مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، مرداد 1399، دوره 7، شماره 5، ص‌ص. 56- 63

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

کامپوزیت‌سازی و تقویت سطح آلومینیوم 7075 توسط میکرو و نانوذرات پامیس با استفاده از فرایند اصطکاکی - اغتشاشی (FSP)

رشید توحیدی منش[1]، مهدی قبیتی حسب[2*]، علی حیدری مقدم[2]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

2- استادیار، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

* دزفول، صندوق پستی 313، ghobeiti@iaud.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 9 آذر 1398

داوری اولیه: 27 آذر 1398

پذیرش: 21 دی 1398

کلیدواژگان:

فرایند اصطکاکی اغتشاشی

آلومینیوم 7075

ذرات پامیس، سختی، مقاومت به سایش

چکیده

در این تحقیق با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP)، سطح ورق آلومینیوم 7075-T6 با میکروذرات و نانوذرات پامیس تقویت شد. ابتدا مطلوبترین شرایط از لحاظ تعداد پاس فرایند (1 و 4 پاس)، سرعت پیشروی خطی (40 و 80 میلی‌متر بر دقیقه) و سرعت دورانی ابزار (800 و 1200 دور بر دقیقه) با توجه به ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش آلومینیوم انتخاب شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش تعداد پاس، کاهش سرعت پیشروی خطی و افزایش سرعت دورانی ابزار، اندازه دانه‌ها در محدوده اغتشاش یافته کاهش (بر اساس تصاویر میکروسکوپی)، سختی افزایش (بر اساس نتایج تست میکروسختی ویکرز) و مقاومت به سایش نیز افزایش (بر اساس نتایج تست پین روی دیسک) می‌یابد. تحت شرایط تک پاسه، سرعت پیشروی خطی 80 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی 800 دور بر دقیقه اندازه دانه متوسط در ناحیه اغتشاش یافته حدود 10 میکرون بود در حالی که با ایجاد شرایط 4 پاسه، سرعت پیشروی خطی 40 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی 1200 دور بر دقیقه به حدود 5 میکرون کاهش یافت که موجب افزایش میانگین میکروسختی از 80/2 به 94/6 ویکرز و کاهش میزان سایش از 33 به 27 میلی گرم پس از طی مسافت 1000 متر گردید. با افزودن میکروذرات پامیس (با اندازه میانگین 5 میکرون) و نانوذرات پامیس (با اندازه میانگین 100 نانومتر) به زمینه آلومینیوم، میانگین سختی بترتیب به 99/6 و 107/8 ویکرز افزایش و میزان سایش بترتیب به 24 و 20 میلی گرم کاهش یافت.

Composite fabrication and surface reinforcement of aluminum 7075 by pumice micro and nanoparticles using the friction stir process (FSP)

Rashid Tohidi Manesh, Mehdi Ghobeiti Hasab*, Ali Heidary Moghadam

Materials and Energy Research Center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

* P.O.B. 313 Dezful, Iran, ghobeiti@iaud.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 30 November 2019
First Decision: 28 November 2019
Accepted 11 January 2020

Keywords:
Friction stir process
Aluminum 7075
Pumice particles
Hardness
Resistance to wear

Abstract

In this research, the surface of aluminum 7075-T6 was reinforced by pumice micro and nanoparticles using the friction stir process (FSP). First, optimum parameters of pass number (1 & 4 pass), travel speed (40 & 80 mm/min) and tool rotation rate (800 & 1200 rpm) considering the microstructure, hardness and resistance to wear were selected. Results showed that with increasing the pass number, decreasing the travel speed and increasing the tool rotation rate, the grain size in stirred zone (according to the microscopy images) decreased, while the hardness (according to the Vickers micro-hardness test results) and resistance to wear (according to the pin on disk test results) increased. Under conditions of single pass, travel speed of 80 mm/min and tool rotation rate of 800 rpm, average grain size in stirred zone was 10 micron; while under conditions of four passes, travel speed of 40 mm/min and tool rotation rate of 1200 rpm it was reduced to 5 micron that led to an increase in average micro-hardness from 80.2 to 94.6 Vickers and a decrease in wear amount from 33 to 27 mg after a sliding distance of 1000 m. By addition of pumice micro and nanoparticles, average micro-hardness was increased to 99.6 and 107.8 Vickers and wear amount was decreased to 24 and 20 mg, respectively.

