مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1395، دوره 16، شماره 6، ص‌ص 119-126

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تولید نانوکامپوزیت ترکیبی Al2024/Gr/ZrO_2 توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی و بررسی اثر نسبت ترکیبی بر خواص مکانیکی و سایشی

سعید احمدی فرد[1]، مسعود رکنیان[1]، طالب طینتی سرشت[2]، شهاب کاظمی[3*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه آزاد ساوه، ساوه
3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
* همدان، صندوق پستی 6517838695، shahab.kazemi@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 بهمن 1394
پذیرش: 04 اردیبهشت 1395
ارائه در سایت: 25 خرداد 1395

کلید واژگان:
فرآوری اصطکاکی اغتشاشی
نانوکامپوزیت ترکیبی
خواص مکانیکی
آلومینیم 2024

چکیده

نسبت ترکیبی هر یک از فازهای تقویت کننده در کامپوزیت ترکیبی می‌تواند تعیین کننده نسبت حجم کل تقویت کننده از حجم کل کامپوزیت باشد. نسبت ترکیبی، یک فاکتور مهم در کنترل حد مشارکت هر یک از فازهای تقویت کننده از کل خواص کامپوزیت ترکیبی است. بنابراین هدف از انجام این کار، تولید نانو کامپوزیت سطحی ترکیبی آلومینیم 2024 با ذرات زیرکونیا با میانگین اندازه ذرات 15 نانومتر و گرافیت با میانگین اندازه ذرات کمتر از 100 میکرون با نسبت ترکیبی متفاوت توسط فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی است. برای تولید نانو کامپوزیت از یک سرعت دورانی و سرعت پیشروی ثابت، به ترتیب 1000 دور بر دقیقه و 20 میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف 3 درجه استفاده شد. همچنین به منظور توزیع بهتر ذرات در زمینه، فرایند در 2 پاس انجام شد. سپس به بررسی اثر نسبت ترکیبی بر ریزساختار، خواص مکانیکی و سایشی نانو کامپوزیت پرداخته شد. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید؛ تصاویر نشان داد که ذرات به صورت یکنواخت در ناحیه اغتشاشی توزیع شده است. آزمون‌های سختی ویکرز و سایش به صورت پین بر روی دیسک لغزشی خشک به منظور بررسی نسبت ترکیبی، خواص مکانیکی و سایشی نانو کامپوزیت تولید شده، انجام و اندازه‌گیری شد.

Fabrication of hybrid nanocomposite Al2024/Gr/ZrO_2 via FSP and evaluation effect role of hybrid ratio in mechanical and wear properties

Saeed Ahmadifard[1], Masoud Roknian[1], Taleb Tinati Seresht[2], Shahab Kazemi[1*]

1- Department of Material Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran
2- Department of Material Engineering, Islamic Azad University, Saveh, Iran
* P.O.B. 6517838695 Hamedan, Iran, shahab.kazemi@basu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 February 2016
Accepted 23 April 2016
Available Online 14 June 2016

Keywords:
Friction stir processing
Hybrid nanocomposite
Mechanical properties
Al 2024

ABSTRACT

Hybrid ratio of each reinforcement phase in hybrid composite can be defined as proportion of its volume to total reinforcement volume of the composite. The hybrid ratio is an important factor which controls the participation extent of each reinforcement phase in overall properties of hybrid composites. Hence, in the present work, surface hybrid nano composites of Al2024, graphite average particle size of 100 µm and ZrO_2 average particle size of 15 nm with different hybrid ratios were fabricated by friction stir processing method. For fabrication of nano composite the tool rotation rate was set to be 1000 rpm, and its advancing speed was 20 mm/min and tilt angle of 3 degrees were chosen. All samples were subjected to 2 passes of FSP to obtain more homogeneous dispersion of the reinforcements. Subsequently, effect of hybrid ratio on microstructural, mechanical and tribological properties was investigated. Optical microscopy and scanning electron microscopy were utilized to perform microstructural observation on the samples and showed that reinforcements are well dispersed inside the Nugget Zone. Hardness Vickers value measurements and pin on disk dry sliding wear tests were carried out to investigate effect of hybrid ratio on mechanical and tribological properties of the nano composites.

1- مقدمه

آلومینیم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، چگالی کم و مقاومت عالی در برابر خوردگی و غیره به یکی از پرکاربردترین مواد مهندسی در صنایع هوافضا و صنایع خودرویی تبدیل شده است. اما خواص تریبولوژیکی[1] ضعیف مانند مقاومت به سایش پایین آلومینیم باعث محدودیت استفاده از این فلز در کاربردهای دیگر شده است. یکی از روش‌های فائق آمدن به این مشکل تولید کامپوزیت‌های پایه آلومینیمی به همراه تقویت کننده‌های سرامیکی همانند اکسید تیتانیم، کاربید سیلیسیم، آلومینا و غیره، و استفاده از آن‌ها به جای آلومینیم و آلیاژهای آن است. این نوع کامپوزیت‌ها دارای خواص مکانیکی همانند سختی و مقاومت به سایش بالاتر نسبت به آلومینیم هستند [1-3].

نانو کامپوزیت‌های پایه فلزی در طول دهه‌ی گذشته بسیار مورد توجه

[1] Tribological

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
S. Ahmadifard, M. Roknian, T. Tinati Seresht, Sh. Kazemi, Fabrication of hybrid nanocomposite Al2024/Gr/ZrO_2 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)

Archive of SID
www.SID.ir

بوده‌اند. دلیل، این توجه گستردگی انواع این کامپوزیت‌ها و خواص ویژه آن‌ها است. سادگی، اقتصادی بودن و انعطاف‌پذیری روش‌های تولید این کلاس از کامپوزیت‌ها، موجب استفاده گسترده آن‌ها در صنایع هوافضا، خودروسازی و غیره شده است [4].

کامپوزیت‌های ترکیبی یک گروه خاص از کامپوزیت‌ها هستند که بیش از یک تقویت کننده دارند. تقویت کننده‌ها با یکدیگر متفاوت هستند که این تفاوت می‌تواند در جنس، اندازه و شکل تقویت کننده‌ها باشد. کامپوزیت‌های ترکیبی در مقایسه با کامپوزیت‌های غیرترکیبی دارای خواص مکانیکی، تریبولوژیکی و حرارتی بهتری هستند [5].

