.
- [22] C. R. Bradbury, J. K. Gomon, L. Kollo, H. Kwon, M. Leparoux, Hardness of Multi Wall Carbon Nanotubes reinforced aluminum matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 585, No.1, pp. 362-367, 2014.
- [23] Q. Liu, L. Ke, F. Liu, C. Huang, L. Xing, Microstructure and mechanical property of multiwalled carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing, *Materials and Design*, Vol. 45, No.1, pp. 343-348, 2013.
- [24] S. R. Anvari, F. Karimzadeh, M. H. Enayati, Wear characteristics of Al-Cr-O surface nano-composite layer fabricated on Al6061 plate by friction stir processing, *Wear*, Vol. 304, No. 1-2, pp. 144-151, 2013.
- [12] S. A. Hossieni, K. Ranjbar, R. Dehmlaei, A. R. Amirani, Fabrication of Al5083 surface composites reinforced by CNTs and cerium oxide nano particles via friction stir processing, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 662, No. 1, pp. 725-733, 2014.
- [13] N. Yuvaraja, S. Aravindan, vipin, Fabrication of Al5083/B₄C surface composite by friction stir processing and its tribological characterization, *Journal of materials research and technology*, doi:10.1016/j.jmrt.2015.02.006, 2015, in Press.
- [14] K. Elangovan, V. Balasubramanian, M. Valliappan, Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, *The International Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, No. 3, pp. 258-259, 2007.
- [15] P. Asadi, G. Faraji, M. K. Besharati, Producing of AZ91/SiC composite by friction stir processing (FSP), *The International Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, No.1, pp. 247-254, 2010.
- [16] C. G. Rhodes, M. W. Mahoney, W. H. Bingel, R. A. Spurling, C. C. Bampton, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium, *Scripta Materialia*, Vol. 36, No.1, pp. 69-75, 1997.
- [17] A. Dolatkah, P. Golbabaie, 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 stirprocessing, *Materials and Design*, Vol. 37, No.1, pp. 458-464, 2012.
- [18] E. R. I. Mahmoud, M. Takahashi, T. Shibayanagi, K. Ikeuchi, Fabrication of