1- مقدمه

آلیاژ آلومینیوم 7075 به دلیل دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالا به طور گسترده در صنایع هوافضا، نظامی، دریایی و خودرو سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات سرامیکی به دلیل بهبود استحکام خزشی، کاهش ضریب انبساط حرارتی و افزایش سختی و مقاومت سایشی همواره مورد توجه مهندسان طراح بوده است [2]. یکی از روش‌های ساخت این کامپوزیت‌ها فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) است. در این فرایند، ابزاری که متشکل از پین و شانه است با سرعت دورانی مشخص بر روی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Tohidi Manesh, M. Ghobeiti Hasab, A. Heidary Moghadam, Composite fabrication and surface reinforcement of aluminum 7075 by pumice micro and nanoparticles using the friction stir process (FSP), Vol. 7, No. 5, pp. 56- 63, 2020 (in Persian)

ورق فلزی فرود می‌آید. درون ورق یک شیار طراحی و ذرات سرامیکی درون آن ریخته می‌شوند. حرکت دورانی ابزار بر روی ورق منجر به تولید گرمای اصطکاکی و در نتیجه خمیری شدن ورق می‌شود. نفوذ پین به درون ورق تا تماس سطح شانه ابزار با سطح ورق ادامه می‌یابد. سپس ابزار شروع به حرکت خطی می‌کند و پس از طی نمودن مسیر، از روی ورق بلند شده و فرایند به اتمام می‌رسد (شکل1) [3].

گارسیا و همکارانش [4] با فرایند اصطکاکی اغتشاشی، کامپوزیت سطحی آلومینیوم 7075 تقویت شده با نانوذرات کاربید تیتانیوم (TiC) تولید کردند. ضخامت ورق مورد استفاده در تحقیق آن‌ها 10 میلی‌متر بود که پین در آن 2.8 میلی‌متر نفوذ می کرد. در تحقیق آن‌ها سرعت چرخش ابزار 1000 دور بر دقیقه، سرعت خطی ابزار 300 میلی‌متر بر دقیقه، زاویه انحراف ابزار 1.5 درجه و نیروی وارد بر ابزار 8 کیلو نیوتن انتخاب شده بود.

رانا و همکارانش [5] و همچنین سودهاکار و همکارانش [6] در دو تحقیق مستقل سختی و مقاومت به سایش ورق آلومینیوم 7075 را با افزودن ذرات کاربید بور (B_4C) افزایش دادند. در تحقیق رانا، سختی کامپوزیت (144 ویکرز) در مقایسه با فلز پایه (80 ویکرز) افزایش قابل توجه داشت. همچنین نرخ سایش فلز پایه از 8/35 میلی‌متر مکعب پس از طی 2000 متر و بار اعمالی 60 نیوتن با کامپوزیت سازی به 7/23 میلی‌متر مکعب کاهش یافت. سرعت چرخش ابزار 500 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی خطی آن 50 میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف پین 3 درجه در نظر گرفته شده بود. در تحقیق سودهاکار با بررسی سه اندازه ذره مختلف پودر کاربید بور (30، 60 و 160 میکرون) این نتیجه حاصل شد که با کاهش اندازه ذرات پودر سرامیک، سختی و خواص سایشی بهبود می یابند.

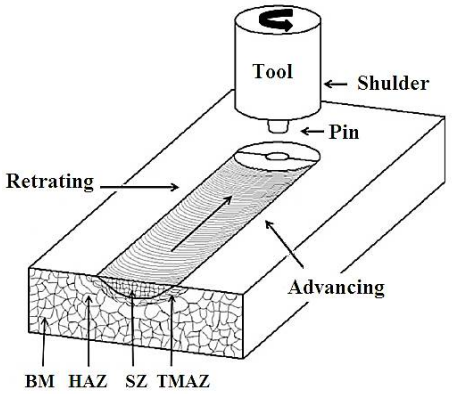

Fig. 1 Schematic of the friction stir process [3]

شکل 1 شماتیک فرایند اصطکاکی اغتشاشی [3]

در تحقیقی تأثیر ذرات بورید تیانیوم (TiB_2) بر خواص مکانیکی آلومینیوم 7075 توسط راجان و همکارانش [7] بررسی گردید. آنها سرعت چرخش ابزار را 1200 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی خطی ابزار را 50 میلی‌متر بر دقیقه و نیروی محوری را 10 کیلو نیوتن در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که با کامپوزیت سازی اندازه دانه فلز پایه از حدود 300 میکرون به 6 میکرون، سختی از 65 به 160 ویکرز، استحکام کششی از 143 به 340 مگاپاسکال، درصد ازدیاد طول از 8/2 به 2/5 درصد و نرخ سایش از 205 به 98 میلی‌متر مکعب بر متر تغییر یافته است.

تأثیر ذرات نیترید تیتانیوم (TiN) توسط حسین و همکارانش [8]، طی ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیوم 7075 مورد ارزیابی قرار گرفته است. آنها از پین‌های با شکل‌های مختلف پیچی شکل، مربع و سه گوش استفاده کردند. سرعت چرخش ابزار 1200 دور بر دقیقه، سرعت خطی 40 میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار 2.5 درجه انتخاب شدند. خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته شده با ابزار مربعی نسبت به سایر ابزارها مطلوب تر بود.

ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیوم 7075 با ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیوم (SiC) و گرافیت توسط پریاسامی و همکارانش [9] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت حاوی 50 درصد کاربید سیلیسیوم و 50 درصد گرافیت نسبت به کامپوزیت‌های فقط شامل کاربید سیلیسیوم یا فقط شامل گرافیت به مراتب بهتر است.