در بین همه سیستم‌های تقویت کننده در کامپوزیت‌های زمینه فلزی ترکیبی، سیستمی که دارای یک روانکار جامد و یک فاز سرامیکی سخت باشد دارای استفاده بیشتریست که علت آن، بهبود خواص تریبولوژیکی است که این مشخصه ویژه، کمک بزرگی به صنعت اتومبیل‌سازی کرد. به عنوان مثال در سال 1990، شرکت هوندا[1] موفق به تولید لوله داخلی سیلندر از جنس کامپوزیت ترکیبی سافیل[2]/ فیبر گرافیتی/ آلومینیم شد [6]. این نوع کامپوزیت باعث شد که میزان ضریب اصطکاک در سطح ساییده شده کاهش پیدا کند که علت آن تشکیل یک فیلم روانکار بر سطح کامپوزیت بود که در نتیجه باعث کاهش گرمای اصطکاکی می‌شود. این ویژگی‌ها باعث کاهش مصرف انرژی و بهتر شدن کارآیی می‌شود [6].

یکی از روش‌های تولید نانو کامپوزیت‌های سطحی پایه فلزی، روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی است که اولین بار توسط میشرا[3] در سال 2005 ابداع شد [7]. روش کار بدین صورت است که یک شیار یا سوراخ با ابعاد مشخص بر روی قطعه کار ایجاد شده و به روش‌های مختلف ماده تقویت کننده وارد شیار یا سوراخ می‌شود. سپس ابزار که دارای شانه [4]و پین [5]مخصوص است، وارد قطعه کار شده و ضمن انجام حرکت چرخشی، روی شیار پر شده با تقویت کننده، حرکت می‌کند. به علت ایجاد حرارت و نرم شدن ماده و وجود جریان ماده حول پین، تقویت کننده وارد ساختار جنس پایه فلز شده و کامپوزیت شکل می‌گیرد [8]. در شکل 1 نمایی از نحوه انجام این فرایند آورده شده است.

استفاده از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی مزایای فراوانی نسبت به روش‌های سنتی تولید کامپوزیت دارد. مزایای استفاده از روش فرآوری اصطکاکی

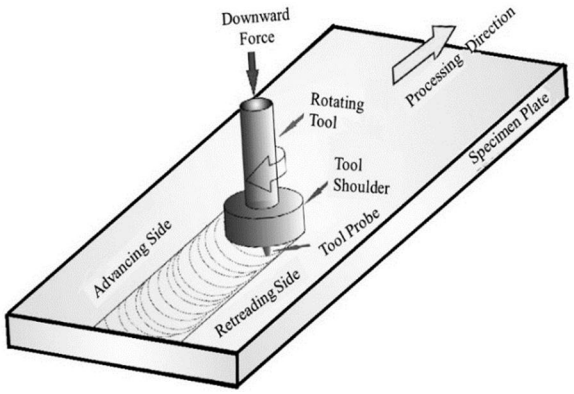


Fig. 1 Schematic illustration of FSP technique

شکل 1 نمایی از تصویر تکنیک فرآوری اصطکاکی اغتشاشی

اغتشاشی برای تولید کامپوزیت سطحی شامل موارد زیر است:

- در روش‌های دیگر برای تولید کامپوزیت، معمولا دمای فرایند بالاتر از دمای ذوب جنس پایه است. این مورد باعث می‌شود که جلوگیری از واکنش شیمیایی بین مذاب و فاز تقویت کننده بسیار سخت شود.
- با استفاده از این روش می‌توان کامپوزیت سطحی را در نواحی مورد نظر از قطعه کار ایجاد کرد. برای مثال می‌توان به جای تمام قطعه کار، کامپوزیت را در سطح قطعه کار ایجاد نمود.
- میزان نفوذ کامپوزیت سطحی در داخل قطعه کار در این روش چندین برابر روش‌های پوشش‌دهی است. این خود سبب ایجاد پوششی با مقاومت بالاتر در سطح قطعه کار می‌شود [10,9].

در واقع فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی باعث بهبود مقاومت به سایش [13-11]، افزایش سختی و کشش [17-14]، بهبود مقاومت به خزش و خستگی می‌شود [18]. کارهای متعددی در این زمینه انجام شده است. مثلا احمدی فرد و همکاران [19] به بررسی تأثیر ذرات میکرون و نانو اکسید تیتانیم پرداختند و گزارش دادند که تأثیر ذرات نانو بر ریزساختار، خواص مکانیکی و سایش بهتر از ذرات میکرون است. برموز و همکاران [20] موفق به تولید کامپوزیت سطحی مس با ذرات کاربید سیلیسیم شدند و گزارش دادند که با ایجاد سوراخ بر سطح بجای ایجاد شیار، میزان چسبیده شدن ذرات کمتر شده و در نتیجه خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. مصطفی‌پور و همکاران [6] موفق به تولید نانو کامپوزیت سطحی ترکیبی آلومینیم 5083 با نانو ذرات آلومینا و گرافیت شدند. علی‌دخت و همکاران [21] موفق به تولید کامپوزیت ترکیبی زمینه آلومینیمی با ذرات کاربید سیلیسیم و مولیبدنم دی سولفید (MoS_2) شدند و گزارش دادند که ترکیب این دو، باعث افزایش مقاومت به سایش کامپوزیت می‌شود بطوری که میزان نرخ سایش حدود 50 درصد نسبت به نمونه حاوی کاربید سیلیسیم کاهش داشته است.

هدف از انجام این پژوهش تولید کامپوزیت ترکیبی آلومینیم 2024 با نانوذرات زیرکونیا و گرافیت با روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی است. به علت این که تقویت کننده‌های زیرکونیا و گرافیت از جنبه‌های گوناگون با هم متفاوت هستند (خواص عمومی و اندازه)، بنابراین پیش‌بینی می‌شد که نسبت ترکیبی بر خواص مکانیکی کامپوزیت اثر قابل توجهی داشته باشد. به دلیل اثر نسبت ترکیبی بر بررسی خواص مکانیکی و سایشی نانو کامپوزیت مورد نظر بررسی شد.

2- مواد و روش‌ها

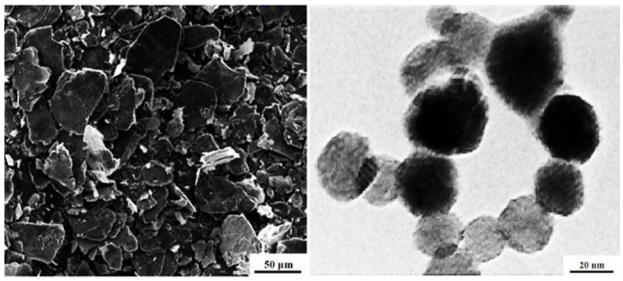
در این پژوهش از دو نوع ماده تقویت کننده که میانگین اندازه ذرات زیرکونیا 15 نانومتر و با درصد خلوص 99.99% و گرافیت نیز با میانگین اندازه ذرات کمتر از 100 میکرون و با درصد خلوص 99% استفاده گردید. شکل 2 تصاویری از میکروسکوپ الکترونی روبشی و تونلی این ذرات را نشان می‌دهد. همچنین در جدول 1 درصد مخلوط پودرها با یکدیگر آورده شده است.

فلز پایه مورد استفاده آلومییم 2024 با ضخامت 6 میلی‌متر و ترکیب شیمیایی آن در جدول 2 آورده شده است.

به منظور اعمال پودر در مسیر انجام فرایند، سوراخ‌هایی با قطر 2 ملیمتر و به عمق 2.5 میلی‌متر و با فاصله مرکز تا مرکز 3 میلی‌متر از یکدیگر ایجاد شد. در شکل 3 نحوه ایجاد سوراخ در سطح و همچنین ابعاد ورق و سوراخ‌ها آورده شده است.

[1] Honda
[2] Saffil
[3] Mishra
[4] Shoulder
[5] Pin

www.SID.ir
Archive of SID



(b) (ب) (a) (الف)

Fig. 2 (a) TEM micrograph of ZrO_2 particles (b) SEM micrographs of Gr

شکل 2 (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی تونلی از ذرات زیرکونیا (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از گرافیت

جدول 1 درصد مخلوط پودرها

Table 1 Percent of mixed powders

ZrO_2	Gr
100	0
75	25
50	50
25	75

جدول 2 ترکیب شیمیایی آلومینیم 2024

Table 2 Chemical composition of aluminum 2024

ماده	Cu	Si	Se	Mn	Mg	Al
درصد وزنی	5.35	0.091	0.29	0.62	1.55	تراز

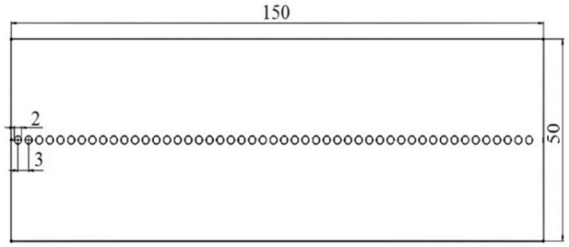


Fig. 3 Schematic of Al 2024 sheet with given dimensional and holes

شکل 3 نمایی از ابعاد ورق آلومینیم 2024 و ابعاد سوراخ

در شکل 4 نمایی از ورق سوراخ شده و نحوه قرارگیری آن در قید و بست مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است.

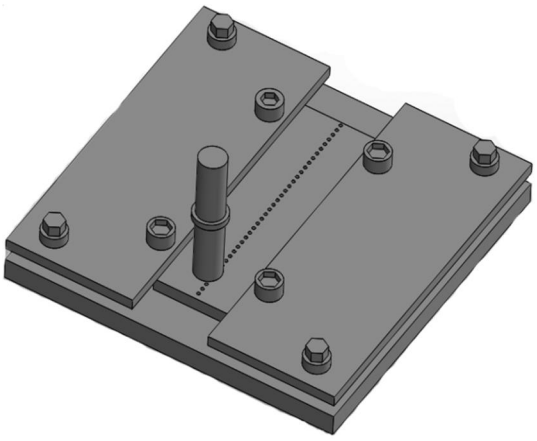


Fig. 4 Fixture for sheet to settle

شکل 4 تصویری از نحوه قرارگیری ورق در قید و بست

ابزار مورد استفاده از جنس فولاد گرم‌کار (H13) انتخاب شد. نکته قابل توجه این است در حالت ایجاد سوراخ از یک ابزار استفاده می‌شود. ابعاد ابزار شامل قطر شانه، قطر پین مربعی و ارتفاع پین به ترتیب 20 میلی‌متر، 6 میلی‌متر و 4 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل 5 نمایی از ابزار استفاده شده و همچنین ابعاد آن آورده شده است.

برای انجام فرایند از سرعت‌های دورانی 1000 دور بر دقیقه و پیشروی 20 میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف، نیز 3 درجه انتخاب شد و همچنین به منظور توزیع بهتر و یکنواخت‌تر ذرات در زمینه، فرایند در 2 پاس انجام شد. برای انجام فرآیند از یک دستگاه فرز با قدرت 2kW استفاده گردید.

قبل از بررسی ریزساختار، نمونه‌های در راستای عمود بر مسیر فرآوری شده بریده شد و سپس نمونه‌ها تا سنباده 2000 سنباده‌زنی و سپس برای صیقلی کردن سطح نمونه‌ها، سطح توسط دستگاه، پولیش شد و سپس برای متالوگرافی کردن نمونه‌ها از محلول کلر[1] که ترکیب آن در جدول 3 آورده شده است استفاده شد. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری (مدل آنیون[2]) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل ژئول[3]) که قادر به گرفتن آنالیز عنصری بود، استفاده گردید. برای بدست آوردن اندازه دانه‌ها در نمونه‌های فرآوری شده و فلز پایه از نرم‌افزار ایمیج‌جی[4] استفاده شد.

آزمون سختی‌سنجی از سطح و سطح مقطع نمونه فرآوری شده طبق استاندارد ASTM E384 به روش میکرو ویکرز با دستگاه بوهلر[5] در دمای محیط و بار اعمالی 200 گرم و به مدت زمان 20 ثانیه انجام شد.

آزمون سایش بصورت پین بر روی دیسک[6] و طبق استاندارد ASTM G99 در دمای محیط و به مسافت 1000 متر و بارهای اعمالی 1، 5 و 10 نیوتن و با سرعت 0.14 متر بر دقیقه و فاصله زمانی[7] 100 متر توسط دستگاه آرکا صنعت آروین[8] بصورت رفت و برگشتی انجام شد. قبل از انجام آزمون سایش نمونه‌ها تا سنباده 1000 سنباده‌زنی شد. ماده ساینده از جنس فولاد