در تحقیق حاضر، از میکرو و نانوذرات پامیس (سنگ پا) برای تقویت سطح ورق آلومینیوم 7075 با به کارگیری فرایند اصطکاکی اغتشاشی استفاده شده است. پامیس یک سنگ آتشفشانی سبک و متخلخل غنی از سیلیس است که در ایران به وفور یافت می‌شود؛ از اینرو ارزان قیمت بوده و استفاده از آن مقرون به صرفه است.

2- مواد و روش انجام آزمایش

ابتدا ورق آلومینیوم 7075-T6 با ضخامت 5 میلی‌متر به ورق‌هایی با ابعاد 15×7 سانتی‌متر بریده و به منظور حذف آلودگی‌های سطحی، سنباده زنی شدند. ابزاری به شکل استوانه با ارتفاع 70 میلی‌متر و قطر شانه 20 میلی‌متر از جنس فولاد ابزار H13 با پینی استوانه ای به قطر 6 میلی‌متر و ارتفاع 3 میلی‌متر طراحی شد. برای فراهم کردن یک منطقه اغتشاشی مناسب، زاویه تقعر شانه 8 درجه و زاویه انحراف پین نسبت به خط عمود بر سطح، 1

درجه در نظر گرفته شد. فرایند اصطکاکی اغتشاشی با دستگاه فرز مدل FP4MK ساخت شرکت ماشین سازی تبریز انجام شد. نمونه‌ها با استفاده از بست و گیره بر روی دستگاه فرز محکم و با سرعت‌های دورانی و خطی مشخص تحت فرایند قرار گرفتند. شکل 2 تصویر قطعه بسته شده روی دستگاه فرز و تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. پارامترهای فرایند در ساخت نمونه‌ها در جدول 1 آورده شده است.

پودر پامیس با دو اندازه ذره مختلف (حدود 5 میکرون و حدود 100 نانومتر) از آسیا کردن پوکه پامیس (سنگ پا) توسط آسیای گلوله‌ای پر انرژی مدل Retsch-PM 400 (با نسبت گلوله به پودر برابر با 10 و سرعت چرخش 300 دور بر دقیقه در زمان‌های 1 و 5 ساعت) تهیه گردید.

Fig. 2 The Aluminum sheet under the friction stir process

شکل 2 ورق آلومینیوم تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی

جدول 1 پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی

Table 1 Parameters of the friction stir process

شماره آزمایش	تعداد پاس	سرعت پیشروی خطی (میلی‌متر بر دقیقه)	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)
1	1	80	800
2	1	40	800
3	4	40	800
4	4	40	1200
5	آزمایش شماره 4 با افزودن میکرو ذرات پامیس		
6	آزمایش شماره 4 با افزودن نانو ذرات پامیس		

قبل از ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، با دستگاه فرز یک شیار به عرض 1/5 میلی‌متر و عمق 1/5 میلی‌متر در وسط سطح بالای ورق‌ها ایجاد و پودر پامیس با یک ظرف نمک پاش درون شیار ریخته شد و اضافی آن از سطح جمع آوری گردید. سپس شیار با استفاده از یک ابزار بدون پین بسته شد تا در فرایند کامپوزیت سازی، پاشش پودر رخ ندهد. پس از اتمام فرایند، منطقه اغتشاشی توسط وایرکات جدا و سطح مقطع آن پس از سنباده زنی و پولیش، در محلول Keller (مخلوطی از اسید نیتریک، اسید هیدروکلریک و اسید هیدروفلوریک) به مدت 10 ثانیه اچ و بر روی آن مطالعات ریزساختاری با میکروسکوپ نوری (مدل B-600 OPTIKA)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل VEGA/TESCAN) و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (مدل MIRA3/TESCAN) مجهز به طیف سنج پراکندگی انرژی پرتو ایکس (FE-SEM/EDS) انجام شد. میکروسختی ویکرز سطح مقطع کامپوزیت با استفاده از دستگاه INNOVA TEST بر روی یک خط افقی فرضی که از سطح بالا، 1 میلی‌متر فاصله داشت در فواصل 0.5 میلی‌متری از هم اندازه‌گیری شد. برای بررسی میزان سایش نمونه‌ها، تست سایش به روش پین روی دیسک، تحت بار ثابت 100 نیوتن انجام و کاهش وزن نمونه‌ها پس از طی مسافت‌های 250، 500، 750 و 1000 متر گزارش شد. سطوح سایش یافته و مکانیزم سایش به کمک مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه 1 (تک پاسه، سرعت پیشروی خطی 80 میلی‌متر بر دقیقه، سرعت دورانی 800 دور بر دقیقه) را نشان می‌دهد. در این تصویر نواحی اغتشاشی (SZ)، متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ)، متأثر از حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM) مشخص شده است.

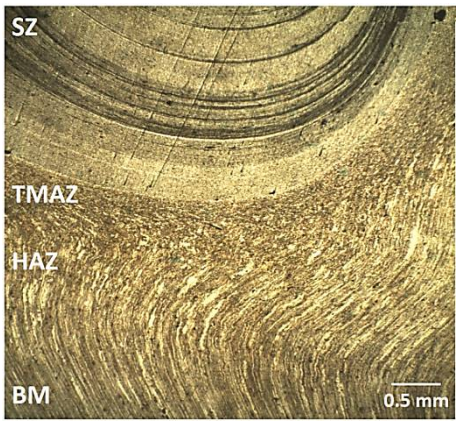

Fig. 3 OM image from the cross section of the sample No. 1

شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع نمونه 1

ناحیه اغتشاشی به صورت یک ساختار حلقه پیازی است که نشان از جریان داشتن ماده در این ناحیه دارد. تغییر شکل پلاستیک شدید در اثر چرخش پین و افزایش دمای ناشی از اصطکاک شانه ابزار موجب وقوع تبلور مجدد و در نتیجه کاهش شدید اندازه دانه در این ناحیه می‌گردد [10].

بین نواحی اغتشاشی (SZ) و فلز پایه (BM) دو ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) و ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) وجود دارد. در ناحیه ترمومکانیکی میزان کرنش و گرما به اندازه ای نیست که تبلور مجدد کامل شود لذا ریزساختار آن نسبت به منطقه اغتشاشی اندکی درشت‌تر است [11]. ناحیه متاثر از حرارت، تغییر شکل پلاستیکی را تجربه نمی‌کند بلکه فقط تحت تأثیر گرمای منتقل شده به آن می‌باشد که منجر به رشد دانه بندی این ناحیه می‌شود.

نتایج تست میکروسختی نمونه‌ها در شکل 4 ارایه شده است. به دلیل تغییرات زیاد سختی در هر نمونه و برای سهولت مقایسه بصورت کمی، میانگین نتایج سختی در ناحیه اغتشاشی محاسبه و در جدول 2 ارایه شده است.

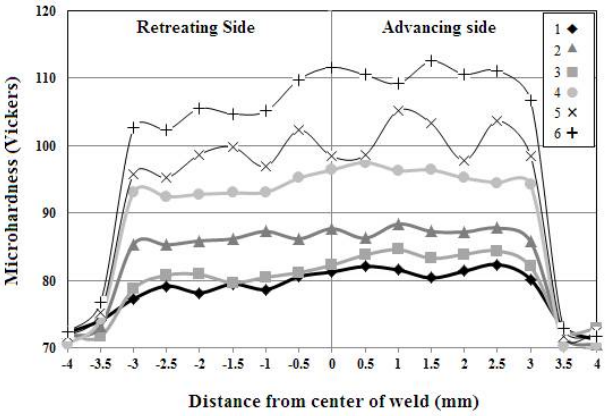

Fig. 4 Micro-hardness of the samples

شکل 4 میکروسختی نمونه‌ها

جدول 2 میانگین میکروسختی در ناحیه اغتشاشی

Table 2 Average micro-hardness in the stirred zone

شماره نمونه	میانگین میکروسختی (ویکرز)
1	80/2
2	82/0
3	86/7
4	94/6
5	99/6
6	107/8

همان‌طور که در شکل 4 و جدول 2 مشاهده می‌شود با کاهش سرعت پیشروی خطی از 80 به 40 میلی‌متر بر دقیقه (مقایسه نمونه‌های 1 و 2) میانگین میکروسختی ناحیه اغتشاشی افزایشی اندک از 80/2 به 82/0 ویکرز می‌یابد. با افزایش تعداد پاس فرایند از یک به چهار پاس (نمونه 3) میانگین میکروسختی به 86/7 ویکرز می‌رسد. با افزایش سرعت دورانی ابزار از 800 به 1200 دور بر دقیقه (نمونه 4)، افزایش میکروسختی قابل توجه تر است و به 94/6 ویکرز می‌رسد. علت این پدیده مربوط به تغییر میزان اغتشاش ایجاد شده در اثر فرایند اصطکاکی اغتشاشی با تغییر در تعداد پاس، سرعت پیشروی خطی و سرعت دورانی ابزار است. تغییر میزان اغتشاش با تأثیر بر اندازه دانه‌ها قابل توجیه است [12]؛ به عبارتی با افزایش تعداد پاس، کاهش سرعت پیشروی خطی و افزایش سرعت دورانی، اندازه دانه ناحیه اغتشاشی کاهش بیشتری می‌یابد. شکل‌های 5 و 6 به‌ترتیب تصویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع ناحیه اغتشاشی نمونه‌های 1 و 4 را نشان می‌دهد.

اندازه دانه با استفاده از نرم افزار محاسبه فواصل موجود بر روی دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی بر اساس میانگین ابعاد 20 دانه محاسبه شد. اندازه دانه نمونه 1 حدود 10 میکرون می‌باشد که در نمونه 2 به حدود 5 میکرون کاهش یافته است.