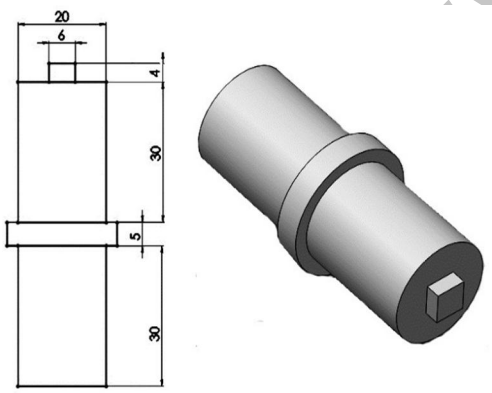


Fig. 5 Schematic of FSP tool with specific dimensional

شکل 5 نمایی از ابزار فرآوری اصطکاکی اغتشاشی همراه با ابعاد مشخص

جدول 3 ترکیب شیمیایی محلول حکاکی

Table 3 Chemical composition of etching solution

H_2O	HNO_3	HF	HCl
95 ml	2.5 ml	1 ml	1.5 ml

[1] Keller
[2] Union
[3] Jeol
[4] Image J
[5] Buehler
[6] Pin on dick
[7] Interval
[8] Arca Sanat Arvin

www.SID.ir
Archive of SID

AISI 52100 که میزان سختی آن 63HRC بود انتخاب گردید. 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

شکل 6 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه فرآوری شده که حاوی 100% زیرکونیا است را نشان می‌دهد. در این شکل نقاط مختلف از قبیل ناحیه اغتشاشی[1]، ناحیه ترمومکانیکی[2] و فلز پایه[3] مشخص شده است.

در ناحیه اغتشاشی، دانه‌های اصلی و مرزدانه‌های فرعی جای خود را به دانه‌های تبلورمجدد یافته ریز و هم‌محور می‌دهند. در میان دانه‌های تبلورمجدد یافته، چگالی نابجایی کمی دیده می‌شود. ولی در بعضی از تحقیقات عنوان شده است که ناحیه اغتشاشی، حاوی چگالی زیادی از مرزهای فرعی و نابجایی‌ها است [22]. در شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه اغتشاشی نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد.

همچنین در جدول 4 میانگین اندازه دانه‌های نمونه‌های فرآوری شده و فلز پایه آورده شده است. همانطور که مشخص است میانگین اندازه دانه‌ها در نمونه‌های فرآوری شده نسبت به فلز پایه کاهش یافته است که علت آن تغییر شکل پلاستیک شدید و تبلورمجدد دینامیکی و همچنین رخ دادند حالت قفل شدگی[4] است. قفل شدگی حالتی است که ذرات تقویت کننده مانند سدی مانع از رشد دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی شده و در نتیجه باعث ریزدانگی می‌شود.

در ناحیه ترمومکانیکی ماده تحت تغییر شکل پلاستیک قرار گرفته است (توسط ابزار) و شار حرارتی می‌تواند به مقدار زیادی خواص ماده را تحت تأثیر

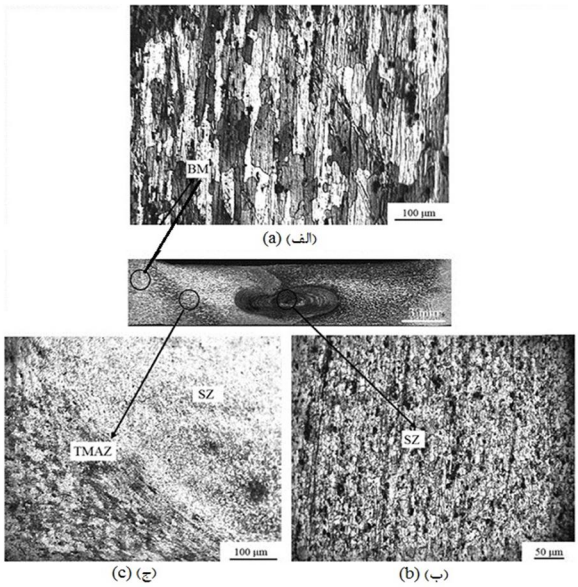


Fig. 6 Micrograph is showing cross section nanocomposite (a) BM (b) SZ (c) TMAZ

شکل 6 تصویر ماکرو از سطح مقطع نانو کامپوزیت (الف) فلز پایه (ب) ناحیه اغتشاشی (ج) ترمومکانیکی

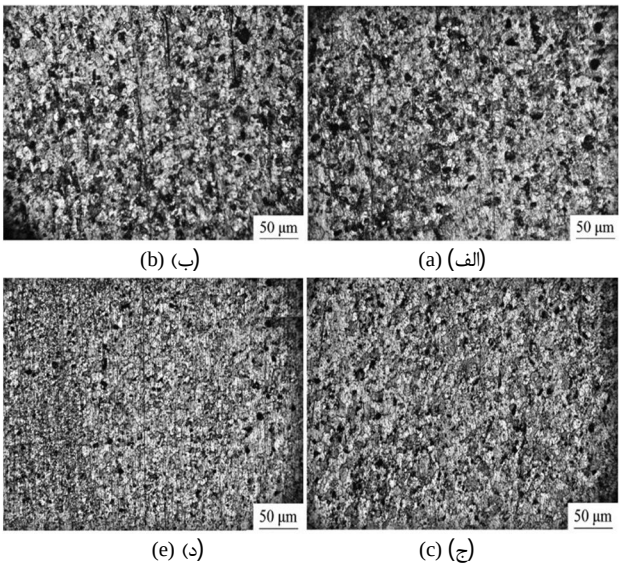


Fig. 7 Optical micrographs of cross sectional of the FSP zone specimens (a) 75% Gr, 25% ZrO_2 (b) 50% Gr, 50% ZrO_2 (c) 25% Gr, 75% ZrO_2 (d) 100% ZrO_2

شکل 7 تصویر میکروسکوپ نوری سطح مقطع نمونه‌ها از ناحیه فرآوری شده (الف) 75% Gr, 25% ZrO_2 (ب) 50% Gr, 50% ZrO2 (ج) 25% Gr, 75% ZrO_2 (د) 100% ZrO_2

قرار دهد. در آلیاژهای آلومینیم، تغییر شکل شدید در این ناحیه دیده می‌شود ولی تبلورمجدد مشاهده نشده است [23]. در فلز پایه هیچ تغییر شکلی رخ نداده است و ریزساختار و خواص مکانیکی مواد توسط شار حرارتی تحت تأثیر قرار نگرفته است.

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌ای که دارای 100% زیرکونیا، 75% زیرکونیا و 25% گرافیت است نشان می‌دهد. همانطور که از تصاویر مشخص است توزیع ذرات در زمینه یکنواخت است که این نتیجه مطلوب در کاهش اندازه دانه و افزایش خواص مکانیکی دارد. همچنین از این نمونه‌ها آنالیز عنصری گرفته شد و نتایج نشان می‌دهد که ذرات مورد استفاده زیرکونیا و گرافیت است. همچنین در تصاویر مشخص است که ذرات گرافیت در اثر اغتشاش و فشار شدیدی که ابزار وارد کرده، خرد شده و اندازه آن‌ها به شدت کاهش یافته است.