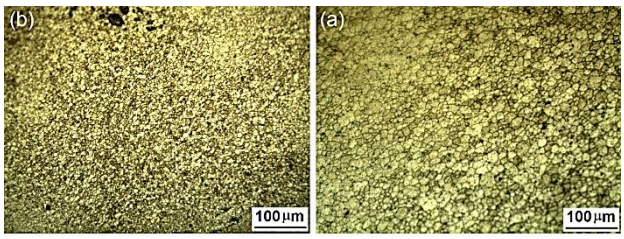

Fig. 5 OM image from the SZ cross section of the samples (a) No. 1 (b) No. 4

شکل 5 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع ناحیه اغتشاشی نمونه‌های (a) شماره 1 (b) شماره 4

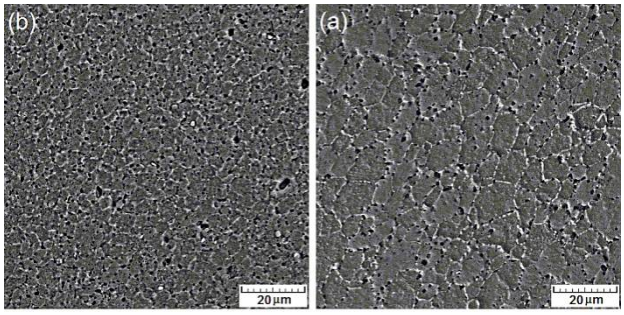

Fig. 6 SEM image from the SZ cross section of the samples (a) No. 1 (b) No. 4

شکل 6 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع ناحیه اغتشاشی نمونه‌های (a) شماره 1 (b) شماره 4

نقاط سیاه رنگ در تصاویر میکروسکوپی، تخلخل‌هایی هستند که ضمن فرایند اغتشاشی تشکیل شده اند. ارتباط بین افزایش سختی (H) با کاهش اندازه دانه (D) بر اساس رابطه‌هال پچ[1] است (رابطه 1) [13]. در این رابطه H_0 و k اعدادی ثابت هستند که به جنس ماده بستگی دارند.

$$H = H_0 + \frac{k}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

تحت شرایط فرایند اصطکاکی اغتشاشی نمونه 4، دو نمونه کامپوزیت با میکروذرات و نانوذرات پامیس تهیه شد. مورفولوژی میکروذرات و نانوذرات پامیس مورد استفاده در شکل 7 نشان داده شده است. بر اساس مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی (بر اساس اندازه‌گیری ابعاد 20 ذره در تصویر با استفاده از نرم افزار)، اندازه متوسط میکروذرات پامیس حدود 5 میکرون و نانوذرات پامیس حدود 100 نانومتر تخمین زده شد.

مقایسه میکروسختی نمونه‌های 4 و 5 و 6 (در نتایج نمودار شکل4 و جدول 2) نشان می‌دهد که با افزودن ذرات پامیس، میکروسختی ناحیه اغتشاشی افزایش می‌یابد. میانگین میکروسختی با افزودن میکروذرات پامیس از 94.6 به 99.6 ویکرز و با افزودن نانوذرات پامیس به 107.8 ویکرز افزایش می‌یابد. نمودار شکل 4 نشان می‌دهد که نوسان میکروسختی در ناحیه اغتشاشی کامپوزیت تهیه شده با نانوذرات پامیس نسبت به کامپوزیت تهیه شده با میکروذرات پامیس کمتر است که علت آن می‌تواند توزیع مناسب‌تر نانوذرات نسبت به میکروذرات در زمینه آلومینیوم باشد. شکل 8 نقشه توزیع میکروذرات و نانوذرات پامیس، بر اساس آنالیز عنصر سیلیسیوم که فراوان ترین عنصر موجود در پامیس است، را در کامپوزیت‌ها مورد مقایسه قرار می‌دهد.

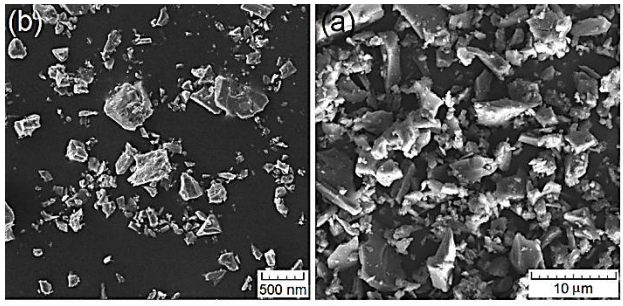

Fig. 7 Morphology of the (a) micro and (b) nano-particles of pumice used in this research