3-2- میکروسختی

شکل 9 الف و ب به ترتیب نمودار میکروسختی از سطح و سطح مقطع فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد.

همانطور که مشخص است میزان سختی نمونه‌های فرآوری شده نسبت به فلز پایه افزایش داشته است. نکته قابل توجه این است که با افزایش میزان درصد زیرکونیا میزان سختی هم افزایش پیدا کرده است و بهترین نتیجه مربوط به نمونه‌ای که دارای 75% زیرکونیا و 25% گرافیت است، بدست آمد بطوری که حدود 35HV نسبت به فلز پایه افزایش سختی داشته است.

جدول 4 میانگین اندازه دانه‌ها در نمونه‌های مختلف

Table 4 Average grain size of different samples

نمونه	BM	75% Gr, 25% ZrO_2	50% Gr, 50% ZrO_2	25% Gr, 75% ZrO_2	100% ZrO_2
اندازه دانه (µm)	35	15	12.5	9.7	7.2

[1] Stir Zone (SZ)
[2] Thermo Mechanical Affect Zone (TMAZ)
[3] Base Metal (BM)
[4] Pinning

Archive of SID

www.SID.ir

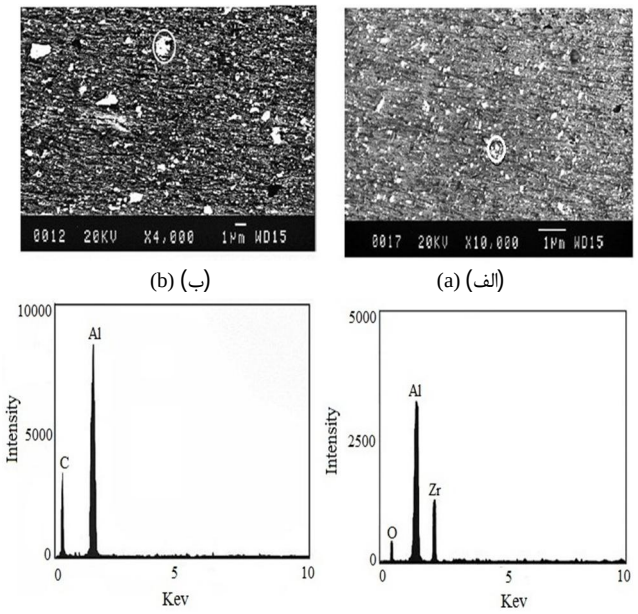


Fig. 8 SEM micrograph of the SZ (a) 100% ZrO_2 (b) 75% ZrO_2, 25% Gr with EDS analysis

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه اغتشاشی (الف) 100% ZrO_2 (ب) 75% ZrO_2, 25% Gr با آنالیز EDS

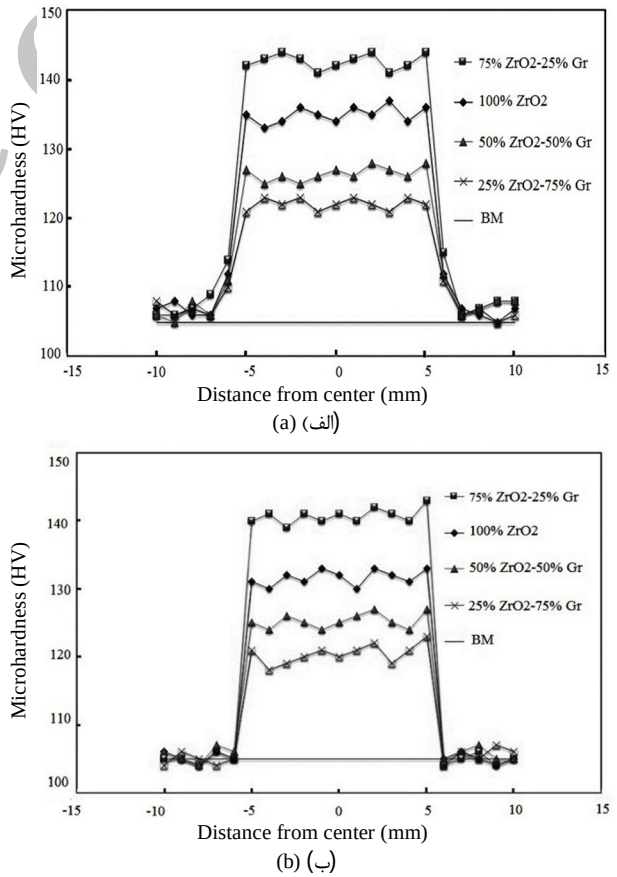


Fig. 9 Microhardness profiles of $Al2024/Gr/ZrO_2$ nanocomposite (a) surface (b) cross section of specimens

شکل 9 نمودار میکروسختی نانو کامپوزیت آلومنیم 2024/گرافیت/زیرکونیا (الف) سطح (ب) سطح مقطع نمونه‌ها

مکانیزم‌های افزایش سختی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات عبارتنداز:

- اندازه دانه
- استحکام بخشی اوروان[1]
- سختی ناشی از نابجایی‌های بوجود آمده در اثر اختلاف انقباض حرارتی بین ذرات تقویت کننده و فلز پایه
- کارسختی ناشی از اختلاف کرنشی بین ذرات تقویت کننده الاستیک و فلز پایه پلاستیک [1].

با توجه به ویژگی‌های ریزساختاری کامپوزیت‌های تولید شده با فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، عوامل عمده در افزایش سختی لایه کامپوزیتی ایجاد شده (1) دانه‌های ریز (2) استحکام بخشی اوروان در اثر توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده است.

3-3- خواص سایشی

ابتدا آزمون سایش نمونه‌های فرآوری شده و فلز پایه در بار اعمالی 1 نیوتن مورد بررسی قرار گرفت تا نمونه‌ای که دارای بیشترین مقاومت به سایش بود در بار اعمالی مختلف هم مورد بررسی قرار بگیرد. شکل 10 نسبت کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش در بار اعمالی 1 نیوتن را برای فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است میزان کاهش وزن نمونه‌های فرآوری شده نسبت به فلز پایه کمتر است. همچنین در شکل 11 میزان نرخ سایش بر حسب مسافت لغزش در بار اعمالی 1 نیوتن آورده شده است و در این شکل هم میزان نرخ سایش نمونه‌های فرآوری شده نسبت به فلز پایه کمتر است و بهترین نتیجه مربوط به نمونه‌ای که دارای 25% زیرکونیا و 75% گرافیت است بدست آمد بطوری که میزان کاهش وزن حدود 30 درصد و نرخ سایش هم حدود 50 درصد نسبت به فلز پایه کاهش داشته است.

در شکل 12 ضریب اصطکاک در بار اعمالی 1 نیوتن برای نمونه‌های فرآوری شده و فلز پایه آورده شده است. روند تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌ها با داده‌های سایشی که تا اینجا بحث شد مطابقت دارد. کمترین ضریب اصطکاک هم مربوط به نمونه‌ای که دارای 25% زیرکونیا و 75% گرافیت است، بدست آمد بطوری که میزان ضریب اصطکاک حدود 25 درصد نسبت به فلز پایه کاهش داشته است. نکته قابل این است که با افزایش میزان گرافیت میزان مقاومت به سایش نمونه‌ها زیاد شده است که علت این است که گرافیت، یک ماده خود روانکار جامد محسوب می‌شود. گرافیت سبب ایجاد یک فیلم روانکار روی سطوح سایش شده و بدین ترتیب ضریب اصطکاک بین سطوح سایشی را کاهش می‌دهند. کاهش ضریب اصطکاک سبب کاهش تغییر شکل پلاستیک در منطقه زیر سطح سایش و در نتیجه تبدیل مکانیزم سایش شدید چسبان به سایش خراشان و افزایش مقاومت به سایش قطعه می‌شود. در واقع می‌توان اینطور بیان کرد که سایش چسبان از روی پاک شدن لایه سطحی، پوسته پوسته شدن یا بهم جوش خوردن ذرات شاخته می‌شود. تغییر شکل برشی مهمترین مکانیزم در سایش چسبان محسوب می‌شود، بطور کلی تنش‌های تماسی بالای موجود منجر به تغییر شکل پلاستیک موضعی شده و این امر باعث تشکیل پیوندهای چسبان بین دو سطح درگیر می‌شود و با ادامه حرکت لغزشی تنش برشی در منطقه پیوند خورده، افزایش یافته تا اینکه در نهایت از تنش تسلیم ماده نرم‌تر بطور قابل ملاحظه‌ای فراتر می‌رود. اما وجود ذرات گرافیت به دلیل تشکیل یک فیلم

[1] Orowan

www.SID.ir
Archive of SID

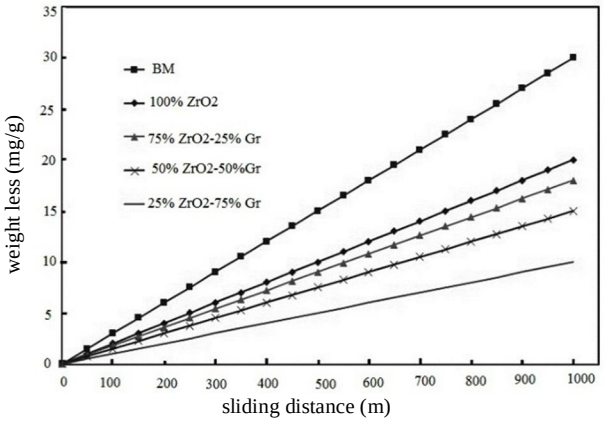


Fig. 10 Variation of weight loss with the sliding distance

شکل 10 تغییرات کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش

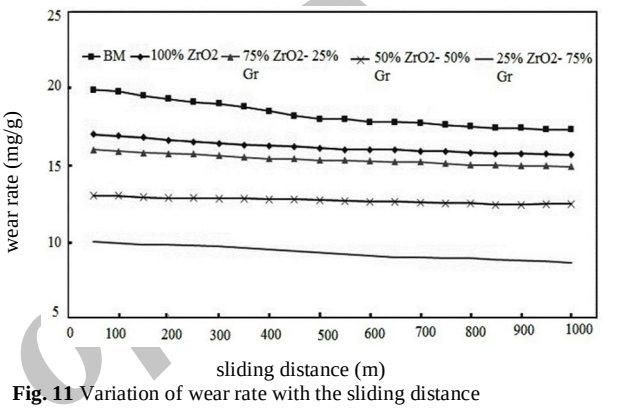


Fig. 11 Variation of wear rate with the sliding distance

شکل 11 تغییرات نرخ سایش بر حسب مسافت لغزش

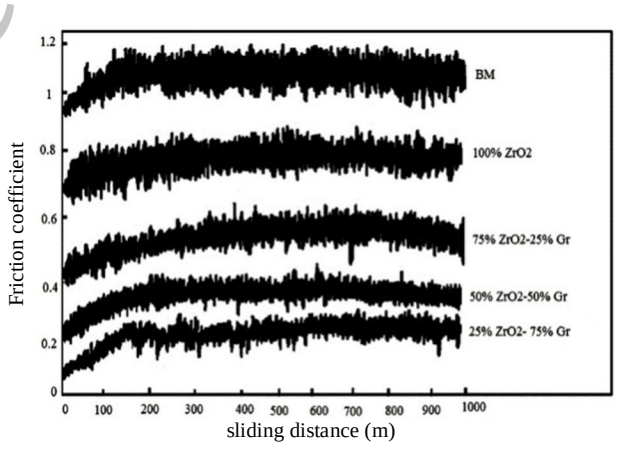


Fig. 12 Variations of friction coefficient with sliding distance

شکل 12 تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش

روانکار در سطح باعث از بین رفتن این حالت شده و در نتیجه باعث بهبود مقا.مت به سایش می‌شود. همچنین علت اینکه با افزایش میزان ذرات زیرکونیا مقاومت به سایش کم شده این است که این ذرات از سطح خارج شده و باعث انجام یک فرایند سایش با سه جسم ساینده می‌شود.

نمونه بهینه که دارای 75% گرافیت و 25% زیرکونیا بود در بارهای اعمالی 5 و 10 نیوتن مورد بررسی قرار گرفت و در شکل 13 الف و ب نتایج نرخ سایش و کاهش وزن را نشان می‌دهد که با افزایش بار اعمالی میزان کاهش وزن و نرخ سایش افزایش یافته است که این یک امر طبیعی به حساب می‌آید چون با افزایش بار اعمالی میزان قدرت نفوذ ماده ساینده افزایش یافته یا به عبارت دیگر سطح تماس واقعی بین سطح نمونه و پین ساینده افزایش پیدا کرده و به مقدار واقعی خود نزدیک می‌شود و باعث بیشتر کنده شدن ماده از سطح نمونه می‌شود و در نتیجه میزان نرخ سایش و کاهش وزن نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند.

شکل 14 نیز حالت پایدار نرخ سایش برحسب بار اعمالی (1 نیوتن) را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش درصد گرافیت میزان نرخ سایش کاهش یافته است.