شکل 7 مورفولوژیِ (a) میکرو و (b) نانو ذرات پامیس مورد استفاده در این تحقیق

[1] Hall-Petch

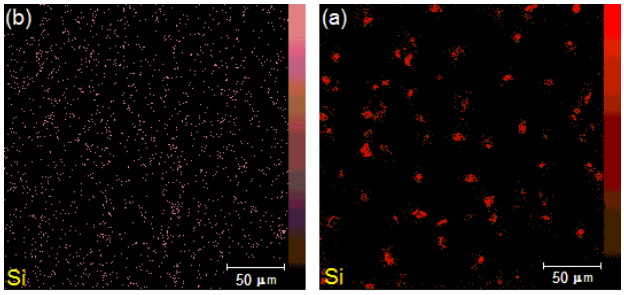

Fig. 8 Distribution map of pumice particles in composite based on silicon element analysis by EDS: (a) sample No. 5 (b) sample No. 6

شکل 8 نقشه توزیع ذرات پامیس در کامپوزیت بر اساس آنالیز عنصر سیلیسیوم توسط طیف سنج پراکندگی انرژی پرتو ایکس: (a) نمونه شماره5 (b) نمونه شماره6

در مورد نمونه‌های غیرکامپوزیتی، افزایش سختی به دلیل کاهش اندازه دانه است؛ اما در نمونه‌های کامپوزیتی، حضور ذرات سرامیکی سخت در آلیاژ زمینه و همچنین اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین ذرات سرامیکی و زمینه در افزایش سختی موثرند [14، 15]. شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه‌های 4 و 6 را مورد مقایسه قرار می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اندازه دانه آلومینیوم در این دو نمونه اختلاف چندانی با هم ندارد لذا افزایش سختی نمونه کامپوزیتی را نمی‌توان به کاهش اندازه دانه ارتباط داد بلکه به دلیل حضور ذرات پامیس است.

شکل 10 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از یک ذره پامیس در زمینه آلومینیوم به همراه آنالیز عناصر توسط طیف سنج پراکندگی انرژی پرتو ایکس را نشان می‌دهد. متخلخل بودن ذره پامیس در این تصویر به‌وضوح مشخص است. از نقاط مختلف به خصوص از فصل مشترک ذره پامیس با آلومینیوم آنالیز عنصری گرفته شد ولی اثری از فازی با ترکیب شیمیایی جدید ایجاد شده در اثر واکنش ذرات پامیس و آلومینیوم یافت نشد. آنالیز عنصریِ نقاط مختلف یا نتایجی مشابه نقطه A داشت که مربوط به ترکیب شیمیایی زمینه (آلیاژ آلومینیوم 7075) است و یا نتایجی مشابه نقطه B که ترکیب شیمیایی پامیس می‌باشد.

نکته قابل توجه دیگر که از نمودار شکل 4 استنتاج می‌شود این است که میزان سختی کامپوزیت‌ها در قسمت پیش رونده اندکی بیشتر از قسمت پس رونده است. در قسمت پیش رونده، جهت پیشروی و چرخش ابزار یکسان است در حالی که در قسمت پس رونده، خلاف جهت هم هستند؛ لذا در قسمت پیش رونده سرعت اغتشاش و سیلان ماده زمینه و همچنین توزیع ذرات پودر سرامیکی در زمینه بیشتر می‌گردد؛ در نتیجه سختی آن افزایش بیشتری می‌یابد [16]. با افزایش تعداد پاس و تغییر

جهت چرخش ابزار در هر پاس می‌توان اختلاف سختی در قسمت‌های پیش رونده و پس رونده را کاهش داد [17].

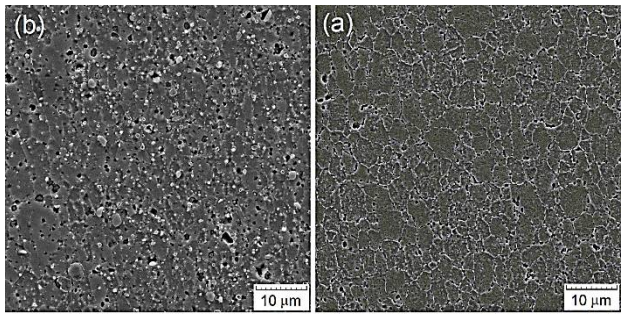

Fig. 9 SEM image from the SZ cross section of the samples (a) No. 4 (b) No. 6

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع ناحیه اغتشاشی نمونه‌های (a) شماره 4 (b) شماره 6

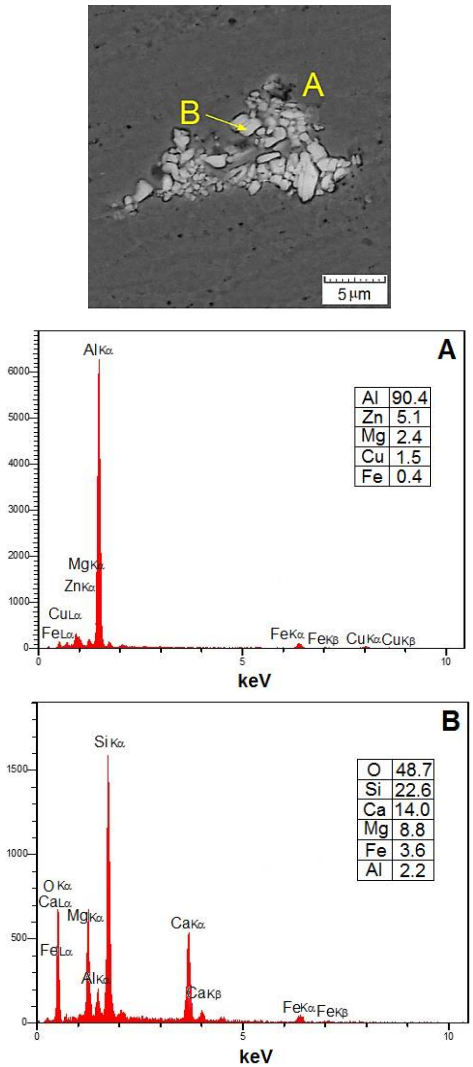

Fig. 10 Elemental analysis of a zone consist of pumice particle in the aluminum alloy matrix by EDS

شکل 10 آنالیز عنصری یک ناحیه شامل ذره پامیس در زمینه آلیاژ آلومینیوم با طیف سنج پراکندگی انرژی پرتو ایکس

شکل 11 نمودار میزان سایش (کاهش وزن) بر حسب مسافت لغزش نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است اختلاف میزان سایش نمونه‌ها در مسافت‌های لغزش طولانی‌تر، بیشتر می‌شود. مقایسه نمودارهای شکل‌های 4 و 11 نشان می‌دهد که سختی و مقاومت به سایش نمونه‌ها ارتباط مستقیمی با هم دارند که این مطلب با قانون آرچارد[1] تطابق دارد. این قانون (رابطه 2) بیان می‌کند که مقدار حجم ساییده شده (V) با افزایش سختی (H) کاهش می‌یابد. در این رابطه k ضریب سایش ماده، P بار وارده به ماده و d مسافت لغزش است [18]. همان طور که نتایج نشان می‌دهند، از بین نمونه‌ها کمترین میزان سایش پس از طی مسافت 1000 متر مربوط به کامپوزیت آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات پامیس است.

$$V = \frac{k.P.d}{H} \qquad (2)$$

شکل 12 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌های کامپوزیتی شماره 5 و 6 را نشان می‌دهد.

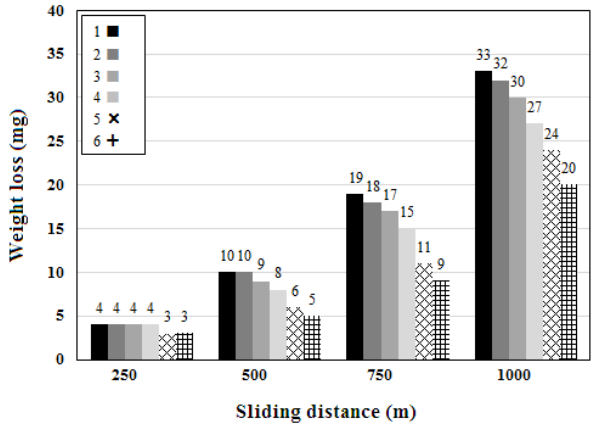

Fig. 11 Comparison of the samples wear

شکل 11 مقایسه سایش نمونه‌ها

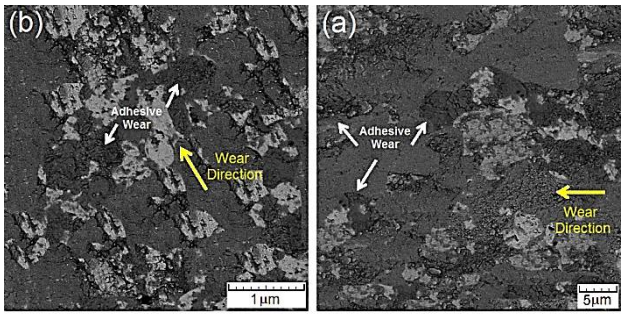

Fig. 12 SEM image from the wear surface of the samples (a) No. 5 (b) No. 6

شکل 12 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌های (a) شماره 5 (b) شماره 6

[1] Archard

کندگی ماده زمینه (آلومینیوم) نشانه مکانیزم سایش چسبان است اما ذرات سخت پامیس با مکانیزم سایش خراشان سایش یافته‌اند. سایش چسبان کاهش وزن بیشتری از ماده را در تست سایش به دنبال دارد [19]؛ لذا در نمونه شامل نانوذرات پامیس، چون فاصله بین ذرات سخت پامیس کمتر است؛ کندگی زمینه کمتر رخ می‌دهد و نرخ سایش کاهش می‌یابد.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم 7075 با استفاده از میکرو و نانوذرات پامیس توسط فرایند اصطکاکی اغتشاشی تولید شدند. سرعت پیشروی خطی، تعداد پاس و سرعت دورانی ابزار بعنوان پارامترهای متغیر انتخاب و ریزساختار، میکروسختی و میزان سایش نمونه‌های تولید شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با کاهش سرعت پیشروی خطی، افزایش تعداد پاس و افزایش سرعت دورانی ابزار، اندازه دانه ناحیه اغتشاشی کاهش یافته و منجر به افزایش سختی و مقاومت به سایش آن می‌شود. تحت پارامترهای یکسان فرایند اصطکاکی اغتشاشی (4 پاس، سرعت پیشروی خطی 40 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی 1200 دور بر دقیقه)، نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با میکرو و نانوذرات پامیس نسبت به نمونه غیرکامپوزیتی، سختی و مقاومت به سایش به مراتب بالاتری داشتند که تأثیر نانوذرات نسبت به میکروذرات بر افزایش سختی و مقاومت به سایش قابل توجه‌تر بود.