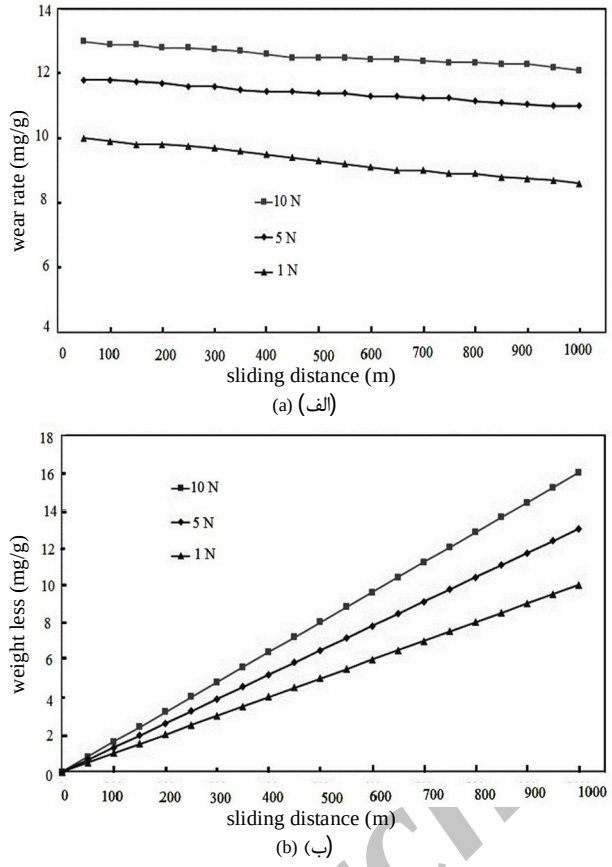


Fig. 13 (a) Variation of weight loss with the sliding distance the load different (b) Variation of wear rate with the sliding distance the load different

شکل 13 (الف) تغییرات کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش در بار اعمالی متفاوت (ب) تغییرپذیری نرخ سایش بر حسب مسافت لغزش در بار اعمالی

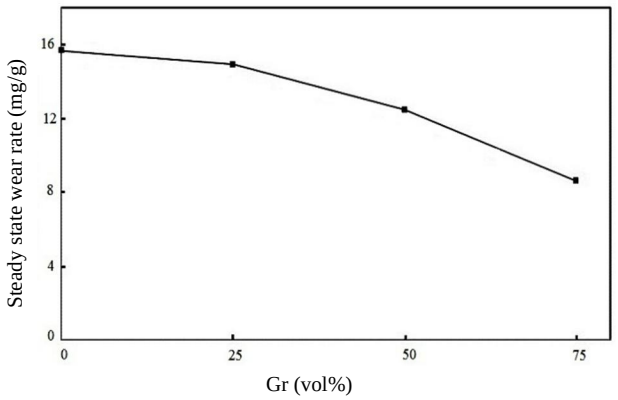
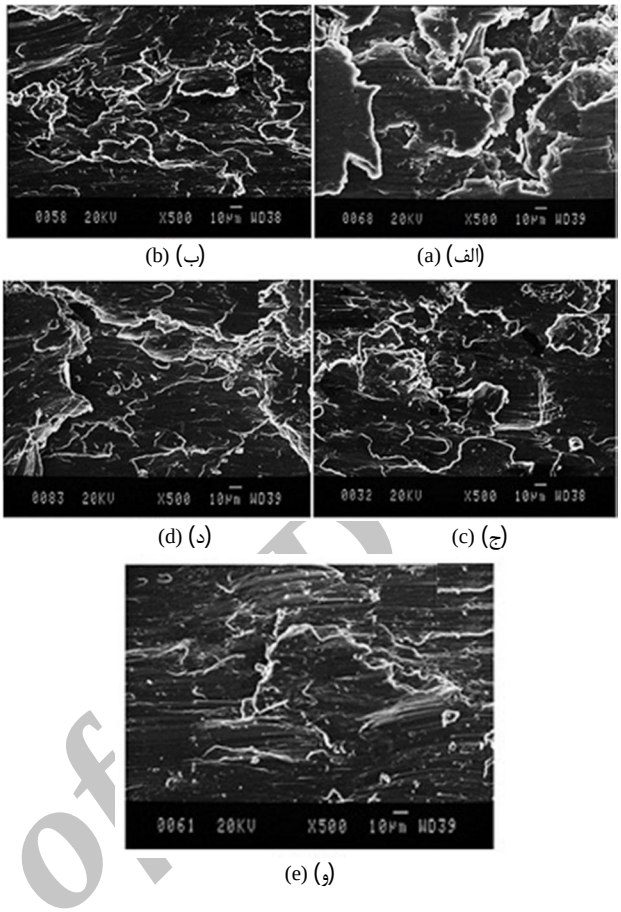


Fig. 14 Steady state wear rate

شکل 14 حالت پایداری نرخ سایش

www.SID.ir



(a) (الف) (b) (ب)

(c) (ج) (d) (د)

(e) (و)

Fig. 15 SEM images of the worn surfaces (a) BM (b) 100% ZrO_2 (c) 25% ZrO_2, 75% Gr (d) 50% ZrO_2, 50% Gr (e) 25% ZrO_2, 75% Gr

شکل 15 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح ساییده شده (الف) فلز پایه (ب) 100% ZrO_2 (ج) 25% ZrO_2, 75% Gr (د) 50% ZrO_2, 50% Gr (و) 25% ZrO_2, 75% Gr

معمولا مکانیزم متعددی در سایش یک نمونه نقش دارند. این امر بر پیچیدگی کار بررسی نمونه‌های سایش می‌افزاید. به منظور تشخیص مکانیزم سایش نمونه‌ها آنالیز SEM از سطح سایش گرفته شد. شکل 15 تصویر SEM از سطح سایش فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است میزان عمق شیار ایجاد شده در سطح نمونه فلز پایه بیشتر است و کمترین عمق شیار هم مربوط به نمونه‌ای که حاوی 75% گرافیت و 25% زیرکونیا است بدست آمد، که نشان دهنده سایش ملایم با مکانیزم خراشان و در نتیجه شرایط بهبود یافته برای سایش است.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر نسبت ترکیبی گرافیت و زیرکونیا بر ریزساختار، خواص مکانیکی و سایشی نانو کامپوزیت سطحی $Al2024/Gr/ZrO_2$ تولید شده با روش فرآوری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته شده است و نتایج زیر حاصل گردید:

- نتایج ریزساختاری نشان دهنده توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در فلز پایه می‌شود، بطوری که عیوبی مانند ترک و حفره تونلی در ریزساختار ناحیه اغتشاشی نمونه‌ها مشاهده نشد.
- نتایج میکروسختی نشان می‌دهد که با انجام دادن فرایند فرآوری اصطکاکی اغتشاشی میزان سختی نسبت به فلز پایه افزایش پیدا می‌کند بطوری که میزان سختی در نمونه حاوی 75% زیرکونیا و 25% گرافیت حدود 30 درصد افزایش داشته است.
- استفاده از ذرات سرامیکی مانند زیرکونیا باعث افزایش سختی می‌شود، اما این افزایش سبب بالا رفتن نرخ سایش از سطح متقابل سایش می‌شود.
- استفاده از مواد خود روانکار مانند گرافیت در کنار ذرات سرامیکی مانند زیرکونیا باعث ایجاد یک فیلم روانکار بر روی سطوح سایش شده و بدین ترتیب ضریب اصطکاک بین سطوح سایش را کاهش داده و سبب کاهش تغییر شکل پلاستیک در منطقه زیر سطح و در نتیجه تبدیل مکانیزم سایش شدید چسبان به سایش خراشان که باعث افزایش مقاومت به سایش می‌شود.
- بیشترین مقاومت به سایش در بین نسبت ترکیبی مربوط به نمونه که حاوی 75% گرافیت و 25% زیرکونیا است بدست آمد بطوری که میزان ضریب اصطکاک حدود 25 درصد نسبت به فلز پایه و حدود 19 درصد نسبت به نمونه حاوی 100% زیرکونیا کاهش یافته است.
- با افزایش بار اعمالی، میزان نرخ سایش و کاهش وزن افزایش می‌یابد که علت آن افزایش قدرت نفوذ ابزار ساینده در سطح نمونه‌ها است.

5- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خورد لازم می‌دانند که از سرپرستان و مسئولان آزمایشگاه‌های متالوگرافی، خواص مکانیکی، ماشین ابزار و SEM دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا تقدیر و تشکر نمایند.

6- مراجع

[1] S. Shahraki, S. Khorasani, R. Abdi Behnagh, Y. Fotouhi, H. Bisadi, Producing of AA5083/ZrO_2 nanocomposite by friction stir processing (FSP), *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 44, No. 6, pp. 1546- 1553, 2013.

[2] M. Gui, S. Kang, Dry sliding wear behavior of plasma-sprayed aluminum hybrid composite coatings, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 32, No. 9, pp. 2383–2392, 2001.

[3] S. Suresha, B. K. Sridhara, Effect of addition of graphite particulates on the wear behavior in aluminium–silicon carbide–graphite composites, *Materials and Design*, Vol. 31, No. 4, pp. 1804–1812, 2010.

[4] S. Gopalakrishnan, N. Murugan, Prediction of tensile strength of friction stir welding aluminium matrix TiCp particulate reinforced composite, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 1, pp. 462–467, 2011.

[5] C. M. Rejil, I. Dinaharan, S. J. Vijay, N. Murugan, Microstructure and sliding wear behavior of AA6360/ ($TiC+B_4C$) hybrid surface composite layer synthesized by friction stir processing on aluminum substrate, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 552, No. 1, pp. 336-344, 2012.

[6] A. Mostafapour Asl, S. T. Khandani, Role of hybrid ratio in microstructural, mechanical and sliding wear properties of the Al5083/Graphitep/Al_2O_3p a surface hybrid nanocomposite fabricated via friction stir processing method, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 559, No. 1, pp. 549-557, 2013.

[7] 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.

[8] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Friction stir processing: a new grain refinement technique to achieve high strain rate superplasticity in commercial alloys, *Materials Science Forum*, Vol. 507, No. 1, pp. 357–359, 2001.

[9] 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.

[10] Z. Trojanova, A. Jager, A. Namesny, Mechanical and fracture properties of an AZ91 magnesium alloy reinforced by Si and SiC particles. *Composites Science and Technolog*, Vol. 69, No. 13, pp.

Archive of SID

www.SID.ir

Fabrication of Al5083 surface composites reinforced by CNTs and cerium oxide nanoparticles via friction stir processing, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 662, No. 1, pp. 725-733, 2014.

[18] 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.

[19] S. Ahmadifard, Sh. Kazemi, A. Heidarpour, Fabrication of $Al5083/TiO_2$ 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)

[20] M. Barmouz, M. H. B. Givi, J. Seyfi, On the role of processing parameters in producing Cu/SiC metal matrix composites via friction stir processing: investigating microstructure, microhardness, wear and tensile behavior, *Materials Characterization*, Vol. 62, No. 1, pp. 108-117, 2011.

[21] 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.

[22] G. Liu, L. E. Murr, C. S. Niou, J. C. Mclure, F. R. Vega, Microstructural aspects of the friction stir welding of 6061-T6 aluminum, *Scripta Materialia*, Vol. 37, No. 1. pp .355-361, 1997.

[23] J. Q. Su, T. W. Nelson, R. S. Mishra, M. Mahoney, Microstructural investigation of friction stir welded 7050- T651 aluminum, *Acta Materialia*, Vol. 51, No. 3, pp. 713-729, 2003.

2256-2264, 2009.

[11] P. Asadi, G. Faraji, A. Masoumi, M. K. B. Givi, Experimental investigation of magnesium-base nanocomposite produced by friction stir processing: effects of particle types and number of friction stir processing passes, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 42. No. 9, pp. 2820-2832. 2011.

[12] S. Basavarajappa, G. Chandramohan, A. Mahadevan, M. Thangavelu, R. Subramanian, P. Gopalakrishnan, Influence of sliding speed on the dry sliding wear behaviour and the subsurface deformation on hybrid metal matrix composite, *Wear*, Vol. 262, No. 7-8, pp. 1007-1012, 2007.

[13] S. Soleymani, A. Abdollah-zadeh, S. A. Alidokht, Microstructural and tribological properties of Al5083 based surface hybrid composite produced by friction stir processing, *Wear*, Vol. 278, No. 1, pp. 41-47, 2012.

[14] A. Devaraju, A. Kumar, B. 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.

[15] M. N. Avettand-Fènoël, A. Simar, R. Shabadi, R. Taillard, B. de Meester, Characterization of oxidedispersion strengthened copper based materials developed by friction stir processing, *Materials and Design*, Vol. 60, No. 1, pp. 343-357, 2014.

[16] 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.

[17] S. A. Hossieni, K. Ranjbar, R. Dehmolaei, A. R. Amirani,

Archive of SID

www.SID.ir