5- مراجع

[1] M. Imran, A.R. Anwar Khan, Characterization of Al-7075 metal matrix composites: a review, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, pp. 3347-3356, 2019.

[2] H.P. Degischer, Innovative Light Metals: Metal Matrix Composites and Foamed Aluminium, *Materials & Design*, Vol. 18, pp. 221-226, 1997.

[3] D. Yadav, R. Bauri, Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of aluminium, *Materials Science and Engineering*, Vol. 539, pp. 85-92, 2012.

[4] F. Garcia-Vazquez, B. Vargas-Arista, R. Muniz, J. Carlos Ortiz, H. Hernandez Garcia, J. Acevedo, The Role of Friction Stir Processing (FSP) Parameters on TiC Reinforced Surface Al7075-T651 Aluminum Alloy, *Soldagem & Inspeção*, Vol. 4, pp. 508-516, 2016.

[5] H.G. Rana, V.J. Badheka, A. Kumar, Fabrication of Al7075 / B_4C surface composite by novel Friction Stir Processing (FSP) and investigating on wear properties, *Procedia Technology*, Vol. 23, pp. 519-528, 2016.

[6] I. Sudhakar, G. Madhusudhan Reddy, K. Srinivasa Rao, Ballistic behavior of boron carbide reinforced AA7075 aluminium alloy using friction stir processing – An experimental study and analytical approach, *Defence Technology*, Vol. 12, pp 25-31, 2016.

[7] H.B. Michael Rajan, I. Dinaharan, S. Ramabalan, E.T. Akinlabi, Influence of friction stir processing on microstructure and properties of AA7075/TiB_2 in situ composite, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 657, pp. 250-260, 2016.

[8] G. Hussain, R. Hashemi, H. Hashemi, K.A. Al-Ghamdi, An experimental study on multi-pass friction stir processing of Al/TiN composite: some microstructural, mechanical, and wear characteristics, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 84, pp. 533-546, 2016.

[9] K. Periasamy, M. Jayaraman, S. Rajkumar, Mechanical properties of 7075-T6 aluminium alloy surface hybrid composites synthesised by friction stir processing, *International Journal of Rapid Manufacturing*, Vol. 8, pp. 52-64, 2019.

[10] 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, pp. 55-62, 2015. (in Persian فارسی)

[11] A. Tamadon, D.J. Pons, K. Sued, D. Clucas, Thermo mechanical grain refinement in AA6082-T6 thin plates under bobbin friction stir welding, *Metals*, Vol. 8, pp. 2-20, 2018.

[12] T. Shinoda, M. Kawai, Surface Modification by Novel Friction Thermomechanical Process of Aluminium Alloy Castings, *Surface and coating Technology*, Vol. 456, pp. 170-179. 2003.

[13] Z.Y. Ma, Friction Stir Processing Technology: a Review, *Metal Material Transaction A*, Vol. 39, pp. 642-58, 2008.

[14] 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, 458-464, 2012.

[15] C.R. Bradbury, J.K. Gomon, L. Kollo, H. Kwon, M. Leparoux, Hardness of multi wall carbon nanotubes reinforced aluminium matrix composites, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 585, pp. 362-367, 2014.

[16] M. Mosallaee, S.A. Daneshgar, Improvement of wearing property of Al/ (SiC+BNh) surface hybrid composite fabricated by friction stir processing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, pp. 381-389, 2017. (in Persian فارسی)

[17] S. Ahmadifard, A. Heidarpour, Sh. Kazemi, The effects of Pass number and Nano-Size ZrO_2 powder on the Mechanical, Microstructure and Wear behavior in Friction Stir Welding of the Al-5083, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, pp. 219-

227, 2018. (in Persian فارسی)

[18] E. Khodabakhshi, Sh. Kazemi, S. Ahmadifard, Investigation the mechanical and microstructural propreties of copper surface composite Cu/SiO_2 fabricated by friction stir processing, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, pp. 426-433, 2018. (in Persian فارسی)

[19] M. Rashidi, A. Alaei, M. Kasiri, The wear behavior of coated WC/Ni imposed by TIG welding method on St52 steel, *Iranian Journal of Surface Science And Engineering*, Vol. 33, pp. 43-55, 2017. (in Persian فارسی)